جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
ⵜⴰⵙⴷⴰⵡⵉⵜ ⵙⵉⴷⵉ ⵎⵓⵃⴰⵎⵎⴷ ⵏ ⵄⴰⴱⴷⵍⵍⴰⵀ ⴱⴼⴰⵙ
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

كلية العلوم ظهر المهراز فاس
ⵜⴰⵖⵢⵍⵓⵜ ⵏ ⵜⵣⵓⵣⵉⵜ ⵎⵓⵔⴰⵣ ⴼⴰⵙ
FACULTE DES SCIENCES DHAR EL MAHRAZ FES

N° d'ordre : 97/23

Centre des Études : ***Sciences et Techniques et Sciences Médicales (STSM)***

Formation Doctorale : ***Sciences de Matériaux et Procédés Industriels (SMPI)***

Discipline : **Efficacité énergétique**
Spécialité : **Sciences des matériaux pour l'énergie et l'environnement**
Laboratoires : **Laboratoire d'Ingénierie, Modélisation et Analyse des Systèmes (LIMAS) et Laboratoire Physique du Solide (LPS)**

THèSE DE DOCTORAT

Approches multidisciplinaires pour l'efficacité énergétique dans les bâtiments publics marocains :intégration dans les processus , conformité réglementaire, Analyse et prédiction de la performance

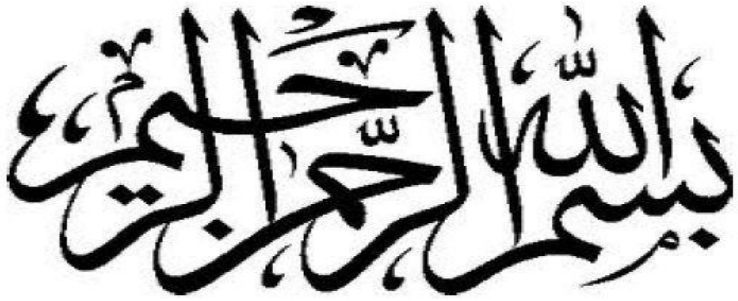
.

Présentée par : ***EL ASRI Najat***

Soutenue le 09 décembre 2023 devant le jury :

Nom et prénom	Etablissement	Grade	Qualité
Pr KARIM Mohammed	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Président
Pr ABABOU Yahya	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Rapporteur
Pr LAHLAOUTI Mohammed Lhassane	Faculté des Sciences, Tétouan	PES	Rapporteur
Pr SADOUNE Zouhair	Faculté des Sciences, Kénitra	PH	Rapporteur
Pr DADOUCH Ahmed	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Examinateur
Pr EL HAJJAJI Otman	Faculté des Sciences, Tétouan	PES	Examinateur
Pr CHAKIR El Mahjoub	Faculté des Sciences, Kénitra	PES	Examinateur
Pr MHARZI Mohamed	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Invité
Pr TAJMOUATI Jaouad	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Invité
Pr MAGHNOUJ Abdelmajid	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	PES	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2023-2024



« Quand on va étudier l'intelligence des autres, ce n'est pas seulement pour abandonner la sienne, mais la multiplier indéfiniment, fort de cet apport de l'autre ». Jean-Marie Adiaffi (1951-1999), écrivain ivoirien.

« Celui qui apprend quelque chose de moi enrichit son savoir sans réduire le mien, tout comme celui qui allume sa chandelle à la mienne se donne de la lumière sans me plonger dans l'obscurité ». Thomas Jefferson (1743-1826), troisième président des États-Unis, servant de 1801 à 1809.

« Un bâtiment doit assurer, sans aucune consommation d'énergie, un confort au moins équivalent à celui régnant à l'extérieur ». (Chatelet et al., 1998)

Dédicace

Je dédie le fruit de ce travail, en premier lieu, à mes chers parents, dont les sacrifices incessants et les prières infaillibles m'ont porté tout au long de cette aventure académique ainsi que toute ma vie.

À mon dévoué époux, dont le soutien indéfectible et les sacrifices personnels ont pavé la voie de l'achèvement de ce travail, je dédie également cette œuvre. Son amour et sa compréhension m'ont été un réconfort constant, m'offrant la sérénité nécessaire pour me consacrer pleinement à ma recherche.

À mes joyeux petits anges, Lina et Nada, qui ont égayé mes journées de leur sourire lumineux et m'ont offert des moments précieux de détente et d'amour, je dédie également ces pages.

Je dédie également cette thèse à mes beaux-parents, dont les prières et les encouragements ont renforcé mon endurance et ma détermination.

À mon frère et mes sœurs, dont la présence bienveillante et le soutien indéfectible m'ont été d'un grand secours tout au long de ce parcours.

Enfin, à l'ensemble de ma famille, amis et collègues, qui ont enrichi ce voyage de leur soutien, leur amitié et leur solidarité, je dédie également cette œuvre.

Cette thèse est le fruit de l'amour, du sacrifice, de l'endurance et de l'encouragement de tous ces êtres précieux, et à travers ces pages, je souhaite leur exprimer mon affection profonde et ma gratitude éternelle.

Remerciements

En ce moment décisif marquant la conclusion de mon travail de recherche, je souhaite exprimer ma gratitude immense envers chaque individu qui a joué un rôle clé dans la réalisation de cette thèse et qui a soutenu mon parcours académique.

Avant toute chose, il est de mon devoir d'exprimer ma reconnaissance infinie envers le Très-Haut, Allah, qui m'a doté de la force nécessaire pour affronter et surmonter les obstacles, m'a conféré le courage de dépasser les difficultés rencontrées, et m'a accordé la grâce d'entreprendre et d'accomplir ce travail.

Je souhaite également manifester ma gratitude la plus sincère à mes directeurs de thèse, le professeur Mohamed Mharzi et le professeur Abdelmajid Maghnouj. Leur soutien constant et inébranlable a été un pilier fondamental tout au long de cette aventure de recherche.

Je suis particulièrement reconnaissant envers le Professeur Mohamed Mharzi, mon premier directeur de thèse, dont l'accompagnement, la patience et les conseils avisés ont grandement contribué à l'élaboration de ce travail. Je vous remercie d'avoir cru en mon potentiel dès le premier entretien de sélection et de m'avoir accordé votre confiance. Votre soutien moral a été un baume, et votre guidance m'a permis de mieux comprendre la noblesse de la profession de chercheur. Je vous suis également reconnaissant de m'avoir mis en relation avec le Professeur Abdelmajid Maghnouj.

Mes remerciements s'adressent également au Professeur Abdelmajid Maghnouj, mon actuel directeur de thèse, qui a accepté de poursuivre cet élan après le départ à la retraite du Professeur Mohamed Mharzi. Votre foi en moi et votre soutien, tant sur le plan moral que technique, ont été une source immense de réconfort. Votre vision critique et vos observations pertinentes, conjuguées à votre soutien indéfectible, m'ont conféré la force indispensable pour progresser et achever les dernières phases de mon itinéraire académique. Un grand merci pour tout.

Mes remerciements s'adressent également aux membres distingués du jury dont l'expertise approfondie et l'évaluation exhaustive ont grandement enrichir ce travail.

Un remerciement particulier est adressé au Professeur Mohammed Karim, le président du jury, offrant ainsi sa sagesse et son expérience à ce moment clé de mon parcours académique.

Je tiens à remercier chaleureusement les rapporteurs, le Professeur Yahya Ababou de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah et le Professeur Mohammed Lhassane Lhlaouti de l'Université Abdelmalek Essaâdi, ainsi que le Professeur Zouhair Sadoune de l'Université Ibn Tofail, pour leur temps et leur expertise qu'ils ont consacré à l'évaluation de mon travail.

Je suis également reconnaissante envers le Professeur Ahmed Dadouch de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, le Professeur Otman El Hajjaji de l'Université Abdelmalek Essaâdi, et le Professeur Chakir El Mahjoub de l'Université Université Ibn Tofail, les examinateurs de cette thèse. Leur regard critique et leur évaluation approfondie ont apporté, une valeur ajoutée significative à mon travail de recherche.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Jaouad Tajmouati, invité de l'USMBA, dont le soutien indéfectible et les conseils avisés ont été d'une valeur inestimable lors de ce jalon important de mon parcours académique. Sa capacité à valoriser mon travail et à m'orienter avec perspicacité a grandement contribué à l'enrichissement et à la réussite de ma soutenance. Sa présence et son engagement envers mon développement académique resteront toujours pour moi une source d'inspiration et de reconnaissance.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers le Directeur du Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales (STSM), le Professeur El Mestafa El Hadrami ; le Directeur de la Formation Doctorale : Sciences de Matériaux et Procédés Industriels (SMPI), le Professeur Mohammed Lachkar ; ainsi qu'aux Directeurs des Laboratoires : le Laboratoire d'Ingénierie, Modélisation et Analyse des Systèmes (LIMAS), le Professeur Mouhcine Sfaira et le Laboratoire de Physique du Solide (LPS), le Professeur Abdellah Rezzouk ; de m'avoir accueilli dans leurs entités durant ces années dédiées à ma thèse.

Je suis également reconnaissant envers les professionnels et experts dont la participation a significativement enrichi ce travail.

Je n'oublie pas mes co-auteurs, dont la collaboration et l'entente ont engendré un environnement de travail propice et stimulant. Mon appréciation se dirige également vers tous les chercheurs dont les travaux et publications ont constitué une base solide et inspirante pour ma recherche, m'offrant l'opportunité de rejoindre leur communauté érudite.

Enfin, mes pensées reconnaissantes vont vers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur pierre à l'édifice de ce travail.

Chaque mot et chaque phrase sont chargés de gratitude et d’appréciation, traduisant mon profond respect et mon affection envers chacun d'entre vous.

Résumé :

Cette recherche se concentre sur l'optimisation de l'efficacité énergétique des bâtiments publics au Maroc, en adoptant une approche multidisciplinaire. Elle examine de manière approfondie l'intégration de l'efficacité énergétique dans le mécanisme de la maîtrise d'ouvrage déléguée, un mécanisme clé dans le développement des projets de construction publique marocains. Grâce à des entretiens réalisés avec 17 experts du secteur du bâtiment, l'étude a permis de modéliser le mécanisme étudié, et d'identifier les actions et étapes clés pour améliorer la performance énergétique dans ce genre de bâtiment.

L'analyse de la performance énergétique des bâtiments publics et de leur conformité avec le Règlement Thermique de Construction Marocain (RTCM) a été effectuée à travers 126 simulations thermiques dynamiques, tenant compte des six zones thermiques du Maroc et de trois cas de Taux Global des Baies Vitrées (TGBV). Ces analyses ont permis d'identifier l'approche la plus optimale et les éléments de l'enveloppe du bâtiment ayant le plus d'impact, tant positivement que négativement, proposant ainsi des pistes d'amélioration pour le RTCM. La recherche a également introduit un modèle alternatif pour prédire la charge thermique des bâtiments, en utilisant des méthodes de régression polynomiale du premier et du second ordre, simplifiant ainsi la prédiction des charges thermiques et réduisant la nécessité de simulations répétitives.

Au niveau managérial, cette thèse préconise une mise en œuvre axée sur les actions d'amélioration les plus impactantes. Elle souligne l'importance de se concentrer sur des phases et des catégories déterminantes pour une gestion efficace. D'un point de vue réglementaire, elle suggère une révision des exigences de l'Approche Prescriptive (A-Pres) au profit d'une approche axée sur la performance, et recommande un renforcement du contrôle de la mise en œuvre du RTCM. Sur le plan technique, la thèse conseille une réévaluation des méthodes de calcul énergétique utilisées dans les études techniques, en intégrant le nouveau modèle de prédiction développé par cette recherche.

Mots clés :

Efficacité énergétique - Bâtiment public - Marché public - Maîtrise d'ouvrage déléguée - Politique énergétique - Réglementation thermique - Simulation - Modèles de substitution - Prédiction énergétique

Abstract:

This research focuses on optimizing the energy efficiency of public buildings in Morocco, adopting a multidisciplinary approach. It examines in depth the integration of energy efficiency in the delegated project management mechanism, a key mechanism in the development of Moroccan public construction projects. Through interviews with 17 experts in the building sector, the study allowed to model the mechanism studied, and to identify key actions and steps to improve energy performance in this type of building.

The analysis of the energy performance of public buildings and their compliance with the Moroccan Thermal Construction Regulation (RTCM) was carried out through 126 dynamic thermal simulations, taking into account the six thermal zones of Morocco and three cases of Global Bay Window Rate (TGBV). These analyses made it possible to identify the most optimal approach and the elements of the building envelope that have the most impact, both positively and negatively, thus offering avenues for improvement for the RTCM. The research also introduced an alternative model to predict the thermal load of buildings, using first- and second-order polynomial regression methods, simplifying the prediction of thermal loads and reducing the need for repetitive simulations.

At the managerial level, this thesis advocates an implementation focused on the most impactful improvement actions. It stresses the importance of focusing on key phases and categories for effective management. From a regulatory point of view, it suggests a revision of the requirements of the Prescriptive Approach (A-Pres) in favour of a performance-based approach, and recommends a strengthening of the control of the implementation of the RTCM. On a technical level, the thesis recommends a re-evaluation of the energy calculation methods used in technical studies, by integrating the new prediction model developed by this research.

Keywords :

Energy Efficiency - Public Building - Public Procurement - Delegated Project Management - Energy Policy - Thermal Regulation - Simulation - Substitution Models - Energy Prediction.

ملخص:

تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة النجاعة الطاقية في المباني العمومية في المغرب من خلال اعتماد مقاربة متعددة التخصصات. وتسلط الضوء على إدماج النجاعة الطاقية في آلية الإشراف المنتدب، وهي الوسيلة الرئيسية لإنجاز مشاريع المباني العمومية في المغرب. من خلال المقابلات مع 17 خبيرًا في قطاع البناء، سمحت الدراسة بنمذجة الآلية المدروسة، وتحديد الإجراءات والخطوات الأولوية لتحسين الأداء الطاقي في هذا النوع من المباني.

تتناول الأطروحة أيضًا الأداء الطاقي في المباني العمومية وامتثال هذه المباني للنصوص التنظيمية من خلال 126 عملية محاكاة حرارية ديناميكية، مع مراعاة المناطق الحرارية الست في المغرب وثلاث حالات من المعدلات الإجمالية للفتحات الزجاجية (TGBV) وقد مكنت هذه التحليلات من تحديد النهج الأمثل وعناصر غلاف المبنى الأكثر تأثيرا، سواء بشكل إيجابي أو سلبي، مما سمح باقتراح طرق لتحسين التنظيم. قدم البحث أيضًا نموذجًا بديلاً للتنبؤ بالاحتياجات الحرارية للمباني، باستخدام طرق الانحدار الخطي من الدرجة الأولى والثانية، مما يسمح بالتنبؤ بالاحتياجات الحرارية وتجنب المحاكاة المتكررة.

تعالج الدراسة جوانب مختلفة للنجاعة الطاقية في المباني العمومية في المغرب، على المستوى الإداري، تدعو هذه الأطروحة إلى التركيز على إجراءات التحسين الأكثر تأثيرًا. ويشدد على أهمية المراحل والفئات الرئيسية. ومن وجهة نظر تنظيمية، يقترح تنقيح متطلبات النهج التوجيهي (A-Pres) لصالح نهج قائم على الأداء، ويوصي بتعزيز الرقابة على تنفيذ التنظيم. على المستوى التقني، توصي الأطروحة بإعادة تقييم طرق حساب الاحتياجات الحرارية من خلال دمج نموذج التنبؤ الذي طوره هذا البحث.

الكلمات الرئيسية:

النجاعة الطاقية، المباني العمومية، الصفقات العمومية، الإشرف المنتدب، السياسة الطاقية، التنظيم الحراري، الأداء الطاقي، المحاكاة الحرارية، نماذج الاستبدال، التنبؤ الطاقي

Publications scientifiques

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire d'Ingénierie, Modélisation et Analyse des Systèmes (LIMAS) et le Laboratoire Physique du Solide (LPS), sous la direction de Monsieur Mohammed Mharzi et Monsieur Abdelmajid Maghnouj, Professeurs de l'Enseignement supérieur.

Les recherches liées à ce travail ont donné lieu aux publications et communications suivantes :

Articles dans une revue internationale indexées

Titre: "Moroccan Public Buildings and the RTCM: Insights into Compliance, Energy Performance, and Regulation Improvement"

> Réference : **Najat El Asri**, Nawal Abdou, Mohammed Mharzi, Abdelmajid Maghnouj, Energies, 2023, vol. 16, no 18, p. 6496. le 08 septembre 2023, https://doi.org/10.3390/en16186496, **(IF: 3.2)**

Titre: "The policy of energy management in public buildings procurements through the study of the process of delegated project management - Case of Morocco"

> Référence : **Najat El Asri**, Youness Nouira, Ibtissam Maaroufi, Abdelghafour Marfak, Nour Saleh, Mohammed Mharzi, Energy Policy, Volume 165, 112944, le 28 avril 2022, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112944, **(IF:9)**

Titre: "Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco",

> Référence : Nawal Abdou, Youness El Mghouchi, Said Hamdaoui, **Najat EL Asri**, Mhamed Mouqallid, Building and environment, 2021, vol. 204, p. 108141, le 15 Octobre 2021, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108141, **(IF:7.4)**

Communication dans un congrès international :

- Prediction of Thermal Load of a Public Building Using Polynomial Regression Method, Communication orale, BVD'23 "Bâtiments et Villes Durables" organisés par USMBA-Fès, UMI-Meknès et UPF (Fès), le 11-12 mai 2023 - à l'Université Privée de Fès et FSDM

Communications dans une journée nationale :

- Communication orale ; « La Maîtrise de l'Efficacité Énergétique dans les Projets des Bâtiments Publics » à la Journée Scientifique de l'Efficacité Energétique en Bâtiment (JSEEB'19), le 23 février 2019, Settat, Maroc
- Communication Poster : « Analyses thermiques des fenêtres intelligentes sous les conditions météorologiques de Fez. » à la Journée Scientifique de l'Efficacité Energétique en Bâtiment (JSEEB'19), le 23 février 2019, Settat, Maroc.

Table des matières

1. Introduction Générale 1
1.1. Contexte et Justification de l'Étude 1
1.2. Problématique 2
1.3. Objectifs de la Thèse 2
1.4. Méthodologie Générale 3
2. Structure de la Thèse 4
Chapitre I : Cadre Stratégique, Réglementaire et Technique de l'Efficacité Énergétique dans le Bâtiment public au Maroc 5
Introduction du chapitre 6
I.1. Aperçu de l'efficacité énergétique 6
I.1.1. Efficacité énergétique et développement durable 6
I.1.2. Défis et Opportunités de l'Efficacité Énergétique au Maroc 7
I.2. Analyse de la situation énergétique dans le bâtiment 8
I.2.1. Revue de la littérature 8
I.2.2. Situation internationale 10
I.2.3. Potentiel d'économies d'énergie dans le secteur du bâtiment 11
I.2.4. Situation nationale 12
I.2.4.1. Évolution de la consommation du Maroc 13
I.2.4.2. Dépendance énergétique du Maroc en Chiffres 13
I.3. Cadre stratégique 14
I.3.1. Transition Énergétique au Maroc 14
I.3.2. Stratégie énergétique nationale 15
I.3.3. Plan d'action du Maroc 16
I.3.4. Base de données des politiques marocaines 17
I.4. Cadre institutionnel de l'efficacité énergétique dans les bâtiments publics au Maroc 18
I.4.1. Ministères et agences 18
I.4.1.1. Ministère de l'Energie, des Mines et du Développement Durable (MEMDD) 18
I.4.1.2. Ministère de l'Economie et des Finances (MEF) 19
I.4.1.3. Secrétariat Général du Gouvernement 19
I.4.1.4. Ministère des Affaires Générales et de la Gouvernance (MAGG) 19
I.4.1.5. L'Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique (AMEE) 19
I.4.1.6. La Maîtrise d'Ouvrage Déléguée de projets (MOD) 20
I.4.2. Acteurs institutionnels de financement 21
I.4.2.1. La Société d'Ingénierie Energétique (SIE) 21
I.4.2.2. Moroccan Agency for Sustainable Energy (MASEN) 21

I.4.3. Caisse de Dépôt et de Gestion 21
I.4.3.1. CDG-Développement 21
I.4.3.2. Finéa 21
I.4.3.3. Fonds d'équipement Communal (FEC) 22
I.4.4. Distributeurs d'énergie 22
I.5. Cadre réglementaire de l'Efficacité Énergétique au Maroc 22
I.5.1. Programme national de code d'efficacité énergétique dans le bâtiment 22
I.5.2. Loi sur l'efficacité énergétique 23
I.6. Règlement Général de Construction relatif aux Performances Énergétique (RGCPE) 23
I.6.1. Présentation du RGCPE 23
I.6.2. Historique de l'application du RGCPE 24
I.6.3. Impact énergétique et économique du RGCPE 24
I.6.4. Outils informatiques d'aide pour l'application du RGCPE 25
I.6.5. Initiatives de Promotion de l'Efficacité Énergétique au Maroc 25
I.7. Cadre technique et managérial de l'Efficacité Énergétique dans le bâtiment 25
I.7.1. Définition des caractéristiques du bâtiment 26
I.7.1.1. Enveloppe du bâtiment 26
I.7.1.2. Bâtiment passif 26
I.7.1.3. Performance énergétique d'un bâtiment 26
I.7.1.4. Inertie thermique d'un bâtiment 26
I.7.1.5. Temps de déphasage 27
I.7.1.6. Conductivité thermique λ 27
I.7.1.7. Diffusivité thermique 27
I.7.1.8. Capacité thermique massique 27
I.7.1.9. Capacité thermique volumique 28
I.7.1.10. Effusivité thermique 28
I.7.1.11. Coefficient de transmission thermique U ou conductance thermique 28
I.7.1.12. Besoin en énergie de chauffage ou de climatisation 28
I.7.1.13. Facteur solaire 28
I.7.1.14. Le diagramme GIVONI 28
I.7.2. Confort thermique dans le bâtiment 30
I.7.2.1. Confort et température 30
I.7.2.2. Confort et humidité relative 31
I.7.2.3. Plage de confort 33
I.7.2.4. Confort et vitesse de l'air 33
I.7.2.5. Condition hivernale 34

I.7.2.6. Conditions estivales 34
I.7.2.7. Confort, activité métabolique et habillement 36
I.7.3. Les solutions techniques 37
I.7.3.1. Solutions passives 37
I.7.3.2. Solutions actives 43
I.7.4. Solutions managériales 46
I.7.4.1. Mesures d'accompagnement pour la mise en œuvre 46
I.7.4.2. Sensibilisation 47
I.7.4.3. Comportement de l'utilisateur et solutions quick wins 47
Conclusion du chapitre 48
Références du chapitre 48
Chapitre II : La maîtrise de l'énergie dans les bâtiments publics à travers l'analyse du mécanisme de la maîtrise d'ouvrage déléguée au Maroc. 52
Introduction du chapitre 53
II.1. Revue de la littérature 53
II.1.1. Aperçu de la consommation d'énergie des bâtiments publics 53
II.1.2. Place de l'Efficacité Énergétique dans les Bâtiments Publics au Maroc : Enjeux et Perspectives 54
II.1.3. Efficacité énergétique à l'aide d'approches managériales et organisationnelles 55
II.2. Méthodologie 58
II.2.1. Justification de l'étude de cas 58
II.2.2. Collecte des données 59
II.2.2.1. Approche de la collecte des données 59
II.2.2.2. Guide d'entretien 59
II.2.2.3. Échantillonnage 60
II.2.3. Analyse des données 60
II.2.4. Modèle de processus d'affaires pour la construction de BP 61
II.3. Résultats et analyse 61
II.3.1. Historique des participants 61
II.3.2. Modèle de processus 61
II.3.3. Actions proposées par les experts et leurs citations 62
II.3.4. Regroupement des actions en fonction du nombre de citations 78
II.3.5. Regroupement qualitatif des actions 79
II.3.6. Regroupement des actions selon les phases du processus MOD 81
II.4. Discussion 82
II.4.1. Actions d'amélioration prioritaires 82

II.4.2. Phases et catégories prioritaires du processus MOD 83
II.4.3. Actions d'accompagnement à la mise en œuvre des actions EE 85
II.4.3.1. Présentation de l'approche : 85
II.4.3.2. Désignation d'une équipe dédiée au contrôle de l'efficacité énergétique 85
II.4.3.3. Formation et sensibilisation 86
II.4.3.4. Acquisition et développement de logiciels 86
Conclusion du chapitre 86
Références du chapitre 87
Chapitre III : Analyse de la Conformité et de l'Efficacité Énergétique des Bâtiments Publics Marocains Selon la RTCM 92
Introduction du chapitre 93
III.1. Revue de la littérature 94
III.1.1. Implications politiques pour l'amélioration de l'efficacité énergétique 94
III.1.2. Efficacité énergétique des bâtiments au Maroc 95
III.2. Nouveauté et contribution à la recherche 96
III.3. Matériels et méthodes 97
III.3.1. Méthode adoptée 97
III.3.2. Définition de la composition conventionnelle de l'enveloppe des BP 98
III.3.3. Evaluation de la conformité énergétique de la composition conventionnelle de l'enveloppe 98
III.3.4. Mise en conformité de la composition conventionnelle de l'enveloppe selon l'A-Pres 99
III.3.4.1. Mise en conformité des parois opaques 100
III.3.4.2. Critères de choix de l'isolant 100
III.3.4.3. Démarche de mise en conformité par l'isolant choisi 100
III.3.4.4. Mise en conformité des parois vitrées 100
III.3.4.5. Impact de l'A-Pres et identification des éléments influents 100
III.4. Résultats et analyses 101
III.4.1. Prescription technique de l'enveloppe 101
III.4.2. Conformité du bâtiment conventionnel selon l'A-Pres 103
III.4.3. Conformité du bâtiment conventionnel selon l'A-perf 105
III.4.4. Mise en conformité du bâtiment conventionnel selon l'A-Pres 108
III.4.4.1. Choix de l'isolation des parois opaques 108
III.4.4.2. Choix des parois vitrés 109
III.4.5. Impacts des résultats dans les 6 zones 109
III.4.5.1. Impact énergétique du respect de l'A-Pres 109

III.4.5.2. Impact de la rénovation de chaque élément de l'enveloppe sur la consommation d'énergie pour 3 cas de TGBV ... 111
III.4.6. Comparaison entre les zones ... 117
III.4.7. Comparaison avec un climat plus froid ... 118
III.5. Discussion ... 120
III.5.1. Comparaison de nos résultats avec la littérature ... 120
III.5.2. Comparaison de nos résultats avec les prévisions du RTCM ... 120
III.5.3. Comparaison entre les deux approches RTCM ... 121
III.5.4. Amélioration de l'efficacité énergétique dans le RTCM ... 122
Conclusion du chapitre ... 123
Références du chapitre ... 124
Chapitre IV : Prédiction de la Charge Thermique du Bâtiment public en utilisant la Méthode de Régression Polynomiale ... 127
Introduction du chapitre ... 128
IV.1. Méthodologie ... 128
IV.1.1. Définition des paramètres et leurs intervalles de variations ... 129
IV.1.2. Réalisation des simulations pour avoir des données pour entrainer les modèles. 130
IV.1.2.1. Échantillonnage hypercube latin (LHS) ... 130
IV.1.2.2. Outil de Modélisation 3D : SketchUp ... 137
IV.1.2.3. Outil de simulation : TRNSYS ... 138
IV.1.2.4. Charges de chauffage (QH) et climatisation (QC) ... 139
IV.1.3. Définition et entrainement des modèles ... 141
IV.2. Résultats et discussion ... 143
IV.2.1. Modèles linéaires ... 143
IV.2.2. Modèles quadratiques ... 149
Conclusion du chapitre ... 153
Références du chapitre ... 153
Conclusion Générale ... 155
Annexes ... 157
Annexe n° 1 : Carte du zonage thermique du Maroc ... 157
Annexe n° 2 : Besoins spécifiques annuels de chauffage et de climatisation, en kWh/m^2/an- Secteur tertiaire ... 158
Annexe n° 3 : Coefficients maximaux de transmission thermique (U en W/m^2.K) - Secteur tertiaire ... 159
Annexe n° 4 : Guide d'entretien ... 160
Annexe n° 5 : Détails des données utilisées pour entrainer et évaluer les modèles ... 165

Liste des figures

Figure I.1. Dimensions du développement durable 7
Figure I.2. Investissements mondiaux dans les énergies propres et les combustibles fossiles (2015-2023) 11
Figure I. 3. Structure du potentiel d'efficacité énergétique dans la région de la Méditerranée du sud sur la période 2010- 2030, AMEE 12
Figure I. 4.Consommation d'énergie au Maroc par secteur, AMEE 13
Figure I. 5. Schéma de synthèse des objectifs de la stratégie énergétique du Maroc, le matin n°3835 du 06 décembre 2015. 16
Figure I. 6. Plan d'action sectoriel de la stratégie nationale de l'efficacité énergétique, Source : Stratégie Nationale d'Efficacité Energétique à horizon 2030, AMEE. 16
Figure I. 7. Plan d'action sectoriel de la stratégie nationale de l'efficacité énergétique – secteur du bâtiment. Source : Stratégie Nationale d'Efficacité Energétique à horizon 2030, AMEE. 17
Figure I.8. Diagramme de GIVONI 29
Figure I. 9. Production de la chaleur dans le corps humain 31
Figure I. 10. La croissance microbienne en fonction de l'humidité 32
Figure I. 11. Le Polygone de confort hygrothermique. 33
Figure I. 12. Température opérative idéale en fonction de l'habillement et de l'activité. 36
Figure I. 13. Exemple de diagramme solaire de la ville de rabat 38
Figure I. 14. Principe de l'orientation du bâtiment - source : agence des énergies renouvelables et efficacité énergétique 39
Figure I. 15.. Principe de répartition des espaces. 39
Figure I. 16. La transmission solaire à travers les ouvertures 43
Figure I. 17. Étiquette-énergie 44
Figure I. 18. Affiche de sensibilisation 47
Figure II. 1. Les enjeux de la sélection des BP 58
Figure II. 2. Macro-modèle de processus 62
Figure II. 3. Bilan des citations des actions 63
Figure II. 4. Score de citation des actions d'amélioration 78
Figure II. 5. Regroupement qualitatif des actions 80
Figure II. 6. Bilan des citations global toute action confondue par phase 81
Figure III. 1. Méthodologie de travail. 97
Figure III. 2. Options du logiciel DesignBuilder 98
Figure III. 3. Briques. (a) Briques Creuses. (b) Agglos creux 101
Figure III. 4. Plancher à poutrelles 101
Figure III. 5. Composition et caractéristiques des parois opaques 103
Figure III. 6. Plan du rez-de-chaussée 106
Figure III. 7. Plan du 1er étage 106
Figure III. 8.Vue de face en 3D 107
Figure III. 9.Vue d'arrière en 3D 107
Figure III. 10. Répartition des Besoins thermiques du bâtiment conventionnel 108
Figure III. 11. Impact de la mise en conformité selon l'A-Pres 111
Figure III. 12. Résumé de la variation de l'énergie en fonction du TGBV. 115
Figure III. 13. BERef et BECh de notre étude de cas, TGBV = 15%. 116
Figure III. 14. Variation comparative de l'énergie entre les zones 118

Figure III. 15. Variations de la BECth en fonction de la composante conforme pour les six zones et à Berlin. 119
Figure III. 16. Variation annuelle de la température du sol dans les six zones marocaines et à Berlin, Source : RETScreen. 119
Figure IV. 1. Méthodologie pour obtenir les métamodèles, detaillée dans l'annexe n°5 129
Figure IV. 2. LHS méthode 131
Figure IV. 3. Échantillonnage LHS des Xi pour notre étude 132
Figure IV. 4. Exemple d'échantillonnage aléatoire simple 133
Figure IV. 5. Matrice de Corrélation de Spearman 136
Figure IV. 6. Matrice de corrélation de Kendall 137
Figure IV. 7. Modèle 3D pour la simulation. 138
Figure IV. 8. Modèle de simulation sur TRNSYS 139
Figure IV. 9. Charge de Chauffage (QH) et charge de climatisation (QC) 140
Figure IV. 10. Histogrammes de QH et QC 140
Figure IV. 11. Sensibilité des paramètres du modèle de chauffage (L1 QH) 145
Figure IV. 12. Sensibilité des paramètres du modèle linéaire (L1QC) 146
Figure IV. 13. Phase d'entrainement du model L1QH 147
Figure IV. 14. Phase du test du model L1QH 147
Figure IV. 15. Phase d'entrainement du model L1QC 148
Figure IV. 16. Phase de test du model L1QC 148
Figure IV. 17. Phase d'entrainement du model L2QH 151
Figure IV. 18. Phase de test du model L2QH 151
Figure IV. 19. Phase d'entrainement du model L2QC 152
Figure IV. 20. Phase de test du model L2QC 152

Liste des tableaux

Tableau I.1. Base de données des politiques marocaines. AIE, 2023 17
Tableau I. 2. Le confort lié à la vitesse de l'air – condition hivernale 34
Tableau I. 3.Le refroidissement lié à la vitesse de l'air – conditions estivales 35
Tableau I. 4.Force du vent à l'échelle Beaufort 35
Tableau I. 5. Choix de l'isolant en fonction de la paroi, source : les fiches produites du guide de l'isolation 41
Tableau I. 6. Propriétés des matériaux d'isolation les plus utilisés au Maroc, source : Guide de l'isolation 42
Tableau I. 7. Puissance des lampes 44
Tableau II. 1. Profil des répondants 64
Tableau II. 2. Modélisation du processus MOD des équipements publics 65
Tableau II. 3. Synthèse des actions et politiques d'amélioration, explication, index des experts et ratio d'occurrence 69
Tableau II. 4. Résumé des politiques et actions d'amélioration 74
Tableau II. 5. Les actions d'amélioration les plus citées – Intervalle [10-7.5[. 78
Tableau II. 6. Catégories d'actions d'amélioration 79
Tableau II. 7. Actions prioritaires 82
Tableau III. 1. Besoins thermiques spécifiques annuels maximums pour le chauffage et le refroidissement dans le secteur tertiaire en kWh/m^2.an. Source : RTCM 99
Tableau III. 2. Composition typique des parois 102
Tableau III. 3. Conformité de l'enveloppe conventionnelle par zone climatique au Maroc selon l'A-Pres, (Source : Évaluation personnelle) 104
Tableau III. 4. Conformité du bâtiment conventionnel selon l'A-Perf 108
Tableau III. 5. Épaisseurs exigées par l'A-Pres pour les isolants thermiques 109
Tableau III. 6. Coût d'isolation du bâtiment selon l'isolant 109
Tableau III. 7. Caractéristiques des vitres, Source Saint Gobain Glass 109
Tableau III. 8. Impact de l'A-Pres sur les besoins thermiques 110
Tableau III. 9. Résumé des résultats de conformité pour différentes zones climatiques. 116
Tableau III. 10. Comparaison entre les indications du RTCM et les résultats de cette étude de cas. .. 121
Tableau IV.1. Paramètres du bâtiment retenu pour l'étude 130
Tableau IV. 2. Résultats des simulations obtenus sur TRNSYS : QH et QC 140
Tableau IV. 3. Coefficients des modèles linéaires pour le chauffage et climatisation 144
Tableau IV. 4. Évaluation de la précision des modèles linéaires 148
Tableau IV. 5. Coefficients du modèle quadratique pour le chauffage 150
Tableau IV. 6. Coefficients du modèle quadratique pour la climatisation 150
Tableau IV. 7. Évaluation de la précision des modèles quadratiques 152

Liste des abréviations

A-Perf *: Approche performantielle*

A-Pres *: Approche prescriptive*

AIE *: Agence internationale de l'énergie*

BECh *: Demande annuelle d'énergie de chauffage (kWh/an)*

BECth *: Demande annuelle d'énergie pour le confort thermique (kWh/m2/an)*

BEER *: Rénovation énergétique des bâtiments*

BERef *: Demande annuelle d'énergie de refroidissement (kWh/an)*

BET *: Bureaux d'études*

BCT *: Bureaux de contrôle*

BP *: Bâtiments publics*

COP *: Coefficient de Performance*

CPS *: Cahier des prescriptions spéciales*

CPT *: Cahier des prescriptions techniques*

DAO *: Dossier d'appel d'offres*

EE *: Efficacité énergétique*

EER *: Energy Efficiency Ratio*

EPBD *: Directive sur la performance énergétique des bâtiments*

EPC *: Contrat de performance énergétique*

ER *: Energie Renouvelable*

Fs *: Facteur solaire*

Fs* *: Facteur d'équivalence solaire*

GES *: Gaz à effet de serre*

KPi *: Indicateur clé de performance*

L1QC *: Modèle de prédiction linéaire pour la charge de climatisation*

L1QH *: Modèle de prédiction linéaire pour la charge de chauffage*

L2QC *: Modèle de prédiction quadratique pour la charge de climatisation*

L2QH *: Modèle de prédiction quadratique pour la charge de chauffage*

LAB *: Laboratoire d'essais*

MAD *: Dirham marocain*

MOD *: Maitrise d'Ouvrage déléguée*

MO *: Maitre d'ouvrage*

***PEA** : Pacte d'exemplarité de l'administration*

***PIB** : Produit intérieur brut*

***QC** : Charge de climatisation*

***QH** : Charge de chauffage*

***RC** : Règlement de consultation*

***RGCPE** : Règlement général de la construction sur la performance énergétique*

***RTCM** : Réglementation thermique des constructions au Maroc*

***SNE** : Stratégie nationale de l'énergie*

***TGBV** : Taux global de baies vitrées*

***UE** : Union européenne*

***UK** : Royaume-Uni*

1. Introduction Générale

1.1. Contexte et Justification de l'Étude

Les secteurs du bâtiment et de la construction sont responsables de plus d'un tiers de la consommation finale d'énergie, ainsi que de près de 40 % des émissions totales de CO_2 (**AIE, 2021**). L'augmentation de la demande en énergie à l'échelle mondiale découle de la croissance démographique, de l'industrialisation et de l'urbanisation croissante (**El Iysaouy et al., 2019**). Les bâtiments constituent un élément central de la vie sociale, où les individus passent une part significative de leur temps et consomment une quantité considérable d'énergie (**Ruiz et al., 2017**). Par conséquent, l'efficacité énergétique des bâtiments représente un objectif primordial au niveau des politiques énergétiques, que ce soit à l'échelle régionale, nationale ou internationale (**Pan et Garmston, 2012 ; Zhao et al., 2012**).

La Commission européenne souligne que le phénomène de consommation énergétique élevée et d'inefficacité énergétique dans les bâtiments publics est répandu, indiquant ainsi un potentiel d'économie d'énergie considérable. Par conséquent, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments publics est devenue une stratégie cruciale à l'échelle nationale et internationale, favorisant des bâtiments respectueux de l'environnement, ainsi qu'une réduction conséquente de la consommation d'énergie et des émissions de gaz associées, avec les économies qui en résultent (**Garcia et al., 2016 ; Ruiz et al., 2017**).

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments publics s'inscrit désormais au cœur des politiques énergétiques, étant donné que ces édifices constituent une part importante du parc immobilier et que les coûts énergétiques annuels qui y sont associés sont considérables. Dans cette optique, il est impératif de maîtriser l'efficacité énergétique des bâtiments publics au moyen d'approches rigoureuses pour relever les défis énergétiques auxquels le Maroc est confronté. En tant que pays en développement, le Maroc connaît une expansion rapide de ses infrastructures publiques pour répondre à l'augmentation constante des besoins de sa population. Les écoles, hôpitaux, administrations et centres culturels sont au cœur de cette dynamique, assurant la fourniture de services publics essentiels à la société.

Toutefois, cette expansion s'accompagne d'une consommation énergétique considérable, constituant ainsi un défi majeur dans la quête d'un avenir plus durable.

L'importance de cette problématique est renforcée au Maroc du fait de sa dépendance énergétique. En effet, le Maroc importe une grande partie de son énergie, le rendant particulièrement vulnérable aux fluctuations des prix sur les marchés internationaux. Cette dépendance souligne la nécessité impérieuse de développer des stratégies visant à réduire la consommation énergétique, en particulier dans des secteurs clés tels que le bâtiment et la construction.

Les bâtiments publics, en tant qu'éléments centraux de l'infrastructure sociale et économique, sont appelés à jouer un rôle exemplaire dans cette transition vers une gestion plus responsable de l'énergie. En tant qu'institutions représentatives de l'État, ils ont la responsabilité de montrer la voie en adoptant des pratiques exemplaires en matière d'efficacité énergétique. Leur capacité à mettre en œuvre des mesures efficaces dans ce domaine peut servir d'exemple et inspirer

d'autres secteurs et acteurs, contribuant ainsi de manière significative à la réduction des émissions de CO_2 et à l'atténuation des impacts environnementaux.

En somme, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments publics au Maroc revêt une importance stratégique à plusieurs niveaux. Elle s'inscrit dans une perspective globale de développement durable, tant au niveau national que dans le contexte international. En agissant comme des pionniers en matière d'efficacité énergétique, les bâtiments publics peuvent jouer un rôle catalyseur dans la transition énergétique du pays, contribuant ainsi à la construction d'un avenir plus durable et résilient.

1.2. Problématique

La centralité de cette thèse réside dans la recherche de méthodes novatrices pour optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments publics au Maroc. Cela implique de surmonter les défis inhérents à l'intégration de cette dimension cruciale d'un pont de vue manageriel, règlementaire, et méthodiques. En effet, il est impératif de repenser les pratiques conventionnelles de construction et de gestion des projets publics afin d'intégrer de manière proactive des solutions éco énergétiques.

Les résultats attendus répondront à la question suivante : quelles politiques, méthodes, outils et mécanismes peuvent favoriser une utilisation d'énergie durable dans les bâtiments publics au Maroc ?

1.3. Objectifs de la Thèse

Le principal objectif est de concevoir des méthodes novatrices visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments publics. Cela implique la recherche et le développement de techniques de construction, de rénovation et de gestion intégrant des solutions éco énergétiques. Un aspect crucial de cette approche consiste à étudier le processus de construction des édifices, à savoir la maîtrise d'ouvrage déléguée, évaluer leur performance et vérifier leur conformité aux réglementations thermiques en vigueur. Cela nécessite une évaluation minutieuse des matériaux conventionnels, une analyse des réglementations régissant l'efficacité de ces bâtiments, ainsi qu'une identification des lacunes et des propositions d'améliorations. Il s'agit également d'optimiser les calculs requis pour évaluer leur performance via des prédictions. L'objectif est d'anticiper et évaluer l'efficacité énergétique d'un bâtiment dès sa phase de conception, offrant ainsi une occasion unique d'orienter les choix architecturaux et techniques vers des solutions à haute performance énergétique. Cela contribuera significativement à la réduction de la consommation énergétique des bâtiments publics. Les objectifs de cette thèse se décomposent en plusieurs axes stratégiques visant à révolutionner l'approche énergétique des bâtiments publics au Maroc :

Intégration de l'Efficacité Énergétique dans la Maîtrise d'Ouvrage : Il est essentiel de surmonter les défis liés à l'intégration de l'efficacité énergétique dès les premières phases du processus de maîtrise d'ouvrage déléguée. Cela nécessite une révision des pratiques conventionnelles et l'adoption d'une approche proactive intégrant pleinement les considérations énergétiques.

Analyse de la Conformité aux Règlements Thermiques : Une part cruciale de cette thèse est de réaliser une analyse approfondie pour évaluer la conformité des bâtiments aux normes thermiques en vigueur. Cela implique un examen minutieux des matériaux, des systèmes de chauffage, de ventilation, de climatisation et d'isolation, dans le but de proposer des améliorations concrètes.

Prédiction de Performance Énergétique : Une part significative de cette recherche réside dans la conception et la mise en œuvre d'outils avancés basés sur des modèles et des simulations. Ces outils permettront d'anticiper et d'évaluer la performance énergétique d'un bâtiment dès sa phase de conception, guidant ainsi les choix vers des solutions à haute efficacité énergétique.

En atteignant ces objectifs, cette thèse aspire à influencer positivement la manière dont les bâtiments publics sont conçus, construits et gérés au Maroc, tout en apportant une contribution scientifique significative et sans nécessiter de mesures techniques complexes, mais plutôt avec une approche optimale.

1.4. Méthodologie Générale

La méthodologie adoptée repose sur une approche multidisciplinaire et se décompose en plusieurs étapes clés :

Revue de Littérature et État de l'Art : Cette étape vise à recenser les pratiques et les politiques en matière d'efficacité énergétique dans les bâtiments publics, en mettant l'accent sur les aspects managériaux, réglementaires et méthodologiques.

Réflexion Critique sur les Approches Conventionnelles : Il s'agit d'analyser de manière critique les méthodes classiques de construction et de gestion des projets publics en vue d'intégrer de manière proactive des solutions éco énergétiques.

Modélisation d'un Mécanisme Clé : Cette étape implique l'entretien avec des experts dans le cadre d'une étude statistique qualitative visant à extraire, organiser et prioriser les politiques et actions clés à intégrer dans le processus de la maitrise d'ouvrage déléguée pour maîtriser l'efficacité énergétique de ces bâtiments.

Évaluation de la performance et de la Conformité aux Réglementations Thermiques : Cette phase comprend une évaluation minutieuse de la performance et de la conformité des bâtiments à la réglementation thermique en vigueur. Cela inclut une inspection détaillée des matériaux et les isolants utilisés dans un bâtiment conventionnel.

Analyse des Réglementations et Propositions d'Améliorations : Il s'agit d'analyser la réglementation régissant l'efficacité de ces bâtiments, et d'identifier les lacunes, ainsi que de proposer des améliorations concrètes.

Conception et Mise en Œuvre d'Outils Avancés : Cette étape met l'accent sur la conception et la mise en œuvre d'outils avancés basés sur des modèles et des simulations. Ces outils permettront d'anticiper et d'évaluer la performance énergétique d'un bâtiment dès sa phase de conception, orientant ainsi les choix vers des solutions à haute efficacité énergétique.

L'ensemble de ces étapes vise à révolutionner l'approche énergétique des bâtiments publics au Maroc, avec pour objectif ultime d'influencer positivement la manière dont ils sont conçus, construits et gérés.

2. Structure de la Thèse

Le rapport de thèse commence par un chapitre introductif situant le sujet dans son contexte stratégique, institutionnel, réglementaire et technique. Dans le deuxième chapitre, nous examinons la politique de gestion de l'énergie dans les marchés publics des bâtiments en étudiant le mécanisme de gestion de projet déléguée au Maroc. Nous analysons les défis et les opportunités liés à la mise en œuvre de politiques énergétiques dans les bâtiments publics marocains et proposons des recommandations pour une gestion efficace de l'énergie. Le troisième article se concentre sur la conformité aux réglementations énergétiques dans les bâtiments publics marocains, tout en examinant les performances énergétiques actuelles et les possibilités d'amélioration. Le quatrième article présente une méthode de prédiction des charges thermiques des bâtiments publics au Maroc. Nous utilisons une approche de régression polynomiale pour estimer les charges thermiques en fonction de différents paramètres, ce qui permet d'optimiser les simulations nécessaires aux calculs énergétiques des bâtiments publics.

Dans l'ensemble, cette thèse vise à fournir des solutions pratiques et efficaces pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments publics marocains. En intégrant des approches d'optimisation : managerielles, de conformité règlementaire, d'analyse de performance et de modélisation, nous espérons contribuer à la création de bâtiments publics durables, économes en énergie et offrant un confort optimal pour les occupants.

Chapitre I : Cadre Stratégique, Réglementaire et Technique de l'Efficacité Énergétique dans le Bâtiment public au Maroc

Résumé :

Ce chapitre examine en détail l'efficacité énergétique dans les bâtiments publics au Maroc. Il aborde la définition de l'efficacité énergétique, son lien avec le développement durable, les défis et opportunités au Maroc. Il analyse également la situation énergétique nationale et internationale, explore le cadre stratégique, institutionnel et réglementaire, ainsi que les solutions techniques et managériales pour améliorer l'efficacité énergétique.

Introduction du chapitre

Après l'ère du charbon, qui a catalysé la révolution industrielle au XIXe siècle, la croissance exponentielle de la consommation d'énergie primaire n'a cessé de s'accélérer. Malheureusement, cette expansion énergétique a laissé dans son sillage un bilan environnemental largement néfaste. C'est dans ce contexte que des réflexions profondes et des engagements internationaux ont vu le jour, symbolisés par la signature de protocoles tels que celui de Kyoto en 1997, ainsi que par l'organisation de la COP21 à Paris en 2015, dédiée aux enjeux climatiques. Au cœur de ces préoccupations, le secteur du bâtiment se profile comme un acteur majeur dans la quête de solutions aux défis énergétiques, économiques et environnementaux. Il apparaît comme un élément essentiel pour répondre aux engagements pris en matière de durabilité énergétique et environnementale. Dans un contexte mondial de préoccupations croissantes concernant la conservation des ressources et la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le Maroc s'est engagé à améliorer de manière significative l'efficacité énergétique de ses bâtiments publics.

Ce chapitre dresse un état des lieux complet du cadre stratégique, réglementaire et technique encadrant l'efficacité énergétique dans le bâtiment public au Maroc. Dans un premier temps, nous définirons le concept d'efficacité énergétique et mettrons en évidence ses liens avec le développement durable. Nous identifierons ensuite les principaux défis et opportunités au Maroc dans ce domaine. Nous analyserons par la suite la situation énergétique, aux niveaux international et national, dans le secteur spécifique du bâtiment. L'évolution de la consommation et le niveau de dépendance énergétique du pays seront examinés. Les volets stratégique, institutionnel et réglementaire encadrant l'efficacité énergétique au Maroc seront ensuite explorés en détail. Nous nous intéresserons notamment à la stratégie énergétique nationale, au cadre réglementaire existant et aux différents acteurs institutionnels impliqués. Les solutions techniques passives et actives pour l'optimisation de l'efficacité énergétique des bâtiments seront également abordées. Enfin, nous traiterons des mesures managériales indispensables pour accompagner et pérenniser la démarche d'efficacité énergétique dans le secteur public marocain.

L'objectif de ce chapitre est de dresser un panorama détaillé des connaissances et des actions entreprises par le Maroc dans le domaine de l'efficacité énergétique du bâtiment.

I.1. Aperçu de l'efficacité énergétique

I.1.1. Efficacité énergétique et développement durable

L'efficacité énergétique peut être définie comme le rapport entre le service rendu ou le travail fourni et l'énergie consommée par un système, un bâtiment ou un procédé. Elle vise à réduire les consommations d'énergie tout en maintenant un niveau de service identique, voire supérieur. Le rapport Brundtland en 1987 définit le développement durable comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. ». Le développement durable est un développement à la fois économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement viable. Le social doit être un objectif, l'économie un moyen et l'environnement une condition.

Le développement est « durable » s'il est conçu de manière à en **assurer la pérennité du** bénéfice pour les générations futures. L'efficacité énergétique apporte des réponses concrètes aux trois dimensions du développement durable (voir Figure I.1).

- **La dimension environnementale**

Développer l'efficacité énergétique aide à minimiser la consommation d'énergie contribue à la production réduite d'énergie fossile, limitant par la même occasion les émissions de gaz à effet de serre.

- **La dimension sociale**

L'efficacité énergétique stimule la création d'emplois diversifiés, allant des postes d'ouvriers aux experts et auditeurs en énergie. De plus, elle favorise un environnement propice au développement des industries liées à l'efficacité énergétique, telles que celles spécialisées dans l'isolation, le double et triple vitrage, et la fabrication d'appareils de mesure.



Figure I.1. Dimensions du développement durable

- **La dimension économique**

L'optimisation énergétique impulse la croissance économique à une échelle macro-économique en réduisant les dépenses énergétiques globales du Maroc. À une échelle micro-économique, elle contribue à alléger les factures d'électricité, générant ainsi des économies substantielles

I.1.2. Défis et Opportunités de l'Efficacité Énergétique au Maroc

L'efficacité énergétique est considérée aujourd'hui comme une quatrième énergie après les énergies fossiles, les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire. L'ambition du Royaume du Maroc est d'assurer une meilleure utilisation de l'énergie dans tous les domaines d'activité économique et sociale. Dans un contexte de dépendance énergétique du pays vis-à-vis de l'étranger et d'une fluctuation importante des prix d'énergie, il est devenu nécessaire d'appliquer une politique ambitieuse d'efficacité énergétique dans le cadre de sa nouvelle stratégie énergétique, ayant pour but d'exploiter le potentiel important en efficacité énergétique que recèle le Maroc.

Pour de nombreux pays ayant déjà réalisé des avancées significatives en matière thermique des bâtiments, les objectifs sont plus explicites. Prenant l'exemple de la France, un pays avec une riche tradition dans la conception thermique des bâtiments. Elle met régulièrement à jour sa

réglementation dans l'optique d'atteindre d'abord le standard de bâtiment passif, puis celui de bâtiment positif en énergie. Cependant, au Maroc, la situation est différente. La question du confort, un facteur majeur de la consommation énergétique pour les applications thermiques, n'est pas une priorité pour un grand nombre de citoyens. Ainsi, la mise en œuvre de la réglementation apportera principalement à ces citoyens un confort qu'ils n'avaient pas les moyens d'obtenir auparavant. Pour d'autres secteurs, tels que les administrations, hôtels, hôpitaux, palais, villas et résidences de milieu et haut standing, une réduction significative des coûts énergétiques, de l'ordre de 40%, est envisageable. Cette réduction s'accompagne d'une amélioration notable du confort, contribuant ainsi à un rendu professionnel conséquent.

I.2. Analyse de la situation énergétique dans le bâtiment

I.2.1. Revue de la littérature

Plusieurs pays dans le monde ont souligné l'objectif d'améliorer l'efficacité énergétique (EE)[1] et d'utiliser l'énergie de manière rationnelle et économique (**Costa-campi et al., 2015 ; El Iysaouy et al., 2019 ; Hamdaoui et al., 2018 ; Hani & Koiv, 2012**). L'EE est utilisée dans divers secteurs (résidentiel, industrie, transport, etc.) (**El Iysaouy et al., 2019**). L'EE est considérée comme l'objectif principal de la révolution du bâtiment (**Boharb et al., 2016 ; Le Coz & Maurel, 2019**).

Selon (**Salvalai et al., 2015),** la consommation d'énergie du secteur du bâtiment pourrait être simplement évitée en établissant des normes énergétiques obligatoires, qui constituent un moyen efficace de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES)[2] et de ralentir l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables. Lors du Sommet mondial sur le développement durable, les dirigeants mondiaux ont convenu de mettre l'accent sur les énergies renouvelables et sur l'augmentation de l'EE (**Simelyte, 2020**). Les pays développés et les pays en développement ont publié des réglementations spécifiques pour améliorer l'efficacité énergétique (**Garcia et al., 2016 ; Pan & Garmston, 2012 ; Simelyte, 2020**).

En Europe, l'EE est un objectif important de la politique et de la stratégie énergétique dans les bâtiments (**Agostino et al., 2017 ; Economidou et al., 2020 ; López-ochoa et al., 2019 ; Salvalai et al., 2015**). Les politiques d'EE sont apparues pour la première fois dans le programme de politique énergétique de l'Union européenne (UE)[3] dans les années 1970 sous la forme d'instruments de réglementation ou de contrôle, de codes de construction, de campagnes d'information des consommateurs et d'incitations économiques ou financières (**Economidou et al., 2020**). Cependant, l'UE a initialement réglementé l'EE des bâtiments avec la directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD)[4], 2002/91/EC (**Economidou et al., 2020 ; Font, 2019 ; Salvalai et al., 2015 ; Tolón-becerra et al., 2013**). Cette directive contribue à améliorer la performance énergétique des bâtiments en prenant en compte et en analysant les conditions locales, les exigences du climat intérieur, le climat extérieur et la rentabilité. Elle a également établi les exigences minimales en matière d'EE pour les bâtiments neufs et rénovés dont la surface utile totale est supérieure à 1000 m^2 (**Font, 2019 ; Tolón-**

[1] Efficacité énergétique (EE)
[2] Gaz à effet de serre (GES)
[3] Union européenne (UE)
[4] Directive sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD)

becerra et al., 2013). En 2009, la refonte de la DPEB (2010/31/CE) a été publiée avec le paquet climat pour la réduction des émissions de GES, qui prévoit une part de 20 % de sources d'énergie renouvelables dans la consommation d'énergie et une augmentation de 20 % de l'EE en 2020 (**Agostino et al., 2017 ; Economidou et al., 2020 ; Garcia et al., 2016**). Ces objectifs ont été mis à jour en 2014 par le cadre de l'UE qui fixe un objectif indicatif en 2030 pour réduire les émissions de GES de 40%, réduire la consommation d'énergie future d'au moins 27% et améliorer l'EE de 27% (**Agostino et al., 2017 ; López-ochoa et al., 2019).** En 2018, la nouvelle directive (2018/844/UE, EPBD) a été publiée et est entrée en vigueur. La Directive visait à accélérer la rénovation rentable des bâtiments existants, avec un parc immobilier décarboné en 2050 (**Agostino et al., 2017 ; Economidou et al., 2020**). Elle impose également le déploiement d'infrastructures d'électromobilité dans les parkings des bâtiments, en association avec l'amélioration des technologies intelligentes et des systèmes techniques des bâtiments, y compris l'automatisation des bâtiments (**Economidou et al., 2020**).

En Allemagne, les objectifs nationaux d'efficacité énergétique comprenaient un objectif primaire visant à réduire la demande d'énergie dans le secteur du bâtiment de 80 % en 2050. L'objectif à moyen terme était de réduire la demande de chauffage de 20 % en 2020 (**Alam et al., 2018**). En Italie, les municipalités ont joué un rôle important dans la mise en œuvre des codes de réglementation énergétique des bâtiments, qui jouent un rôle important dans la réduction de la consommation d'énergie des bâtiments et la diffusion des pratiques de " construction verte ". Ces codes ont eu une influence considérable sur le travail de toutes les parties prenantes du secteur de la construction, notamment les ingénieurs, les architectes, les planificateurs locaux et les entreprises de construction (**Salvalai et al., 2015**). En Espagne, **(Tolón-becerra et al., 2013)** ont conclu que l'efficacité énergétique de leurs bâtiments s'améliore plus lentement que dans les autres pays européens. Cependant, la dernière version du code technique de la construction a été publiée par le biais du décret royal 732/2019 qui déclare l'incorporation des économies d'énergie et de l'isolation thermique comme piliers fondamentaux de l'EE dans un bâtiment (**Merini et al., 2020**).

Au Royaume-Uni (UK)[5], la possibilité de réduire la consommation d'énergie à l'aide de réglementations sur la construction a commencé en 1965 grâce à une bonne conception. Ces réglementations, qui ont été améliorées au fil des années pour diminuer les émissions de GES, ont réduit progressivement la valeur U des murs exposés de 1,7W/m^2 K en 1965 à 0,35W/m^2 K en 2002. La réglementation exigeait d'augmenter l'épaisseur de l'isolation et de limiter les surfaces vitrées sur les façades, ce qui était considéré comme une restriction à l'innovation en matière de conception architecturale, de matériaux de construction, de services aux bâtiments et de systèmes de contrôle. En 2006, le Royaume-Uni a introduit des calculs basés sur les performances pour la conservation de l'énergie et de la puissance dans les bâtiments. En d'autres termes, le Royaume-Uni est passé d'une réglementation de la construction à des normes dont la conformité s'étend de la phase de conception à l'achèvement et à l'exploitation du bâtiment (**Hamza & Greenwood, 2009**).

En Chine, **(Yan-ping et al., 2009)** a révélé que la gestion de l'énergie dans le grand secteur public est une priorité particulière. Les efforts d'EE ont commencé au début des années 1980

[5] Royaume-Uni (UK)

avec le soutien du ministère de la Construction qui a développé une norme de conception de l'EE pour les bâtiments résidentiels dans les zones très froides et froides du pays où de très grandes quantités d'énergie étaient consommées pour le chauffage (**Lang, 2004 ; Liu et al., 2012 ; Yan-ping et al., 2009**). En 1986, la "Norme de conception de l'économie d'énergie pour les nouveaux chauffages dans les bâtiments résidentiels" a été publiée. Depuis 2005, le ministère de la Construction a entrepris d'élaborer des normes de conception EE pour les BP (**Yan-ping et al., 2009**). Il a formulé une série de normes pour la conception, la construction, la transformation, l'inspection et l'évaluation de l'efficacité énergétique des bâtiments publics, ce qui a permis de faire progresser les technologies d'efficacité énergétique des bâtiments (**Dongmei, 2018**).

I.2.2. Situation internationale

La consommation d'énergie finale dans le monde fait référence à l'énergie utilisée par les consommateurs finaux dans tous les secteurs de l'économie, tels que l'industrie, le transport, le résidentiel, et le tertiaire. Elle exclut l'énergie utilisée pour la transformation de l'énergie primaire en énergie secondaire (par exemple, la production d'électricité ou le raffinage du pétrole) et les pertes qui se produisent pendant cette transformation et la distribution. En 2021, le monde a connu des fluctuations importantes de la consommation d'énergie finale en raison des impacts de la pandémie de COVID-19, des tendances économiques mondiales, des progrès en matière d'efficacité énergétique et de la croissance des énergies renouvelables.

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE ou IEA), la demande mondiale d'énergie a diminué d'environ 4% en 2020 en raison de la pandémie, mais elle devrait augmenter avec la reprise économique mondiale. La répartition de la consommation d'énergie finale varie considérablement selon les régions et les pays, en fonction de facteurs tels que le niveau de développement économique, la structure industrielle, le climat et les politiques énergétiques. Par exemple, les pays industrialisés consomment généralement plus d'énergie par habitant que les pays en développement. Les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) représentent encore la majorité de la consommation d'énergie finale dans le monde, bien que la part des énergies renouvelables (éolien, solaire, hydroélectrique et autres) soit en croissance constante. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, l'investissement mondial dans les énergies propres est en passe d'atteindre 1,7 billion de dollars américains en 2023. La Figure I.2 montre l'évolution des investissements mondiaux dans les énergies propres (clean energy) et les énergies fossiles entre 2015 et 2023, en milliards de dollars US. On constate une tendance à la hausse des investissements dans les énergies propres sur toute la période, passant de 1074 milliards de dollars en 2015 à une prévision de 1740 milliards en 2023. Les investissements dans les énergies fossiles sont plus fluctuants mais restent globalement stables sur la période, autour de 1000-1100 milliards de dollars annuels, mis à part en 2020 où ils chutent à 839 milliards sous l'effet de la pandémie.

En 2021, les investissements dans les énergies propres (1408 milliards de dollars) dépassent pour la première fois ceux dans les énergies fossiles (914 milliards). Cette tendance devrait se confirmer et s'accentuer sur 2022 et 2023. Ces chiffres illustrent clairement l'accélération de la transition énergétique mondiale, avec des capitaux qui se détournent progressivement des

énergies fossiles au profit des énergies renouvelables et propres. Cette dynamique est cruciale pour atténuer le changement climatique.

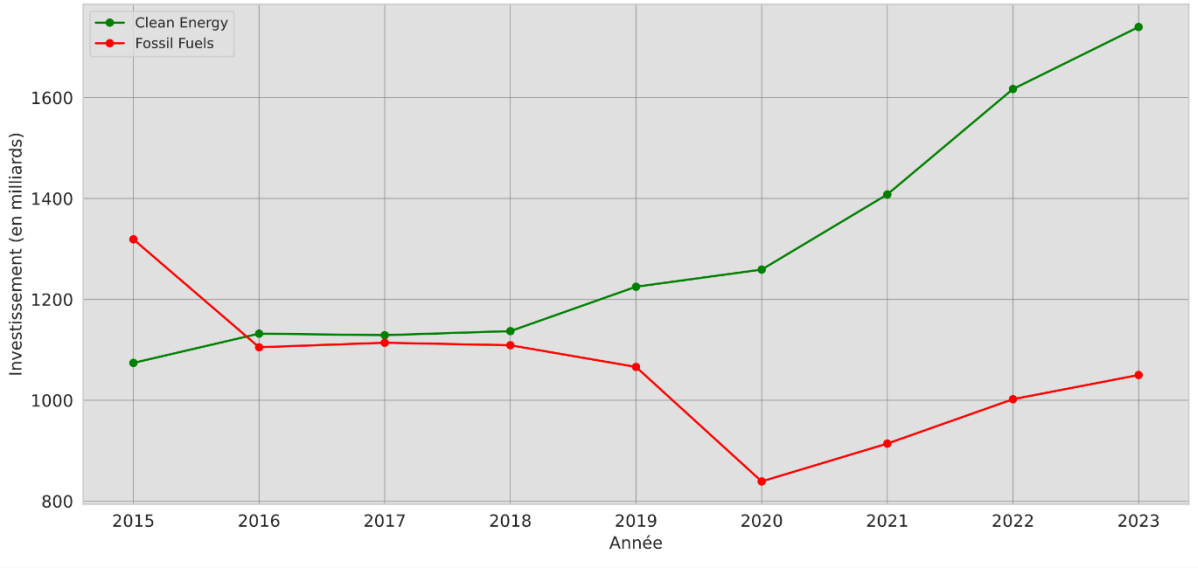


Figure I.2. Investissements mondiaux dans les énergies propres et les combustibles fossiles (2015-2023), (IEA, 2023)

I.2.3. Potentiel d'économies d'énergie dans le secteur du bâtiment

Selon l'AMEE, le potentiel d'économies d'énergie dans le secteur du bâtiment au niveau mondial est de l'ordre de 40%, et ce en grande partie via des mesures économiquement rentables. L'économie d'énergie dans ce secteur est très stratégique du fait de la longue durée de vie des bâtiments : les constructions d'aujourd'hui conditionneront durablement les consommations de demain et un bâtiment bien conçu sera toujours plus performant et moins couteux qu'un bâtiment rénové à posteriori. Si le secteur de la rénovation est crucial aux vues du parc de logements existant, la construction neuve se doit d'être exemplaire.

La région du sud de la méditerranée (voir figure I.3) ne déroge pas à ce constat puisque, en moyenne, le secteur du bâtiment représente environ 38% de l'énergie consommée (ce pourcentage varie entre 27 et 65%, selon les pays). Ce potentiel peut être atteint à travers la réunion de plusieurs mesures individuelles, comme le montre le graphique suivant issu d'une étude réalisée par Plan Bleu en 2009.

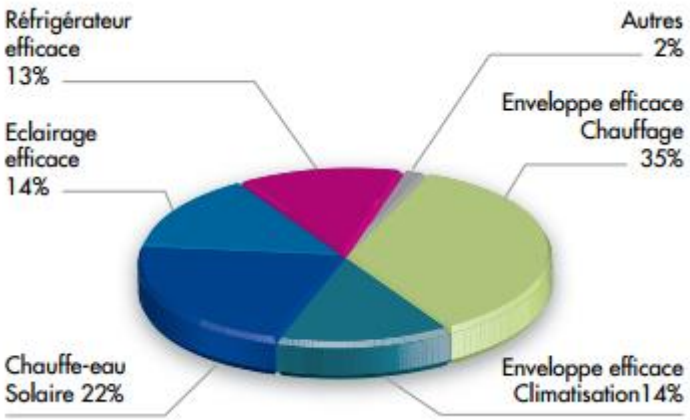


Figure I. 3. Structure du potentiel d'efficacité énergétique dans la région de la Méditerranée du sud sur la période 2010- 2030, AMEE

Notons que la mesure de l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments couvre à elle seule 50% de ce potentiel, grâce aux économies d'énergie qu'elle implique pour les besoins de chauffage et de climatisation. Il en découle l'importance de la conception thermique des bâtiments.

I.2.4. Situation nationale

Les principaux facteurs qui influencent la demande énergétique au Maroc sont bien établis, comme le soulignent (**Fatiha et Karim, 2019**). Ces déterminants incluent le produit intérieur brut (PIB), l'accès à l'électricité et les investissements directs étrangers. L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) confirme que plus de 80% de la production énergétique au Maroc provient de sources non renouvelables. Parallèlement, le Maroc se trouve dans une position d'importateur net d'énergie, avec l'électricité occupant une place prépondérante parmi les sources énergétiques importées dans le pays, comme indiqué par (**Agouzoul et al., 2021**) et (**Khatib, 2018**). Le Maroc est également confronté à une demande croissante en électricité, avec un taux de croissance annuel atteignant de 6 à 8 %, en grande partie attribuable à l'augmentation de la population, comme l'a noté (**Simelyte, 2020**). Cette forte croissance a exercé une pression considérable sur les ressources énergétiques du Maroc.

Le secteur de l'électricité est caractérisé par une dépendance énergétique élevée, avec plus de 90% de l'approvisionnement énergétique provenant de l'étranger, principalement par le biais d'importations de combustibles fossiles tels que le charbon, le gaz, le pétrole, les produits pétroliers et l'électricité, conformément aux rapports de la Cour des comptes (2018), de (**l'AIE, 2019c**), et de (**Khatib, 2018**).

En résumé, le paysage énergétique du Maroc est fortement marqué par une dépendance aux importations de combustibles fossiles, comme l'a souligné (**Simelyte, 2020**). En 2016, les achats de pétrole représentaient 24% des importations totales du pays, près de 50% des déficits commerciaux et 10-12% de son produit intérieur brut (PIB). En 2018, la facture énergétique a atteint 82 239 millions de dirhams marocains (MAD), soit 17,1% des importations totales, selon les conclusions de la Cour des comptes (2018). Le 2eme facteurs d'alarme qui ont poussé à

accélérer les mesures de l'Efficacité Energétique dans le bâtiment est la consommation croissante.

I.2.4.1.Évolution de la consommation du Maroc

Au Maroc la consommation annuelle en énergie (toutes sources confondues) est de 0,5 tonnes équivalent pétrole par habitant, elle augmente de 4,3% chaque année. En ce qui concerne l'électricité, un Marocain consomme 781kwh annuellement, et augmentera de 7,8% annuellement.

Les secteurs responsables de cette consommation sont représentés dans la figure ci-dessous :

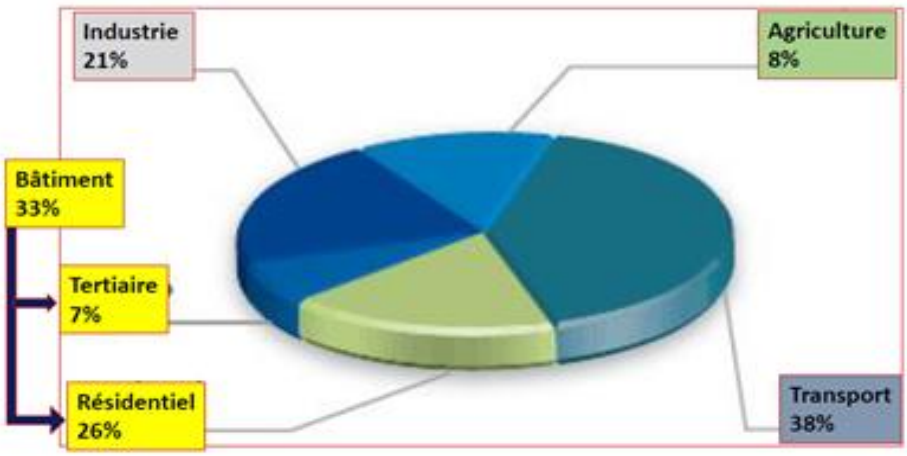


Figure I. 4.Consommation d'énergie au Maroc par secteur, AMEE

Parmi ces secteurs, le bâtiment qu'est un consommateur d'énergie avec une part de 33% de la consommation énergétique totale du pays, dont 26% réservée au résidentiel et le reste pour le tertiaire. Cette consommation énergétique est appelée à augmenter rapidement dans les années futures, en fait le parc de bâtiments a connu une évolution significative en raison des grands programmes lancés, tels que le Plan Azur pour l'hôtellerie, le programme d'urgence de l'éducation nationale, le programme visant à construire 150 000 logements par an, le programme de réhabilitation des hôpitaux, ainsi que la réhabilitation des mosquées, entre autres. Parallèlement, on observe une augmentation notable du taux d'équipement des ménages en appareils électroménagers, en raison de l'amélioration du niveau de vie et de la baisse des prix de ces équipements (chauffage, climatisation, chauffe-eau, réfrigération, etc.).

I.2.4.2.Dépendance énergétique du Maroc en Chiffres

Selon un rapport du ministère de l'Économie, des Finances et de la Réforme de l'Administration, le taux de dépendance énergétique du Maroc a chuté, passant de 98% en 2009 à 88% en 2020 (**Dépendance Énergétique Du Maroc, 2020**). En 2022, cette facture a grimpé de façon spectaculaire pour atteindre plus de 153 milliards de dirhams, marquant une augmentation de 102%, principalement attribuable à l'escalade des prix des produits pétroliers internationaux. Cependant, une tendance à la baisse de cette dépendance est observable depuis 2011, en conséquence de la mise en œuvre de la stratégie énergétique du Maroc initiée en 2009.

Pour s'affranchir davantage de cette dépendance, le Maroc a fermement investi dans les énergies renouvelables. L'objectif est d'augmenter la contribution des énergies renouvelables à 52% du mix énergétique total du pays en 2030. Des projets audacieux ont été lancés à cet effet : la centrale solaire Noor, avec une capacité de plus de 500 MW, et un programme éolien dépassant les 1 200 MW de capacité installée. Ces efforts considérables illustrent l'engagement résolu du Maroc envers la réduction de sa dépendance énergétique et l'adoption de sources d'énergie plus durables et efficientes.

I.3. Cadre stratégique

I.3.1. Transition Énergétique au Maroc

En 2009, le Maroc a adopté une Stratégie Nationale de l'Energie (SNE) pour améliorer la sécurité d'approvisionnement, la disponibilité de l'énergie, et augmenter l'accessibilité générale de l'énergie à des prix raisonnables (**Alhamwi et al., 2015**). Le Maroc a entrepris une transition énergétique en orientant sa SNE pour intégrer l'EE aux secteurs les plus consommateurs (bâtiment, industrie et transport). Il dispose d'un grand potentiel pour promouvoir les énergies renouvelables (parcs éoliens, centrales solaires thermiques), ce qui permettrait de résoudre les problèmes de sécurité énergétique et de changement climatique, ainsi que de réduire les émissions de gaz à effet de serre (**Khatib, 2018 ; Merini et al., 2020 ; Simelyte, 2020**). Cette transition a permis de réduire le taux de dépendance énergétique de 98 % en 2008 à 93,3 % en 2016 (**Khatib, 2018**). De plus, le Maroc peut passer de près de 88% aujourd'hui à 35% en 2040 et moins de 17% en 2050. En parallèle, le coût moyen de l'électricité sur le réseau pourrait passer de 0,79 MAD/kWh aujourd'hui à 0,61 MAD/kWh en 2040 et 0,48 MAD/kWh en 2050 (**Chami, 2020**).

Suite à l'adoption d'objectifs nationaux de réduction de la consommation d'énergie, un cadre complet et rigoureux d'EE, la loi 47-09, a été adoptée en 2011. Cependant, sa mise en œuvre a été difficile en raison du manque de coordination gouvernementale, de l'absence de ressources financières pour les programmes d'EE et d'obstacles importants dans l'adoption de la législation secondaire nécessaire (**IEA, 2019b**). En 2016, le Maroc a rejoint l'AIE, qui a noté les efforts positifs du gouvernement pour stimuler l'investissement dans les énergies renouvelables, fournir l'accès à l'électricité et éliminer progressivement les subventions à la consommation de combustibles fossiles (**IEA, 2019c**).

En 2017, le gouvernement du Maroc a préparé une stratégie d'EE avec pour objectif d'atteindre 20% d'économies d'énergie en 2030, qui a été présentée au Conseil des ministres en juin 2017 (**IEA, 2019b ; Nourdine & Saad, 2020**). Cet objectif a été mis à jour le 15 avril 2019 par Aziz Rabbah, le ministre de l'énergie, des mines et de l'environnement au Maroc. Il a déclaré lors d'un atelier à Rabat "le potentiel d'économies d'énergie dépassant 30%". Cependant, les conclusions de **(Nourdine & Saad, 2020)** l'étude indiquent que la stratégie d'EE au Maroc n'en est qu'à ses débuts. Un entretien avec un expert en durabilité consulté par le ministère a révélé que le Comité national pour le développement durable du développement durable est en train de développer l'indicateur de performance clé (KPi)[6] afin de suivre la durabilité et l'EE dans l'administration.

[6] Indicateur clé de performance (KPi)

La réalisation de l'objectif gouvernemental d'économies d'énergie en 2030 a nécessité une gouvernance globale efficace, y compris une coordination étroite et un engagement soutenu des parties prenantes, notamment avec le secteur privé. Le gouvernement marocain devrait agir rapidement pour adopter et mettre en œuvre la SNE 2030 afin d'atteindre son objectif associé à des ressources financières adéquates. La priorisation des actions importantes et urgentes est constamment demandée en association avec la garantie de la mise en œuvre des engagements annoncés sur le terrain, et soutenue par des analyses pour identifier les solutions les plus rentables et des données pour évaluer les progrès. Il est également nécessaire de donner la priorité à l'EE au niveau national en appliquant la législation existante et en établissant des politiques etdes normes pour une EE rentable (**IEA, 2019b**).

I.3.2. Stratégie énergétique nationale

La stratégie énergétique vise à garantir un approvisionnement en énergie sécurisé, accessible à des coûts raisonnables, et à favoriser le recours à des sources diversifiées. Pour y parvenir, il est prévu de développer le potentiel national en ressources énergétiques, notamment les sources renouvelables, de promouvoir l'efficacité énergétique et de renforcer l'intégration au système énergétique régional. La mise en œuvre de cette stratégie passera par des réformes approfondies du secteur énergétique, incluant des ajustements législatifs et réglementaires, ainsi que la mise en place d'une nouvelle gouvernance, avec une emphase sur la transparence et la concurrence pour offrir une meilleure visibilité aux acteurs du secteur et aux consommateurs.

Cette stratégie énergétique est étayée par des initiatives majeures, telles que le lancement officiel par Sa Majesté le Roi Mohammed VI du Plan Solaire Marocain en 2009 à Ouarzazate (La Centrale Solaire Noor Ouarzazate, 2023), du Programme Marocain Intégré de l'Énergie Éolienne en 2010 à Tanger, et par la présidence active de Sa Majesté aux secondes assises de l'énergie en 2011 à Oujda, centrées sur le thème des énergies vertes et leur importance pour le Maroc. Ces assises ont permis de présenter les réalisations accomplies et les perspectives d'achèvement des programmes inscrits dans la Stratégie Energétique Nationale.

Le Gouvernement Marocain s'est fixé pour objectif d'atteindre une économie d'énergie primaire d'environ 12% en 2020, et de 15% en 2030, en mettant en place un plan d'efficacité énergétique dans divers secteurs économiques. Les objectifs de la puissance installée ont été révisés lors de la COP 21, comme illustré dans la figure I.5, avec l'ambition d'atteindre 42% de la capacité électrique du Royaume grâce aux énergies renouvelables en 2020, et 52% en 2030.

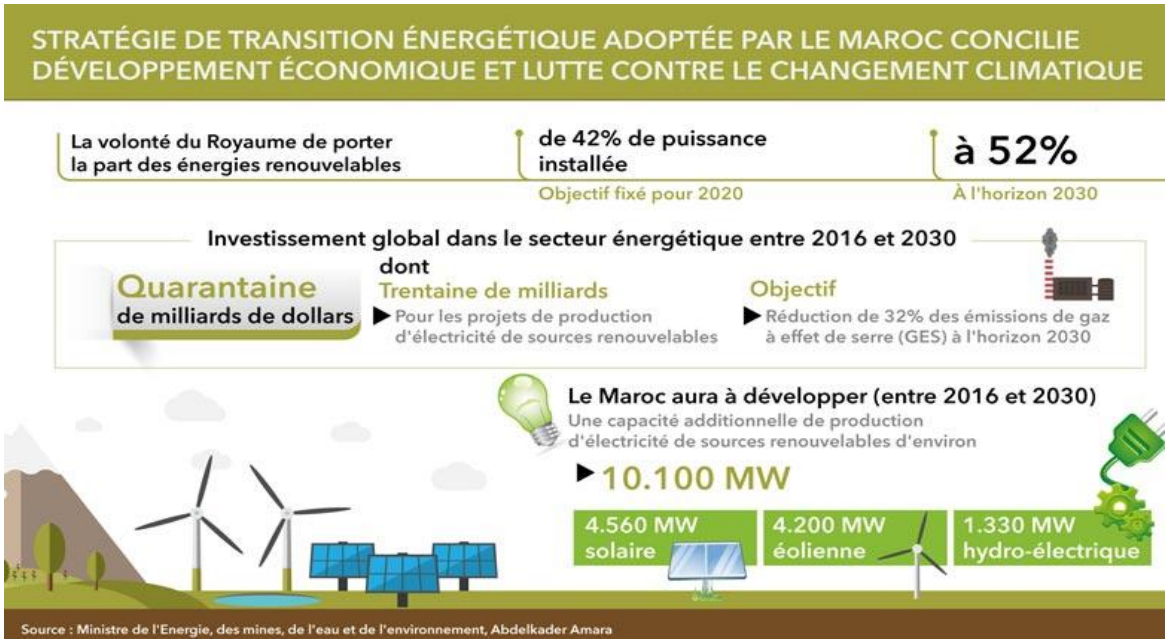


Figure I. 5. Schéma de synthèse des objectifs de la stratégie énergétique du Maroc, le matin n°3835 du 06 décembre 2015.

I.3.3. Plan d'action du Maroc

Afin de réaliser ces objectifs le Maroc a tracé un plan d'action volontaire et global touchant le bâtiment, le transport, l'industrie, l'agriculture et autres :

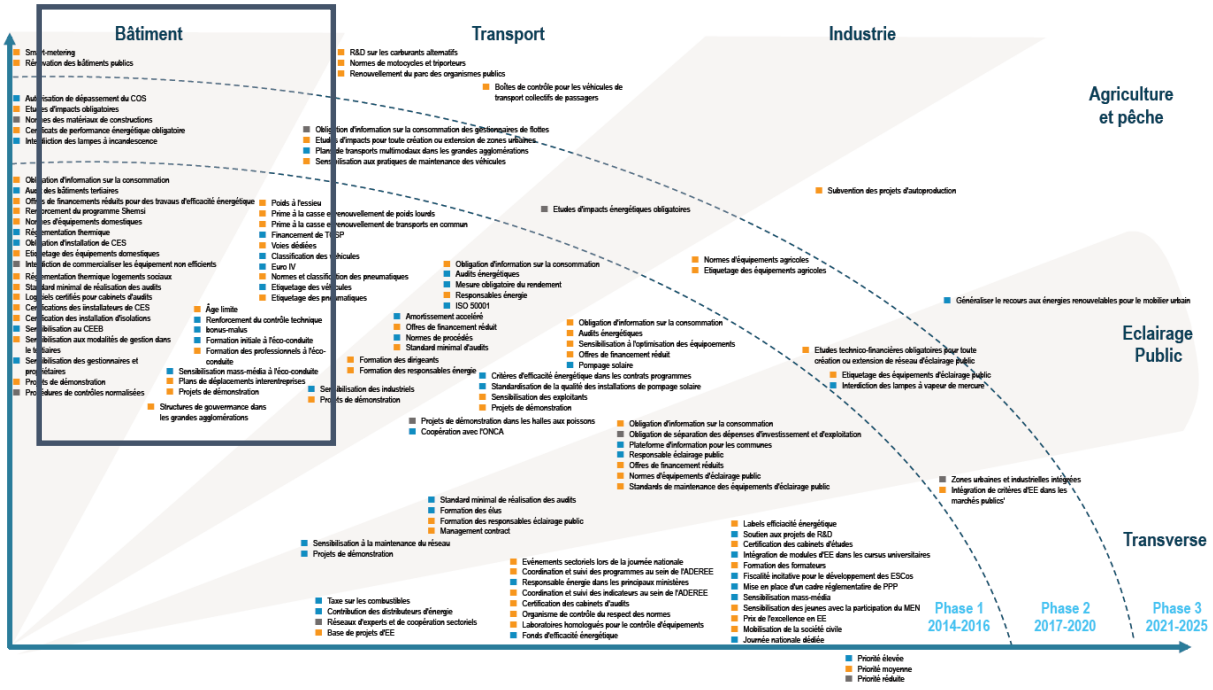


Figure I. 6. Plan d'action sectoriel de la stratégie nationale de l'efficacité énergétique, Source : Stratégie Nationale d'Efficacité Energétique à horizon 2030, AMEE.

La stratégie nationale de l'efficacité énergétique élaborée par l'AMEE et déclinée en plan d'action sectoriel a fait figurer comme priorité élevée la réglementation thermique dans les bâtiments.

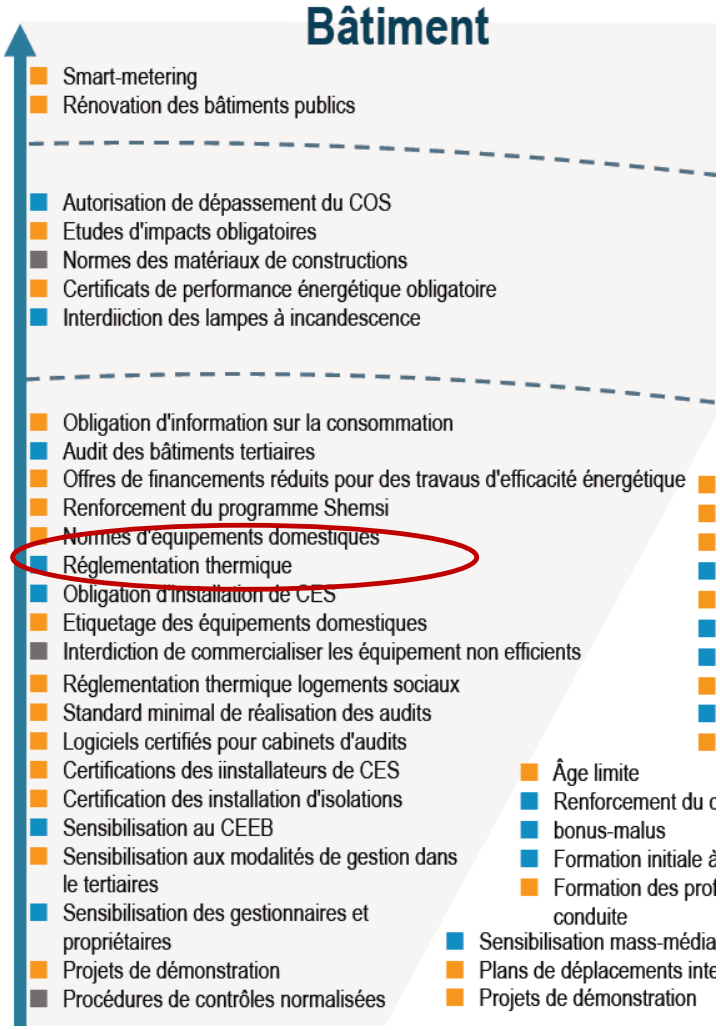


Figure I. 7. Plan d'action sectoriel de la stratégie nationale de l'efficacité énergétique – secteur du bâtiment. Source : Stratégie Nationale d'Efficacité Energétique à horizon 2030, AMEE.

I.3.4. Base de données des politiques marocaines

L'ensemble des politiques du Maroc relative à l'énergie sont capitalisé dans le présent tableau I.1:

Tableau I.1. Base de données des politiques marocaines. AIE, 2023

Politiques	Année	Statut	Champ
Programme d'Investissement Vert du Groupe OCP	2023	En vigueur	National
Stratégie Nationale sur l'Hydrogène	2021		National
Engagement Mondial sur le Méthane	2021		International
Accord entre le Maroc et le Portugal sur le développement de l'hydrogène vert	2021		International

Décret n° 2-17-746 relatif aux audits énergétiques obligatoires et aux organismes d'audit énergétique	2019	En vigueur	National
Décret n° 2-18-165 relatif aux audits énergétiques obligatoires	2019		
Programme d'efficacité énergétique pour les bâtiments publics	2019		
Normes européennes pour les climatiseurs	2018		
Exonération de la taxe de circulation Maroc	2017		
Stratégie nationale de développement durable 2030	2017		
Législation marocaine sur la facturation nette (loi n°58-15)	2016		
MorSEEF	2015		
Objectif 2030 pour le Maroc en matière d'énergies renouvelables	2015		
Décret n. 2-13-874 sur la Régulation thermique des bâtiments	2014		
Loi 47-09 sur l'efficacité énergétique	2011		
Norme marocaine NM 14.2.300 sur l'étiquetage des appareils de réfrigération, de cuisson et de nettoyage ; et l'éclairage intérieur	2010		
Appels d'offres d'énergie renouvelable au Maroc (MASEN)	2010		
Agence nationale pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique 16.09	2010		
Projet national intégré pour la production d'électricité solaire et Agence nationale pour l'énergie solaire (MASEN)	2010		
Agence marocaine pour l'énergie solaire "MASEN" (loi 57.09)	2009		
Stratégie énergétique nationale	2009		
Loi sur le développement des énergies renouvelables 13.09	2009		
Loi sur l'autoproduction (loi 16.08)	2008		
Électrification universelle au Maroc	1990	Clôturé	National

I.4. Cadre institutionnel de l'efficacité énergétique dans les bâtiments publics au Maroc

Les principaux acteurs institutionnels qui composent le paysage institutionnel dans le domaine de l'EE dans les bâtiments publics au Maroc sont notamment les ministères et les agences, les acteurs institutionnels de financement et les distributeurs d'énergie.

I.4.1. Ministères et agences

I.4.1.1. Ministère de l'Energie, des Mines et du Développement Durable (MEMDD)

Conformément à la règlementation en vigueur, le MEMDD, par sa Direction des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (DEREE) et ses agences spécialisées, à savoir l'Agence Marocaine pour l'Efficacité Energétique (AMEE) et la société d'ingénierie énergétique (SIE), est responsable de l'élaboration, la mise en œuvre, le suivi et l'évaluation de

la politique d'EE dans les différents secteurs de l'économie au Maroc, dont notamment le secteur public. Il est également appelé, en collaboration avec les organismes concernés, à la préparation et à l'application de la législation et de la règlementation dans le domaine de l'EE.

I.4.1.2.Ministère de l'Economie et des Finances (MEF)

Le Ministère de l'Economie et des Finances est un ministère important dans la mise en place d'un programme ciblant l'EE dans le secteur public. En effet, le MEF assure la tutelle financière des entreprises et des établissements publics ou à participation étatique par la Direction des Entreprises Publiques et de la Privatisation (DEPP)[7] et la Direction du Budget (DB)[8]. Il assure également un suivi de l'exécution des dépenses publiques et incite les différentes entités publiques à les rationaliser, notamment les dépenses de fonctionnement liées à la consommation d'énergie et d'eau (Avis du ministre de l'Économie et des Finances datant 8 septembre 2015).

I.4.1.3.Secrétariat Général du Gouvernement[9]

Le Secrétariat Général du Gouvernement, par son rôle de coordination et de préparation des projets de lois et de règlements émanant des différents départements ministériels, peut jouer un rôle important dans l'accélération de l'adoption des textes d'applications relatifs à l'EE en application des articles de la loi 47-09.

I.4.1.4.Ministère des Affaires Générales et de la Gouvernance [10](MAGG)

Le ministère des Affaires Générales et de la Gouvernance est un ministère transversal par les attributions qui lui ont été définies. Il appuie notamment le chef du gouvernement dans l'élaboration des politiques économiques et des programmes publics du gouvernement et suit leur mise en œuvre en coordination avec les ministères concernés. L'engagement du MAGG dans un programme de développement de l'EE dans les bâtiments du secteur public permettra de donner un appui politique de haut niveau et un signal fort aux différents ministères et institutions publiques pour les inciter à adhérer à un programme national, et ainsi faciliter la mise en œuvre de ce programme.

I.4.1.5.L'Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique (AMEE)

L'Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique (AMEE) émerge de la métamorphose de l'Agence de Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (ADEREE), elle-même une transformation du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), fondé en 1982. Cette transition importante souligne la reconnaissance croissante de l'importance non seulement de l'avancement des énergies renouvelables, mais également de la gestion judicieuse de la consommation d'énergie. Elle met en exergue la

[7] Royaume du Maroc, Ministère de l'Economie et des Finances, *Nos missions*, https://www.finances.gov.ma/fr/Pages/Nos-missions.aspx?m=Ministères et organismes nationaux.

[8] https://www.finances.gov.ma/fr/Pages/DB.aspx?m=Minist%C3%A8res%20et%20organismes%20nationaux&m2=Directions

[9] http://www.sgg.gov.ma/LeSGG.aspx

[10] http://www.mag.gov.ma/index.php/fr#

nécessité d'optimiser l'efficacité énergétique dans la conjoncture actuelle, amplifiant ainsi les démarches vers une mutation énergétique pérenne au Maroc.

Le 26 septembre 2016 incarne une étape cruciale, l'ADEREE muant en AMEE. Conformément aux clauses du projet de loi n° 39-16, révisant la loi 16-09, l'importance sera désormais accordée à l'efficacité énergétique. Cette inflexion s'accompagne d'une modification de dénomination, l'entité étant rebaptisée « Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique » (AMEE). Cette refonte institutionnelle met en lumière l'engagement renforcé envers un secteur vital pour la gestion des dépenses énergétiques du Maroc dans les années futures. L'AMEE sera principalement mandatée pour formuler un plan national ainsi que des schémas sectoriels et régionaux pour la promotion de l'efficacité énergétique. En outre, elle sera responsable de la création et de l'exécution de projets afférents, de l'assistance des initiatives de développement, ainsi que de leur coordination et supervision. La mobilisation des capitaux indispensables et la surveillance des audits énergétiques réalisés constituent aussi ses nouvelles compétences attribuées.

I.4.1.6.La Maîtrise d'Ouvrage Déléguée de projets (MOD)

La Maîtrise d'Ouvrage Déléguée de projets (MOD) est une tactique employée par le Maroc pour la gestion de projets étatiques. Cette méthode délègue la responsabilité de ces initiatives à une entité gouvernementale spécialisée, munie des compétences, de l'expertise technique et managériale indispensables pour la planification, la supervision et le suivi des différents acteurs engagés dans le processus de construction. En récompense de ses services, la MOD obtient une compensation financière, correspondant à un pourcentage du coût total du projet. Dans ce contexte, l'efficacité énergétique est un enjeu majeur pour augmenter la compétitivité. Pour la MOD, cela représente un facteur supplémentaire d'augmentation de la satisfaction client. Dès lors, la MOD se doit de maîtriser non seulement la réglementation énergétique et ses exigences, mais aussi les solutions techniques et les meilleures pratiques pour les réaliser. Elle doit aussi inciter les parties prenantes à les adopter et garantir que le maître d'ouvrage attribue le budget nécessaire à leur mise en place.

L'exécution de la MOD est principalement assurée par l'ANEP, qui est responsable de la conception, de la réalisation et du suivi des projets de construction qui lui sont confiés par d'autres ministères et établissements publics. Elle assure notamment le suivi de l'exécution des grands projets de constructions publiques dans divers secteurs tels que les établissements de santé, les universités, les centres sportifs, les bâtiments administratifs, les projets sociaux, etc. Dans l'accomplissement de sa mission, l'ANEP s'assure de l'application de la réglementation thermique dans les bâtiments concernés par le Règlement Général de Construction fixant les règles de performance énergétique des constructions au Maroc (RGCPE) pour les nouvelles constructions. Elle envisage également de diversifier son portefeuille de projets en ne se limitant pas aux nouvelles constructions et en ciblant d'autres projets à forte valeur ajoutée technique et stratégique, tels que les bâtiments durables, les bâtiments complexes, la réhabilitation et l'entretien.

I.4.2. Acteurs institutionnels de financement

I.4.2.1.La Société d'Ingénierie Energétique (SIE)

Créée en 2009, la SIE appelé initialement la Société d'Investissement Energétique avait pour mission d'accompagner le plan national de développement des énergies renouvelables, en investissant dans des projets d'EE et de production énergétique et en les développant à partir de ressources renouvelables. Ainsi, la SIE a été considérée comme l'instrument financier de l'Etat dédié au financement et au développement des projets d'ER et d'EE. Elle agit de ce fait en tant qu'investisseuse pour les projets d'EE et d'ER et elle est habilitée à participer à des sociétés menant des projets dans ce domaine, permettant ainsi de répondre aux objectifs nationaux de développement des ER et de l'efficacité énergétique.

Après 8 ans d'existence, le conseil d'administration de la SIE, tenu en 2018, a décidé de redéfinir le nouveau positionnement de la SIE ainsi que son rôle éventuel au sein du champ institutionnel énergétique national. La SIE est devenue la Société d'Ingénierie Energétique jouant ainsi le rôle de SUPER-ESCO. Dans ce mode d'intervention, la SIE conclura avec les bénéficiaires un contrat de performance dans lequel elle s'engagera sur la conception, le financement, la réalisation, la maintenance d'un projet de performance énergétique et garantira le niveau de performance énergétique de l'installation.

I.4.2.2.Moroccan Agency for Sustainable Energy (MASEN)

MASEN est une agence nationale dédiée au développement intégré d'installations d'ER (solaire, éolien, hydraulique). MASEN développe particulièrement le plan solaire marocain et vise notamment la mise en œuvre d'une puissance de production électrique propre additionnelle d'origine renouvelable de 3 000 MW en 2020 et de 6 000 MW à l'horizon 2030 dans le but de contribuer à l'objectif national, à l'horizon 2030, d'un mix énergétique dont 52 % seront d'origine renouvelable. MASEN agit dans le cadre d'une convention conclue avec l'Etat délimitant son périmètre d'actions actuel exclusivement au développement de grands projets d'ER.

I.4.3. Caisse de Dépôt et de Gestion

I.4.3.1.CDG-Développement

Créée en 2004, CDG Développement est un acteur majeur du développement territorial durable et intégré. Elle a une vocation d'opératrice et d'investisseur de long terme. CDG Développement veut se positionner en tant qu'acteur sur le marché de l'efficacité énergétique et des ER au Maroc. Ainsi, elle a lancé, conjointement avec l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable (ONEE) et l'AMEE à l'occasion de la COP22, une initiative en vue d'étudier l'occasion de créer une « ESE-Publique » ciblant principalement les bâtiments et le secteur de l'éclairage public.

I.4.3.2.Finéa

Finéa est le gestionnaire d'un Fonds de Garantie dédié à la Commande Publique (FGCP) qui est en fonction depuis fin 2008. Ce fonds facilite l'accès au financement aux petites et moyennes entreprises (PME) et aux très petites entreprises (TPE) attributaires de marchés publics par la garantie en faveur des banques ayant souscrit à sa dotation permettant une capacité de garantie

de 800 MDH. Finéa peut contribuer au développement des ESE qui seront mandatées dans le cadre des marchés publics en garantissant les investissements d'EE portés par les ESE marocaines par son Fonds de Garantie et en proposant des solutions de financement souples, adaptées aux différentes phases de réalisation d'un marché à l'aide des CPE.

I.4.3.3. Fonds d'équipement Communal (FEC)

Le FEC est une institution financière spécialisée dans le financement des investissements du secteur public local. Le FEC est sous la tutelle du Ministère de l'Economie et des Finances et du ministère de l'Intérieur. Le FEC est l'interlocuteur des exécutifs locaux, responsable de leur faciliter l'accès au crédit. Les emprunteurs potentiels du FEC sont les régions, les préfectures et les provinces, les communes, les régies autonomes, les établissements publics locaux et d'autres porteurs de projets d'investissement locaux.

I.4.4. Distributeurs d'énergie

Dans le cadre de la gestion des services publics, les fournisseurs de service sont les intervenants dans le domaine de la distribution d'électricité, soit la Branche Electricité de l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable (ONEE), les régies communales et les concessionnaires privés.

- L'ONEE assure la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique dans certaines régions du pays, conformément à la règlementation en vigueur
- Les régies communales, sous la tutelle du ministre de l'Intérieur, plus précisément de la Direction des Régies et des Services Concédés (DRSC) assurent la distribution d'électricité, principalement dans les grands centres urbains.
- Les concessionnaires privés sont des groupes indépendants qui prennent le contrôle de la distribution d'électricité d'un territoire donné. À ce jour, il existe quatre concessionnaires privés de distribution d'électricité au Maroc (LYDEC, à Casablanca ; REDAL à Rabat ; AMENDIS, à Tétouan et AMENDIS à Tanger). Ces distributeurs privés sont eux-mêmes des « Clients Grands Comptes » de l'ONEE-BE, alimentés en moyenne, haute et très haute tension.

I.5. Cadre réglementaire de l'Efficacité Énergétique au Maroc

I.5.1. Programme national de code d'efficacité énergétique dans le bâtiment

Dans le cadre de la politique de promotion de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables du gouvernement marocain, l'AMEE, avec le soutien financier du PNUD-FEM (Programme des Nations Unies pour le développement - Le Fonds pour l'Environnement Mondial), a mis en place le programme de Code d'Efficiacité Energétique dans le Bâtiment. Ce programme vise à intégrer les considérations énergétiques dans la conception, la construction, l'équipement et la gestion des bâtiments collectifs et publics, notamment dans des secteurs clés du développement du Maroc tels que l'habitat, la santé, l'hôtellerie et l'éducation nationale.

Le programme aborde deux problématiques principales : d'une part, l'absence de prise en compte des aspects énergétiques lors des différentes étapes liées aux bâtiments collectifs et

publics, et d'autre part, l'augmentation significative des dépenses énergétiques en raison des attentes croissantes en termes de qualité de service et de confort social de la part des utilisateurs.

À long terme, ce programme vise à renforcer et à pérenniser le cadre institutionnel et réglementaire régissant le secteur de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables dans le bâtiment. Il vise également à optimiser la consommation d'énergie dans les secteurs ciblés grâce à l'application d'une réglementation thermique marocaine, à promouvoir et démocratiser les normes et les pratiques d'efficacité énergétique, à améliorer la qualité du service et le confort des utilisateurs, à favoriser le transfert de bonnes pratiques et la diffusion de la réglementation à d'autres secteurs, ainsi qu'à stimuler l'émergence de nouveaux métiers et d'un nouveau secteur économique (industrie des matériaux d'isolation, double vitrage, équipements à haute performance énergétique, lampes économiques, etc.). Enfin, il encourage le dialogue politique entre les organismes gouvernementaux, les industriels et les promoteurs immobiliers concernant l'initiative nationale d'efficacité énergétique dans le bâtiment.

I.5.2. Loi sur l'efficacité énergétique

Le Maroc a instauré un cadre législatif volontaire pour accompagner sa stratégie énergétique. La loi N° 47-09 du 9 mai 2012 relative à l'efficacité énergétique a pour objet d'augmenter l'efficacité énergétique dans l'utilisation des sources d'énergie, éviter le gaspillage, atténuer le fardeau du coût de l'énergie sur l'économie nationale et contribuer au développement durable. Sa mise en œuvre repose principalement sur les principes de la performance énergétique, des exigences d'efficacité énergétique, des études d'impact énergétique, de l'audit énergétique obligatoire et du contrôle technique.

Dans ce cadre, l'AMEE avec l'appui des experts, a procédé à l'élaboration des spécifications techniques relatives aux exigences minimales de la réglementation thermique dans le bâtiment dans les secteurs de l'Habitat, de l'Hôtellerie, de la santé, de l'éducation nationale et de l'administration publique, ce qui a donné naissance au Règlement général de construction (RGCPE) fixant les règles de performance énergétique des constructions.

I.6. Règlement Général de Construction relatif aux Performances Énergétique (RGCPE)

I.6.1. Présentation du RGCPE

Le RGCPE est le premier décret d'application de la loi 47-09 relative à l'efficacité énergétique, après sa publication le 06 novembre 2014 au bulletin officiel N°6306, le RGCPE est entré en vigueur un an après sa date de publication. Ce règlement est devenu alors une obligation que les concepteurs, les prescripteurs doivent prendre en considération lors du dimensionnement et étude de l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment.

Le respect de cette réglementation entre dans le cadre du respect des règlements généraux de la construction qui conditionne l'obtention du permis de construire.

Le règlement s'applique aux constructions résidentielles et tertiaires. Les premières sont définies par la loi comme tout bâtiment dont les espaces réservés à l'habitation constituent plus de 80 % de la surface utile de planchers. Les constructions tertiaires correspondant quant à elles à tout bâtiment relevant des secteurs du tourisme, de la santé, de l'éducation et l'enseignement, de l'administration et du commerce et service.

Le RGCPE ne s'imposera pas bien entendu aux bâtiments existants avant sa mise en application, mais aussi à l'habitat individuel rural ainsi qu'aux bâtiments à usage spécifique (industriel, agricole, stockage…).

Il s'agira concrètement de respecter des exigences thermiques minimales, concernant les toitures, les murs extérieurs, les fenêtres, les planchers et les vitrages. Ces exigences varient selon le type de bâtiments, résidentiel ou tertiaire, ou encore sa surface en baies vitrées. Les exigences varient également selon la localisation de la construction sur le territoire national.

Ce document présente la première carte de zonage climatique du Maroc, avec les six zones climatiques homogènes en se basant sur l'analyse des données climatiques enregistrées par 37 stations météorologiques sur la période de 1999-2008 (10 ans) selon le guide RTCM.

Ainsi, en définitif, la carte du zonage final comprend six zones climatiques (voir annexe n°1) :

♣ Zone 1 : Casablanca-Agadir-Laâyoune ;

♣ Zone 2 : Tanger-Nador;

♣ Zone 3 : Fès-Oujda ;

♣ Zone 4 : Ifrane-Midelt;

♣ Zone 5 : Marrakech ;

♣ Zone 6 : Bouarfa-Errachidia-Es_Semara.

Ce règlement prévoit aussi deux approches :

Une approche performancielle, pour laquelle les niveaux sont exprimés en termes de besoins spécifiques annuels de chauffage et de climatisation, en kwh/m2/an, comme présenté dans l'annexe n°2:

Une deuxième approche dite prescriptive vient compléter la première, où les niveaux sont exprimés, pour chaque type de bâtiments et chaque zone climatique, sous forme de coefficients maximaux de transmission thermique (U en W/m2.K) des murs, de la toiture, des planchers bas et de facteurs solaires (FS) des fenêtres, en fonction du rapport de la surface des ouvertures vitrées à la surface brute de la façade, comme présenté dans l'annexe n°3.

I.6.2. Historique de l'application du RGCPE

L'adoption du RGCPE a généré un vif intérêt académique, bien que l'enthousiasme professionnel au Maroc ait été limité jusqu'en 2021, année où il est devenu un prérequis pour l'obtention du permis de construire. La faible sensibilisation des architectes aux enjeux énergétiques et environnementaux, l'absence d'exigence des agences urbaines concernant le respect de ce décret pour l'octroi du permis de construire et la non-création d'organismes de contrôle de réalisation, illustrent les principaux obstacles à la mise en application du RGCPE.

I.6.3. Impact énergétique et économique du RGCPE

Le respect des spécifications techniques de la réglementation implique un surcoût d'investissement de 3,2% du coût moyen de construction dans le résidentiel et de 0,5 à 3%

dans le tertiaire. Ce qui implique des économies d'énergies allant de 8 kwh/m²/an à 75 kwh/m²/an pour le résidentiel et de 23 à 202 kwh/m²/an pour le tertiaire selon le RTCM.

I.6.4. Outils informatiques d'aide pour l'application du RGCPE

BINAYATE est le premier logiciel de diagnostic de performance énergétique, et de contrôle de la conformité au RGCPE développé par l'AMEE, ce logiciel permet et de vulgariser le RGCPE et de renforcer la capacité des organes de contrôle à l'application de la Réglementation Thermique, dans ses deux volets actif et passif, Il fournira ainsi un outil à destination des acteurs de l'enseignement supérieur, les bureaux d'études, les bureaux de contrôle, Il existe deux versions ;

BINAYATE Performancielle : qui un outil général valable pour tous les types de bâtiment, il se base sur les calculs du bilan énergétique.

BINAYATE Prescriptive : est un outil simplifié utilisable dans le cas où le taux des ouvertures (le TGBV) dans le bâtiment ne dépasse pas 45%.

Les deux versions sont disponibles gratuitement sur le site de l'AMEE

I.6.5. Initiatives de Promotion de l'Efficacité Énergétique au Maroc

Pour soutenir l'engagement du Maroc en faveur de la promotion de l'efficacité énergétique (EE) dans le secteur du bâtiment, l'AMEE a mis au point plusieurs guides essentiels. Ceux-ci comprennent le guide RTCM et sa version simplifiée, ainsi que des guides spécifiques pour le tourisme, l'isolation, le chauffage, la ventilation, la climatisation (CVC) et l'éclairage…Ces ressources précieuses sont librement accessibles sur le site de l'AMEE.

Par ailleurs, le ministère de l'Habitat et de la Politique de la Ville a également contribué à cet effort en élaborant un guide sur les bonnes pratiques pour la maîtrise de l'énergie à l'échelle urbaine et résidentielle.

De son côté, la Maîtrise d'Ouvrage Déléguée (MOD) a créé un guide intitulé Bâtiment Vert, axé sur la qualité environnementale, y compris l'EE. La MOD envisage également de mettre à jour ses guides en y intégrant davantage d'aspects relatifs à l'efficacité énergétique.

I.7. Cadre technique et managérial de l'Efficacité Énergétique dans le bâtiment

En matière d'efficacité énergétique dans le bâtiment, il faut jouer sur trois leviers :

- La diminution des besoins qui sont relatifs au bâti ;
- L'amélioration des équipements techniques du bâtiment et leur gestion ;
- Le comportement de l'utilisateur

La conception efficace ne se suffit pas à elle-même. Elle doit être appuyée à chaque instant par une gestion rationnelle de l'énergie. La maîtrise des consommations consiste à devenir acteur conscient de ses consommations.

L'objectif de l'Efficacité énergétique dans le bâtiment est de réduire la consommation énergétique tout en assurant le confort thermique nécessaire, sachant que pour garder ce confort

il faut compenser quelques parts les déperditions, alors comment garder le confort et réduire la facture ?

L'efficacité énergétique dans le bâtiment repose sur trois axes :

- Les mesures d'efficacité énergétique passives : Elles concernent l'enveloppe du bâtiment. Ces mesures cherchent à éviter les déperditions en renforçant la performance technique du bâtiment (isolation, parois vitrées…), utilisation des énergies naturelles (chaleur et lumière du soleil).

- Les solutions d'efficacité énergétique actives : elles agissent sur l'exploitation et l'optimisation des flux énergétiques via l'utilisation d'appareils performants et de systèmes intelligents de mesure, de contrôle et de régulation.

- La sensibilisation des utilisateurs à leur empreinte environnementale et énergétique : Il s'agit de l'information et la formation des utilisateurs du bâtiment sur leurs empreintes et aux gestes écoresponsables qui entraînent une baisse immédiate des consommations.

I.7.1. Définition des caractéristiques du bâtiment

I.7.1.1.Enveloppe du bâtiment

Elle englobe tous les composants qui entrent en contact avec l'environnement extérieur, ce qui inclut le sol. Cela comprend le plancher inférieur, le toit, ainsi que les murs extérieurs avec leurs ouvertures telles que les fenêtres, les portes et les baies vitrées. Cette enveloppe joue un rôle crucial dans la diminution de la consommation énergétique d'un bâtiment.

I.7.1.2.Bâtiment passif .

Il s'agit d'un bâtiment qui n'est pas équipé de systèmes de chauffage ou de climatisation traditionnels en fonctionnement constant, mais qui offre un confort thermique intérieur adéquat, aussi bien en hiver qu'en été.

I.7.1.3.Performance énergétique d'un bâtiment

Il s'agit de la quantité d'énergie réellement consommée ou estimée pour satisfaire les divers besoins liés au confort thermique dans un bâtiment. Cela englobe, entre autres, l'énergie utilisée pour le chauffage, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire, la ventilation, etc.

I.7.1.4.Inertie thermique d'un bâtiment

L'inertie thermique d'un bâtiment se réfère à sa capacité à emmagasiner de la chaleur dans ses murs et planchers. Plus cette inertie est élevée, plus le bâtiment met du temps à se réchauffer ou à se refroidir. Par exemple, les bâtiments construits en pierre ou avec des murs épais en terre crue possèdent une forte inertie thermique. Ils accumulent la chaleur durant les journées chaudes, limitant ainsi les risques de surchauffe. Pendant la nuit, lorsque la température extérieure baisse, la chaleur emmagasinée est progressivement libérée à l'intérieur du bâtiment, évitant ainsi souvent le besoin d'un chauffage d'appoint.

L'accumulation de chaleur et le déphasage de sa libération sont les deux composantes essentielles de l'inertie thermique. Ces aspects sont physiquement représentés par des propriétés comme la conductivité, la diffusivité et l'effusivité thermique, qui mesurent la capacité d'un matériau à conduire une variation de température et à absorber (ou restituer) un flux thermique instantané.

I.7.1.5.Temps de déphasage

Le temps de déphasage d'un matériau ou d'une paroi représente la période qui s'écoule entre le moment où la température extérieure est la plus élevée et celui où la température intérieure atteint son maximum. En d'autres termes, il indique le temps nécessaire à la chaleur pour traverser le matériau ou la paroi.

Cette caractéristique joue un rôle crucial dans le maintien du confort thermique en été dans un bâtiment. En tenant compte du temps de déphasage, il est souvent possible de se passer de la climatisation, ce qui peut représenter une économie significative en termes de coûts. Le temps de déphasage dépend de plusieurs facteurs, tels que l'épaisseur du matériau, sa conductivité thermique, sa diffusivité thermique, ses capacités thermiques massique et volumique, ainsi que son effusivité thermique.

I.7.1.6.Conductivité thermique λ

La conductivité thermique, notée λ, est une propriété spécifique à chaque matériau. Elle mesure la quantité de chaleur qui traverse 1 mètre d'épaisseur d'un matériau homogène par unité de temps, pour une différence de température de 1 K entre ses deux faces. La valeur de λ est exprimée en watts par mètre-kelvin (W/m·K). Plus cette valeur est faible, plus le matériau est isolant.

I.7.1.7.Diffusivité thermique

La diffusivité thermique quantifie la rapidité avec laquelle la chaleur se propage par conduction à travers un matériau. Un coefficient de diffusivité élevé indique que le matériau chauffe ou refroidit rapidement, tandis qu'un coefficient plus bas signifie que la chaleur mettra plus de temps à traverser l'épaisseur du matériau. Sa valeur est déterminée par la formule suivante : $D = \lambda / (\rho \cdot C)$, où λ est la conductivité thermique, ρ la densité et C la capacité thermique du matériau.

I.7.1.8.Capacité thermique massique

La capacité thermique massique, anciennement connue sous le nom de chaleur massique ou chaleur spécifique, représente la quantité d'énergie requise pour augmenter la température d'une unité de masse d'une substance d'un degré Kelvin lors d'un échange thermique. Il s'agit donc d'une grandeur intensive, exprimée en joules par kilogramme-kelvin (J/kg·K), qui correspond à la capacité thermique divisée par la masse du matériau étudié.

Les symboles associés sont les suivants : D pour la diffusivité en m^2/s, λ pour la conductivité thermique en W/m·K, ρ pour la masse volumique en kg/m^3, et C pour la chaleur spécifique (ou capacité thermique massique) en J/kg·K.

I.7.1.9. Capacité thermique volumique

La capacité thermique volumique, également appelée chaleur volumique, mesure la capacité d'un matériau à stocker la chaleur en fonction de son volume. Elle est définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré Kelvin la température d'un mètre cube de matériau. Cette grandeur intensive est le résultat de la capacité thermique divisée par le volume du matériau étudié. En d'autres termes, c'est le produit de la masse volumique et de la capacité thermique massique du matériau. Elle s'exprime en joules par mètre cube-kelvin (J/m³·K).

I.7.1.10. Effusivité thermique

L'effusivité thermique d'un matériau indique sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle reflète la capacité de la surface d'un matériau à stocker ou à libérer de la chaleur. L'effusivité thermique augmente proportionnellement avec la conductivité thermique et la capacité thermique, selon la formule suivante : $E = \sqrt{(\lambda \cdot \rho \cdot C)}$.

Dans cette équation :

E représente l'effusivité en joules par kelvin par mètre carré par seconde à la puissance de moins un demi (J·K^-1·m^-2·s^-1/2).

λ désigne la conductivité thermique en watts par mètre-kelvin (W/m·K).

ρ correspond à la masse volumique en kilogrammes par mètre cube (kg/m³).

C représente la chaleur spécifique (ou capacité thermique massique) en joules par kilogramme-kelvin (J/kg·K).

I.7.1.11. Coefficient de transmission thermique U ou conductance thermique

Le coefficient de transmission thermique, noté U et parfois appelé conductance thermique, est une mesure spécifique des pertes thermiques à travers une paroi de l'enveloppe d'un bâtiment. Son unité est le watt par mètre carré par degré Kelvin de différence de température entre le côté chaud et le côté froid de la paroi (W/m²·K). Il quantifie la quantité de chaleur qui traverse une paroi par unité de temps, de surface et de différence de température entre les environnements de part et d'autre de cette paroi.

I.7.1.12. Besoin en énergie de chauffage ou de climatisation

Il représente les besoins énergétiques exprimés en kilowattheures par mètre carré par an, requis pour maintenir la température voulue ou recommandée dans les espaces chauffés ou climatisés.

I.7.1.13. Facteur solaire

Le facteur solaire (FS) représente en pourcentage (%) la quantité d'énergie solaire qui pénètre à travers les fenêtres exposées au rayonnement solaire, sans prendre en compte les dispositifs de protection solaire externes ou internes. Lorsque ces derniers sont pris en compte, on parle de "facteur solaire équivalent".

I.7.1.14. Le diagramme GIVONI

Le diagramme bioclimatique de Givoni est un outil essentiel pour guider la prise de décision lors de la conception d'un projet bioclimatique visant à atteindre le confort thermique optimal

des bâtiments. Ces méthodes intègrent les paramètres météorologiques cruciaux dès la phase de conception, en se basant sur une connaissance approfondie du climat et des variables climatiques (température, vents, précipitations, humidité) spécifiques au lieu considéré. Construit sur un diagramme psychrométrique (aussi appelé diagramme de l'air humide), le diagramme de Givoni permet d'identifier les conditions thermiques idéales pour chaque mois de l'année en fonction des différentes stratégies et interventions envisageables. Celles-ci incluent l'utilisation de l'inertie thermique, la ventilation, le chauffage passif par les apports internes, le refroidissement par évaporation, ainsi que le recours au chauffage ou à la climatisation dans des situations extrêmes.

Sur ce diagramme, différentes zones sont représentées :

- La zone de confort hygrothermique est définie pour une activité sédentaire, une vitesse d'air minimale (généralement 0,1 m/s) et en tenant compte des tenues vestimentaires moyennes pour l'hiver et l'été.
- L'extension de la zone de confort hygrothermique obtenue par ventilation, en augmentant la vitesse de l'air de 0,1 à 1,5 m/s.
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'utilisation de l'inertie thermique, associée à des stratégies de protection solaire et à l'utilisation de revêtements clairs.
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique, la protection solaire et les revêtements clairs, en y ajoutant une ventilation nocturne.
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'utilisation de systèmes passifs de refroidissement par évaporation.
- La zone des conditions hygrothermiques qui nécessitent l'humidification de l'air.
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par une conception solaire passive du bâtiment.

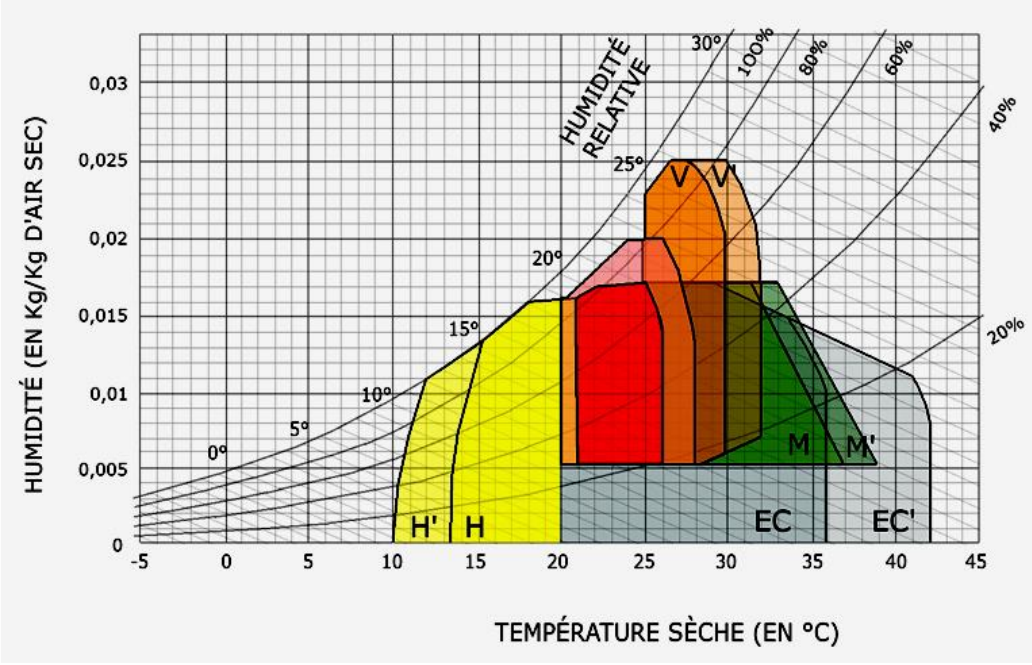


Figure I.8. Diagramme de GIVONI

Diagramme bioclimatique du bâtiment : Limites de la zone du confort thermique (rose), de la zone d'influence de la ventilation à 0,5m/s (VV' orangé) et de l'inertie thermique (MM' vert), de la zone d'influence du refroidissement évaporatif (EC et EC' gris), de la zone de nonchauffage par la conception solaire passive (H et H' jaune).

Par défaut, on peut donc repérer d'un seul coup d'œil les conditions hygrothermiques extérieures qui, quoi qu'on fasse au niveau de l'architecture, nécessitent le recours à un système de chauffage ou de climatisation (zones sans couleurs sur le diagramme).

Sous réserve que les conditions du confort thermo hygrométrique soient bien celles relatives à l'activité, à la tenue vestimentaire et à la culture des futurs occupants du bâtiment en projet, le diagramme bioclimatique est un outil dont la validité est universelle. Il peut donc être utilisé indifféremment en climat tempéré ou tropical.

I.7.2. Confort thermique dans le bâtiment

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement ; il figure parmi les prestations qu'un bâtiment doit pouvoir assurer aux utilisateurs. C'est une sensation de bien-être physique qui dépend **des conditions liées à l'environnement** :

- **La température ressentie** par le corps (ou résultante)

  De façon simplifiée, on définit une température (opérative) de confort ressentie (appelée aussi température résultante sèche) : Trs = (Ta + Tp) / 2 (Valable tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s).

  La température de l'air ambiant **Ta**;

  La température des surfaces à l'intérieur du bâtiment **Tp**;
- **L'humidité relative de l'air** HR qui est le rapport entre la quantité d'eau contenue dans l'air a une température Ta et la quantité maximale qui peut être contenue à la même température (au point de rosée) ;
- **La vitesse de l'air** qui influence les échanges par convection ;

La sensation de bien-être dépend aussi :

- **Le métabolisme,** qui est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7°C. Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.
- **L'habillement,** qui représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.

C'est donc une sensation subjective et variable selon les individus.

I.7.2.1.Confort et température

La température est le paramètre principal du confort, ce dernier est même défini comme suit « Le Confort c'est l'équilibre de température entre l'homme et l'ambiance ». La température corporelle d'une personne est d'environ 37°C.

Cependant, la température moyenne de la surface de la peau est de 33°C. L'homme produit de la chaleur par « combustion » chimique (oxydation) de sa nourriture : libérant ainsi l'énergie solaire qui a fait pousser cette même nourriture-là.

Afin de garder l'équilibre de température, l'homme libère de la chaleur en permanence. Cette chaleur est produite sous les formes suivantes (les pourcentages sont des moyennes):

- Convection thermique (environ 35%);
- Rayonnement thermique (environ 35%);
- Vapeur d'eau (transpiration et respiration, environ 24%);
- Réchauffement des aliments, des boissons ingérées et de l'air inspiré (environ 6%).

En été ou pendant une activité intense, la chaleur est plus libérée par évaporation, en hiver, plus par convection et par rayonnement. Cependant, quelle que soit la forme sous laquelle la chaleur est transférée, le corps essaie toujours de maintenir sa température normale, car c'est seulement à cette température-là que les fonctions vitales peuvent s'effectuer normalement.

C'est ainsi qu'en hiver, le corps réduit son émission calorifique en contractant la peau : le sang chaud ne peut plus atteindre les derniers capillaires. Par contre, en été ou dans des pièces chauffées, ces capillaires se dilatent, de sorte que plus de chaleur puisse être transférée par évaporation. Cependant, il y a des limites à cette régulation naturelle de la température. Une contraction continue des vaisseaux sanguins peut provoquer une gelure, alors qu'une dilatation continue peut entraîner une chute importante de la pression sanguine (coup de chaleur).

L'homme complète ce mécanisme automatique de régulation de la température en portant des vêtements adaptés, en ayant une alimentation adéquate et en chauffant et refroidissant les pièces de séjour.

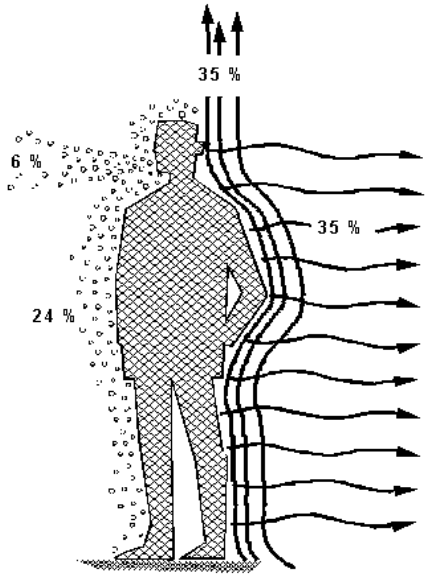


Figure I. 9. Production de la chaleur dans le corps humain

I.7.2.2.Confort et humidité relative

L'humidité relative de l'air a un impact sur la capacité du corps à évacuer l'excès de chaleur. Par exemple, une température extérieure de 24°C avec une humidité relative de 82% (après une

pluie pendant une période de chaleur intense) entrave le processus de transpiration. Cela se traduit par une difficulté pour la peau d'évaporer la transpiration et donc de se rafraîchir.

En revanche, une température de 24°C associée à une humidité relative de 18% (typique du climat estival méditerranéen) permet à la peau de se refroidir grâce à l'évaporation de la transpiration, rendant la chaleur beaucoup plus supportable. À l'intérieur des bâtiments, l'humidité a relativement peu d'impact sur la sensation de confort d'une personne. Il est souvent difficile pour un individu de percevoir la différence entre 40% et 60% d'humidité relative dans un bureau. L'inconfort se manifeste principalement dans les cas suivants :

- Lorsque l'humidité relative est inférieure à 30%,
- Lorsque l'humidité relative dépasse 70%.

Des niveaux d'humidité faibles (inférieurs à 30%) peuvent entraîner divers problèmes, tels que l'augmentation de l'électricité statique (provoquant de petites décharges lors du contact avec des objets métalliques), une gêne et une irritation accrue en présence de fumée de tabac (en raison d'une sensibilité accrue aux odeurs) et une augmentation de la concentration de poussières dans l'air (du fait de la réduction de la taille des particules), ce qui peut augmenter la vitesse de sédimentation des particules et ainsi accroître la quantité de bactéries en suspension dans l'air. Cela pourrait potentiellement conduire à une augmentation des problèmes respiratoires en hiver lorsque l'humidité de l'air est basse.

Des niveaux élevés d'humidité (au-delà de 70% HR) favorisent la croissance microbienne et peuvent entraîner des condensations sur les surfaces froides. Il est important de maintenir un taux d'humidité optimal du point de vue de l'hygiène, comme illustré dans le diagramme ci-dessous, basé sur les recommandations de Scofield et Sterling

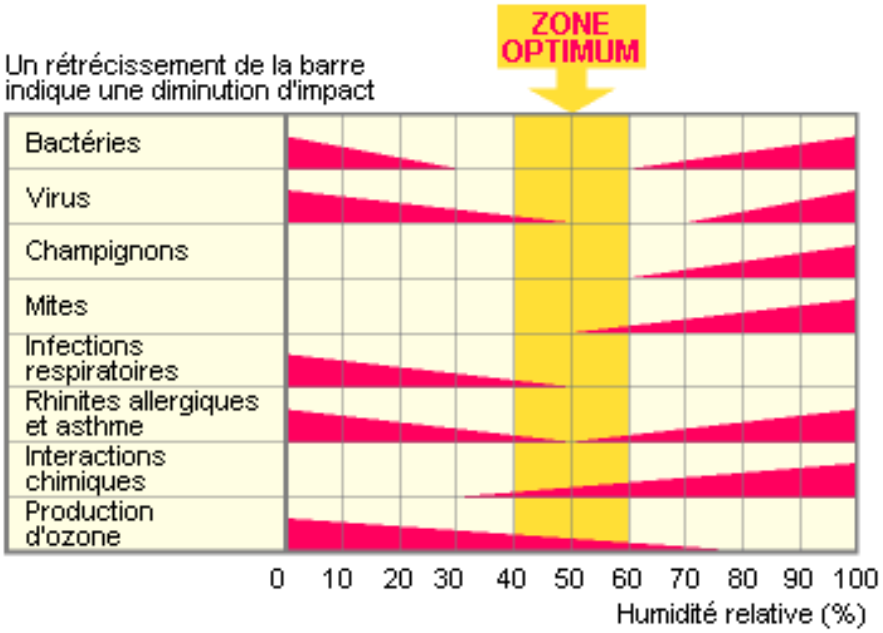


Figure I. 10. La croissance microbienne en fonction de l'humidité

I.7.2.3.Plage de confort

Pour un confort optimal et pour une température de l'air aux environs de 22°C, on peut dès lors recommander que l'humidité relative soit gardée entre 40 et 65 %.

Plus précisément, on peut définir une plage de confort hygrothermique dans le diagramme suivant :

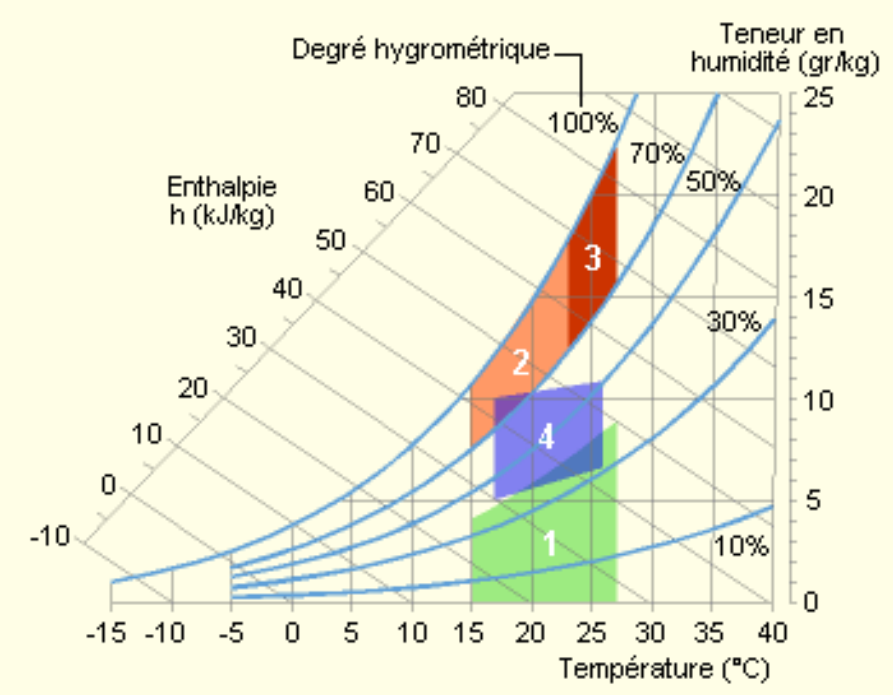


Figure I. 11. Le Polygone de confort hygrothermique.

Où :

1 : Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
2 et 3 : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.
3 : Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
4 : Polygone de confort hygrothermique.

I.7.2.4.Confort et vitesse de l'air

La vitesse de l'air, plus spécifiquement la vitesse relative par rapport à l'individu, est un élément crucial à prendre en compte, car elle influence les échanges de chaleur par convection et favorise l'évaporation à la surface de la peau.

À l'intérieur des bâtiments, on estime généralement que tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s, son impact sur le confort des occupants est négligeable. Pour donner un point de comparaison, marcher à une vitesse de 1 km/h génère un déplacement de l'air d'environ 0,3 m/s autour du corps.

Le mouvement de l'air a pour effet de réduire la température ressentie par le corps, ce qui est recherché en été. Cependant, cela peut être source de gêne en hiver en raison des courants d'air.

I.7.2.5.Condition hivernale

Le tableau I.2 montre de façon plus précise le confort lié à la vitesse de l'air dans les conditions hivernales. La fourniture d'air frais pour la ventilation d'un local n'entraîne en principe qu'un mouvement très faible de l'air. Le confort est donc directement lié à la qualité de la diffusion de l'air dans la pièce, afin d'assurer une vitesse réelle inférieure à 0,25 m/s au droit des occupants.

Tableau I. 2. Le confort lié à la vitesse de l'air – condition hivernale

Vitesses résiduelles	Réactions	Situation
0 à 0,08 m/s	Plaintes quant à la stagnation de l'air.	Locaux prévus de ventilation
0,13 m/s	Situation idéale.	Installation de grand confort.
0,13 à 0,25 m/s	Situation agréable, mais à la limite du confort pour les personnes assises en permanence.	Installation de confort.
0,33 m/s	Inconfortable, les papiers légers bougent sur les bureaux.	Grandes surfaces et magasins.
0,38 m/s	Limite supérieure pour les personnes se déplaçant lentement.	Grandes surfaces et magasins.
0,38 à 0,5 m/s	Sensation de déplacement d'air important.	Installations industrielles et usines où l'ouvrier est en mouvement.

I.7.2.6.Conditions estivales

Pour les températures de locaux comprises entre 21 et 24°C, un déplacement d'air à la vitesse de 0,5 à 1 m/s donne une sensation rafraîchissante confortable à des personnes assises n'ayant que de faibles activités. Mais lorsqu'on fournit un travail musculaire dans des endroits chauds, des vitesses d'air de 1,25 à 2,5 m/s sont nécessaires pour apporter un soulagement.

On produit parfois des vitesses plus élevées lorsque des hommes sont soumis pour de courtes périodes à une chaleur rayonnante intense. Ce mouvement d'air sera obtenu à l'aide de ventilateurs.

L'effet rafraîchissant est ressenti peut-être exprimé en fonction de la diminution de la température de l'air qui donnerait le même effet rafraîchissant en air calme. Les valeurs extraites du *Guide pratique de ventilation - Woods*, valables pour des conditions moyennes d'humidité et d'habillement sont présentées dans le tableau I.3.

Chacun peut évaluer dans une certaine mesure l'effet rafraîchissant du mouvement de l'air en se référant à son expérience personnelle des brises légères en extérieur. Nous sommes tous familiers avec la sensation de fraîcheur procurée par une légère brise qui passe par une fenêtre lors d'une journée chaude.

Tableau I. 3.Le refroidissement lié à la vitesse de l'air – conditions estivales

Vitesse de l'air [m/s]	Refroidissement équivalent [°C]
0,1	0
0,3	1
0,7	2
1,0	3
1,6	4
2,2	5
3,0	6
4,5	7
6,5	8

La vitesse généralement désignée par "brise légère" est de l'ordre de 2,5 m/s. L'échelle de Beaufort des vents reproduite sur le tableau ci-dessous donne des vitesses des vents en km/h et en m/s.

Tableau I. 4.Force du vent à l'échelle Beaufort

Force du vent à l'échelle Beaufort n°	Nature du vent	Vitesse en m/s	Vitesse en km/h
0	Calme	-	-
1	Air léger	1.5	5.4
2	Brise légère	3	10.8
3	Brise douce	5	18
4	Brise modérée	7	25
5	Brise fraîche	9	32.4
6	Brise forte	11	39.6
7	Vent modéré	13	47
8	Vent frais	15	54
9	Vent fort	18	65
10	Grand vent	21	76
11	Tempête	28	100
12	Ouragan	45	160

I.7.2.7.Confort, activité métabolique et habillement

L'activité métabolique peut s'exprimer en watt par mètre carré de peau [W/m²], échelle de droite sur la figure I.12 ou en met. Un met correspond à une activité tranquille, en position assise, soit à 55 W/m2.

L'habillement correspond, du point de vue thermique, à une résistance à la perte de chaleur corporelle. Un clo correspond à une tenue de ville (complet veston), soit à une résistance thermique de 0,155 m2k/W.

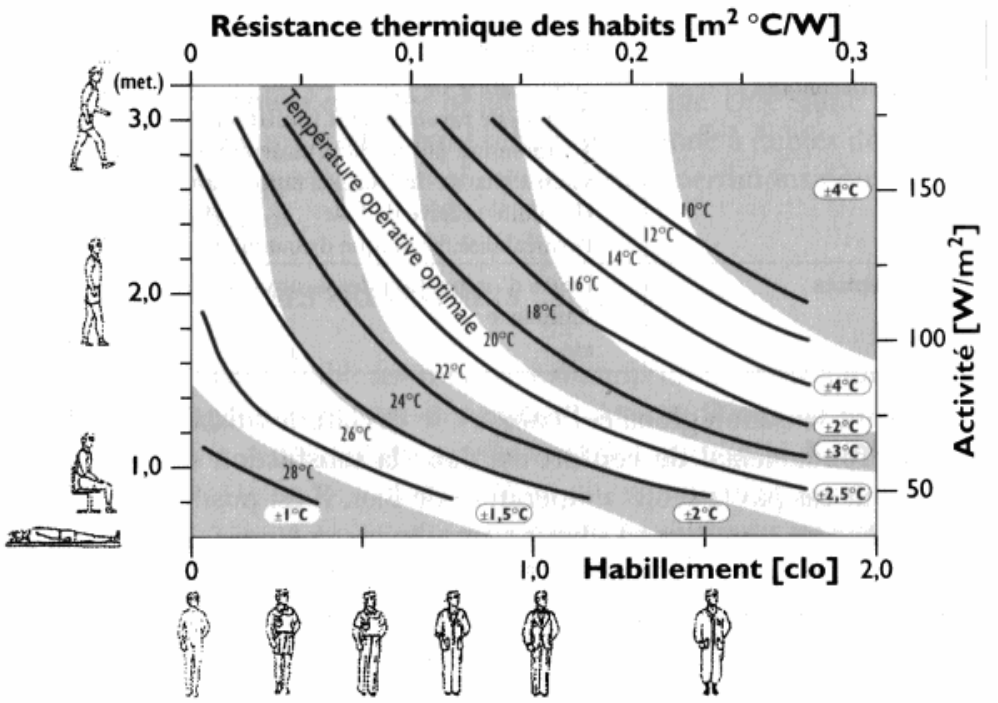


Figure I. 12. Température opérative idéale en fonction de l'habillement et de l'activité.

La température opérative est celle ressentie par les occupants. Elle est fonction des températures de l'air et des surfaces environnantes. Une température opérative donnée (par exemple 22°C) peut être obtenue de plusieurs manières. On remarque qu'en tenue d'hiver (1 clo), une personne assise (1 met) demande, en moyenne, une température opérative de 24°C. Cette température tombe à 18°C si cette personne a une activité plus grande (2 met), qui correspond à une activité de ménage. Une température de 20°C dans les habitations et les bureaux est raisonnable en hiver, si on admet que les occupants adaptent leur habillement à leur activité (on ajoute un pull-over si on lit dans un fauteuil, et on tombe la veste pour repasser le linge ou passer l'aspirateur).

En tenue d'été (0,5 clo), la température optimale est de 26°C pour les personnes tranquilles, et 22°C pour une activité courante. Il est donc inutile de refroidir (climatiser) les bâtiments en dessous de 24°C en été, et il est même inconfortable de les refroidir à 20°C.

Suivant sa sensation globale, la personne se déclarera ainsi satisfaite ou insatisfaite. Le critère fondamental de confort est donc la satisfaction des usagers. Il est possible de déterminer à l'avance les conditions à réunir pour obtenir une satisfaction maximum pour le confort thermique. Mais généralement, on peut dire que le confort thermique a lieu lorsque la quantité

de chaleur produite par le métabolisme est cédée à l'environnement, et lorsque l'on ne ressent aucune sensation ni de chaud ni de froid dans aucune partie du corps.

Finalement, et au vu de tous ces phénomènes calorifiques, on considère généralement que le confort thermique a lieu aux températures environnantes suivantes :

- En hiver : de 18°C à 23°C ;
- En été : de 22°C à 26°C.

Afin d'atteindre le confort thermique tout en étant éco-responsable énergétiquement, plusieurs solutions sont recommandées, dans ce qui suit nous allons étaler quelques solutions.

I.7.3. Les solutions techniques

Pour garantir un confort thermique tout en préservant l'efficacité énergétique du bâtiment, plusieurs solutions techniques peuvent être envisagées, qu'elles soient combinées ou utilisées individuellement. Ces solutions doivent garantir le confort aussi bien en hiver qu'en été. Pour cela, il est nécessaire de prévoir des équipements spécifiques à chaque saison ou d'opter pour des équipements polyvalents qui s'adaptent aux variations saisonnières.

Les propositions et les orientations techniques en matière d'efficacité énergétique et d'ER pour l'habitat tiennent compte à la fois des conceptions architecturales favorisant le confort thermique, de l'emploi d'équipements écoénergétiques, ainsi que des systèmes exploitant l'énergie solaire, qu'ils soient thermiques ou photovoltaïques.

I.7.3.1.Solutions passives

a) Conception architecturale bioclimatique

L'architecture bioclimatique a pour objectif d'adapter le bâtiment à son environnement, afin de tirer pleinement parti des apports solaires en hiver et de se protéger de la chaleur en été. Intégrée dans une approche de développement durable, elle repose sur un mode de conception visant à trouver le meilleur équilibre entre le bâtiment, le climat local et le confort thermique des occupants. Cette approche se base sur les principes suivants :

Minimiser les pertes énergétiques en s'adaptant au climat local : Cela implique de favoriser la compacité du bâtiment, d'assurer une isolation performante pour retenir la chaleur, et de limiter les ouvertures et surfaces vitrées sur les façades exposées au froid ou aux intempéries.

Favoriser les apports de chaleur naturelle en hiver : Cela nécessite de privilégier les ouvertures et les vitrages sur les façades exposées au soleil, de stocker la chaleur dans les matériaux de construction massifs, d'adopter des conceptions solaires favorisant le chauffage de l'air (comme les murs TROMBE, par exemple), et de prévoir des systèmes solaires pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire.

Maximiser l'apport de lumière naturelle : Pour cela, il faut intégrer des éléments transparents correctement positionnés dans l'enveloppe du bâtiment, et choisir des matériaux et des couleurs appropriés.

Favoriser le rafraîchissement naturel en été : Cela implique de prévoir des protections solaires fixes, mobiles ou naturelles (telles que des avancées de toiture ou de la végétation), de concevoir une ventilation naturelle susceptible de générer des courants d'air la nuit, et de sélectionner des matériaux ayant une inertie thermique adaptée.

En pratique, pour un projet d'équipements publics, il est recommandé de suivre une démarche chronologique, en respectant les étapes suivantes :

- **L'analyse du site :**

Cela implique de mener une analyse approfondie du site, en prenant en compte son environnement physique et naturel (comme le relief, les zones dégagées ou accidentées), son contexte urbain (avec les bâtiments adjacents, les ombres portées, etc.) et son climat (en tenant compte de l'ensoleillement, des vents, des températures, etc.).

De plus, il est essentiel d'utiliser un diagramme solaire spécifique à chaque emplacement, basé sur sa latitude, afin de déterminer la trajectoire du soleil à différents moments de la journée. Cela permettra aux concepteurs de préciser les besoins en ombrage et de choisir le type de systèmes de protection solaire appropriés.

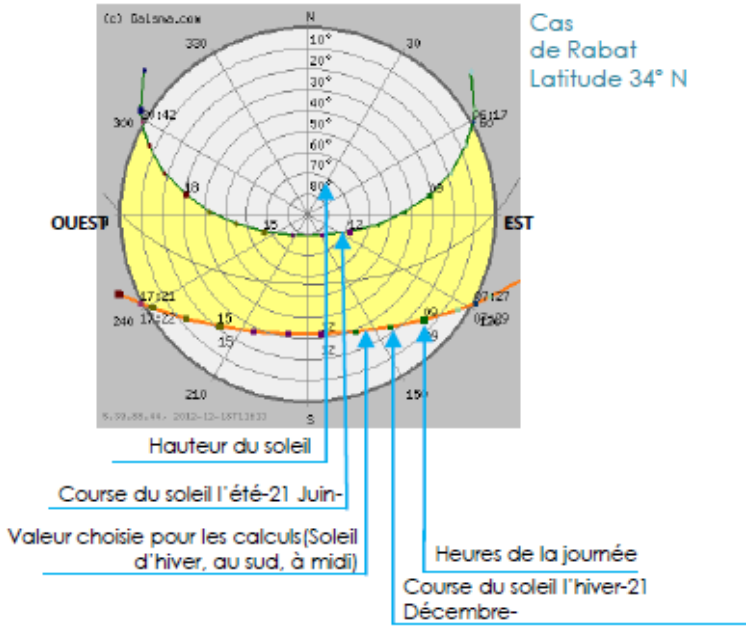


Figure I. 13. Exemple de diagramme solaire de la ville de rabat

D'utiliser le diagramme de GIVONI pour tirer des propriétés du site les grandes orientations architecturales.

- **L'orientation du bâtiment :**

L'orientation reste un facteur très important à considérer surtout pour la répartition des ouvertures et des pièces d'un bâtiment. Le bâtiment doit être orienté de façon à éviter les surchauffes estivales et limiter les déperditions hivernales. Les ouvertures doivent être orientées vers le sud avec une conception qui facilite le captage solaire passif en hiver et fournit une protection solaire adaptée pour l'été (pare-soleil). Orienter le logement au sud améliore l'éclairage naturel et diminue le besoin en éclairage artificiel.

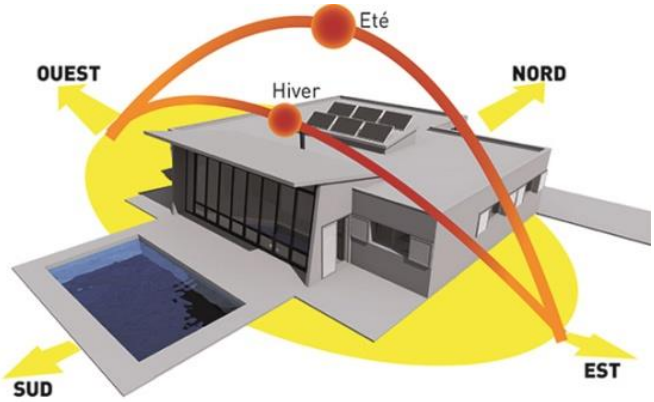


Figure I. 14. Principe de l'orientation du bâtiment - source : agence des énergies renouvelables et efficacité énergétique

- **L'organisation appropriée des espaces internes :**

Organiser les espaces de vie le long de la façade orientée vers le sud afin de minimiser les besoins en chauffage pendant la saison hivernale. Regrouper les zones humides et les espaces utilitaires (cuisine, buanderie, garage, salle de bains, rangements, etc.) du côté nord. Mettre en place des dispositifs d'ombrage (comme des protections solaires pour les ouvertures et/ou l'utilisation de végétation à feuilles caduques) pour protéger la façade sud en été.

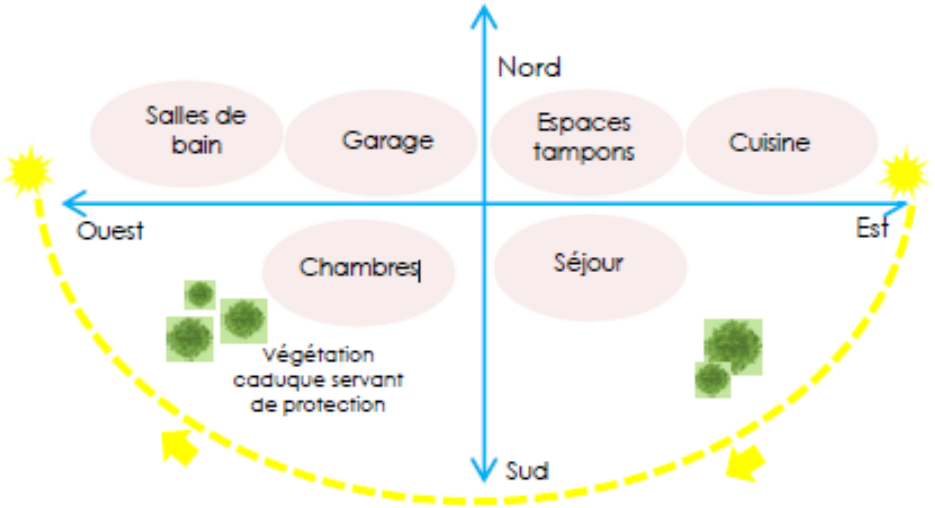


Figure I. 15.. Principe de répartition des espaces.

- **Le dimensionnement et l'emplacement des ouvertures :**

Diminuer les dimensions des ouvertures du côté est, ouest, et surtout du nord, afin de restreindre l'entrée d'air froid en hiver.

Installer de vastes ouvertures au sud, car elles permettent au rayonnement solaire de pénétrer en hiver et peuvent être aisément protégées en été.

Envisager la mise en place d'un pare-soleil. En ce qui concerne les dispositifs supplémentaires pour protéger les ouvertures, il est recommandé de choisir un brise-soleil orientable ou des stores.

- **La végétation adaptée :**

Choisir des plantes à feuilles caduques pour optimiser les gains solaires en hiver et les réduire en été. Ces végétaux contribuent à la ventilation, au stockage et à la distribution de la chaleur. Parmi les exemples d'arbres et d'arbustes à feuillage caduque, on peut citer le jacaranda, le murier, le catalpa, le micocoulier, le platane, le tipuanatipu, ainsi que la vigne, l'acer, l'albizia et le carpinus..

- **La compacité du bâtiment :**

Le choix de la compacité du bâtiment revêt une grande importance pour la réduction de la consommation énergétique. La compacité est déterminée par le coefficient de forme, c, qui correspond à la division de la surface totale de la façade et de la toiture par le volume total du bâtiment. Un coefficient de forme plus bas indique un bâtiment plus compact et donc une consommation d'énergie moindre. Ainsi, il est préconisé de privilégier un coefficient de forme inférieur à 0,70 m^2/m^3 (à titre indicatif) pour éviter les pertes thermiques à travers les surfaces de l'enveloppe en hiver et pour limiter la consommation de chauffage. De plus, il est recommandé de concevoir des constructions qui maximisent, dans la mesure du possible, les constructions mitoyennes, afin d'accroître la compacité et de réduire les pertes d'énergie pendant la saison hivernale. En effet, pour un même volume habitable, les déperditions thermiques sont proportionnelles aux surfaces de l'enveloppe, d'où l'objectif de les minimiser. De surcroît, la forme idéale d'une enveloppe serait celle qui permettrait de perdre un minimum de chaleur en été et d'en gagner un minimum en hiver. La configuration allongée dans la direction est-ouest donne les meilleurs résultats.

b) Matériaux et procédés de construction

L'évaluation de l'enveloppe extérieure du bâtiment doit se concentrer sur les propriétés physiques et thermiques des matériaux ainsi que sur les méthodes de construction utilisées pour les éléments suivants : les murs extérieurs et leurs ouvertures, y compris les vitrages, le plancher bas, la toiture-terrasse, ainsi que l'isolation thermique de ces surfaces.

- **L'inertie thermique :**

Opter judicieusement pour des matériaux de construction favorisant une bonne inertie thermique globale du bâtiment, ce qui permet un déphasage thermique plus efficace. Par exemple, les matériaux en terre tels que le pisé, l'adobe et la brique de terre cuite offrent d'excellentes propriétés thermiques, ainsi qu'une importante capacité d'inertie thermique et un temps de déphasage prolongé. Par exemple, un mur en terre de 35 cm d'épaisseur présente un temps de déphasage de 10 heures à 11 heures pour une épaisseur de 40 cm, et de 12 heures pour 43 cm. Ce déphasage temporel atténue les variations de température quel que soit la saison. Dans les zones climatiques caractérisées par des variations de température importantes, il est recommandé d'utiliser des toitures et des murs lourds et épais. Cela contribue de manière significative au confort thermique des bâtiments et à la conservation de l'énergie.

- **L’isolation thermique de l’enveloppe :**

L’isolant doit respecter au minimum les exigences du RGCPE. Le produit isolant doit être aussi choisi en fonction les possibilités de son utilisation dans le bâtiment. Le tableau I.5 des choix de l’isolant en fonction des parois. Un bon isolant doit être rigide et/ou dense (au moins 30 à 40 kg/m3) pour ne pas se tasser et avoir ainsi une bonne tenue dans le temps.

Tableau I. 5. Choix de l'isolant en fonction de la paroi, source : les fiches produites du guide de l’isolation, AMEE

Types d'isolants	Murs	Planchers	Toitures	Sous-sols
Laine de verre	Oui	Oui	Oui	Non
Laine de roche	Non	Oui	Oui	Non
Polystyrène expansé (EPS)	Oui	Oui	Oui	Oui
Polystyrène extrudé (XPS)	Oui	Oui	Oui	Oui
Polyuréthane	Oui	Oui	Oui	Oui
Laine de chanvre	Oui	Oui	Oui	Non
Perlite expansée	Non	Oui	Non	Non
Liège expansé	Oui	Oui	Oui (panneaux)	Oui
Ouate de cellulose	Oui	Non	Oui	Non
Laine de mouton	Oui	Oui	Non	Non

Le tableau I.6 résume des propriétés fondamentales des matériaux les plus utilisés.

Ce sont le polystyrène expansé, le liège, la laine de verre, qui présentent, en fonction de leurs coûts, les matériaux isolants les plus utilisés au Maroc. Aussi Il faut veiller à ne pas avoir de rupture dans l'isolation (pont thermique). Chaque pont thermique doit être traité de manière à assurer la continuité de l'isolation. Une isolation ne doit jamais être exécutée sur une paroi présentant des signes d'humidité.

- **Ventilation**

L'isolation doit être associée à une ventilation bien conçue qui peut être naturelle ou assistée mécaniquement. Si la ventilation naturelle n'est pas suffisante l'installation d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC) est nécessaire. Elle peut être soit simple flux soit double flux. La version double flux présente une excellente Efficacité Énergétique.

Tableau I. 6. Propriétés des matériaux d'isolation les plus utilisés au Maroc, source : Guide de l'isolation, AMEE

ISOLANT THERMIQUE	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE	RÉSISTANCE A LA VAPEUR D'EAU	RÉSISTANCE A LA COMPRESSION	DENSITÉ	COMPORTEMENT AU FEU	PRIX	COÛT DE MISE EN ŒUVRE
	W/m.K	μ	kPa	kg/m³	classe	DH/m²	DH/m²
Laine de roche	0,034-0,050	0,8-2,2	50-100	20-150	A	80-90	20-25
Laine de verre	0,034-0,050	1-4	20-50	15-60	A	60-90	20-25
Polyuréthane	0,022-0,030	20-80	80-200	30-50	B	60-100	20-40
Polystyrène extrudé	0.028-0,036	60-200	150-700	30-50	E	50-80	10-20
Polystyrène expansé	0.032-0,050	20-80	20-80	15-25	E	30-70	10-20
Liège	0.032-0,050	10-15	10-20	80-140	E	60-90	20-25
Perlite expansée	0,045-0,050	5-10	20-40	90-170	A	60-90	20-25
Fibre de chanvre	0,039-0,045	1-2	10-20	20-50	E	75-100	20-25
Laine de mouton	0,039-0,045	1-2	10-20	35-85	E	80-100	20-25
Ouate de cellulose	0,039-0,055	1-2	5-25	30-50	B	40-80	30-50

- **Ouvertures de qualité thermique et énergétique appropriées :**

  - **Vitrage :**

Plus de 15 % des pertes thermiques sont dues aux parois vitrées, ce qui souligne l'importance de leur isolation thermique et de leur protection solaire :

Il est recommandé de privilégier un double vitrage doté d'un faible coefficient de transmission thermique U, associé à une lame d'air. Un choix courant est le double vitrage ordinaire de type 4/12/4, dont la valeur U est estimée à 3 W/m².°K. En comparaison, un vitrage simple de 4 mm affiche une valeur U de 5,8 W/m².°K. Des performances thermiques supérieures peuvent être atteintes avec un double vitrage de type 4/14/4 ou 4/16/4 à isolation renforcée, équipé d'un revêtement "faiblement émissif" et d'une lame d'argon. Le coefficient U varie alors de 1,5 à 1,9 W/m².°K.

Le choix d'un double vitrage doit également prendre en compte le facteur solaire (FS en %), qui devrait se situer en moyenne entre 60 et 70 %, en fonction des résultats des simulations. Ce facteur solaire dépend de plusieurs facteurs, tels que l'orientation des façades, la surface relative des ouvertures, le système de protection solaire et la zone climatique.

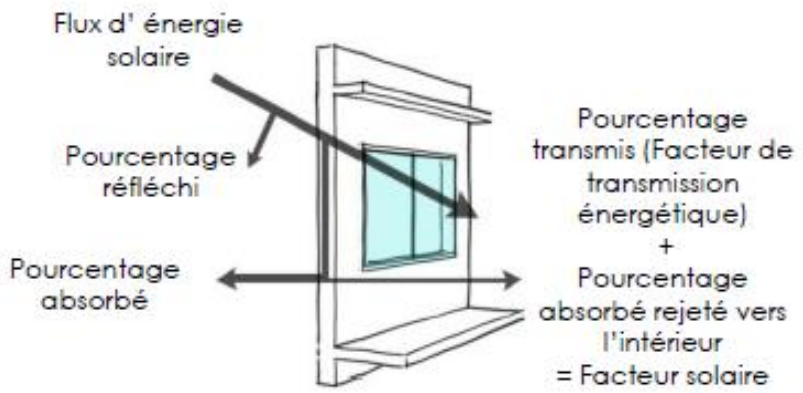


Figure I. 16. La transmission solaire à travers les ouvertures

- **Menuiserie:**

Le choix se pose entre différentes options :

- Opter pour des menuiseries en bois, qui offrent des performances assez satisfaisantes en termes d'isolation thermique. Cependant, il est important de noter qu'elles demandent un entretien plus fréquent par rapport à d'autres matériaux.
- Sélectionner des menuiseries en aluminium. Bien qu'elles présentent des ponts thermiques en raison de la conductivité de ce matériau, il est possible de remédier à cette situation en installant des rupteurs isolants, généralement sous forme de barrettes en plastique, à la fois sur l'ouvrant et le dormant.
- Opter pour des menuiseries en PVC, qu'elles soient coulissantes ou ouvrantes. Ce matériau n'est pas sujet aux problèmes de ponts thermiques.

- **Protections solaires :**

Privilégier l'utilisation de dispositifs de protection solaire tels que des volets (volets roulants, lames réglables) ou des stores intérieurs. Ces solutions permettent, en périodes de chaleur, de réduire au maximum l'impact du rayonnement solaire et de prévenir les surchauffes.

I.7.3.2.Solutions actives

Il existe un large éventail d'équipements et de systèmes qui contribuent à rendre un logement plus économe en énergie. L'étiquetage énergétique offre une évaluation de la consommation électrique d'un appareil en kilowattheures, en utilisant une échelle allant de A pour les appareils les plus économes à G pour les moins économes. Trois nouvelles catégories d'efficacité énergétique, A+, A++ et A+++, viennent compléter cette échelle.

a) Appareils électroménagers peu consommateurs d'électricité :

Il est recommandé de privilégier l'achat de machines à laver, de lave-vaisselles, de fours, de réfrigérateurs, de congélateurs et de sèche-cheveux appartenant aux premières classes de l'étiquetage énergétique, afin de minimiser leur consommation énergétique. Il est ainsi judicieux de favoriser l'utilisation d'appareils dont la classe de consommation d'électricité dépasse la catégorie A.

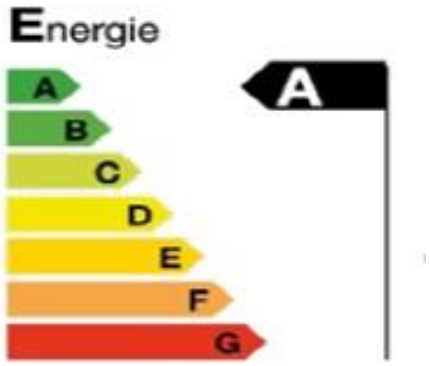


Figure I. 17. Étiquette-énergie

Suivre scrupuleusement les directives d'utilisation et d'entretien recommandées par les fabricants pour ces équipements. Faire preuve de discernement dans l'utilisation des téléviseurs et des ordinateurs, même s'ils ont une faible consommation d'électricité, en les mettant par exemple en veille lorsque cela est possible.

b) Le mode d'éclairage économe :

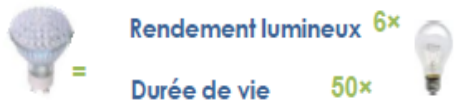
Pour un même niveau de confort visuel, les lampes fluo-compactes à basse consommation (LBC) et les LEDs consomment moins d'électricité et ont une durée de vie considérablement plus longue que les lampes à incandescence. De plus, les LBC offrent des avantages supplémentaires, comme une émission de chaleur réduite.

Tableau I. 7. Puissance des lampes

Équivalence entre lampes	Puissance en W		
Incandescence	40	60	75
Fluo compactes LB C	8	11	15



En ce qui concerne les lampes à diode électroluminescente, communément appelées lampes à LED (acronyme de l'anglais "Light-Emitting Diode") sont conçues pour produire de la lumière dans des gammes de longueurs d'onde spécifiques, les LED sont typiquement conçues pour émettre de la lumière dans le spectre visible, en général, elles ne génèrent pas de lumière ultraviolette (UV) ni dans l'infra-rouge (IR).



En résumé :

- Les lampes fluorescentes sont de classe « A » ou « B »;
- Les lampes à incandescence halogène sont de classe « C » ou « D»;
- Les lampes à incandescence standard sont de classe « E », « F » ou « G ».

c) Chauffe-eau solaire

Les chauffe-eaux solaires de type thermosiphon sont des systèmes simples et fiables adaptés à une grande variété d'applications. Ils se composent de capteurs solaires thermiques, d'un ballon de stockage d'eau (pouvant être horizontal ou vertical) situé au-dessus du capteur solaire, ainsi que de quelques composants hydrauliques. La circulation de l'eau s'effectue de manière naturelle grâce à la différence de densité entre le ballon et le capteur solaire : l'eau du capteur solaire, plus chaude et donc moins dense, remonte vers le haut du ballon, où l'eau est plus dense. Dans les régions très froides, sujettes à des chutes de neige et susceptibles de geler (comme Ifrane, Khénifra, Midelt, El Hajeb), il est recommandé d'équiper le ballon d'un échangeur de chaleur en circuit fermé, qui utilise des capteurs solaires contenant un fluide caloporteur antigel. Pour optimiser la capture de l'énergie solaire, il est conseillé de :

- Orienter les capteurs solaires vers le sud, avec une tolérance maximale de 10 degrés.
- Incliner les capteurs solaires par rapport à l'horizontale avec un angle correspondant à la latitude du lieu.

d) L'entretien des équipements

Un manque d'entretien a un impact négatif sur la consommation d'énergie et peut entraîner des risques d'accidents, comme en témoignent les exemples suivants :

Dans le cas de la production d'eau chaude sanitaire par un ballon électrique, des surconsommations d'électricité et des surchauffes dangereuses sont fréquentes lorsqu'il y a des problèmes de qualité au niveau de la résistance électrique et du thermostat de contrôle de la température du ballon. De plus, le type et l'épaisseur de l'isolation thermique de l'enveloppe du ballon ont également un impact sur la consommation d'électricité.

Pour les chaudières d'eau chaude à tubes de fumées, l'entartrage autour des tubes de fumées ainsi que le type et l'épaisseur de l'isolation thermique du corps de la chaudière sont des facteurs cruciaux qui influent directement sur son rendement.

e) L'utilisation de l'internet

Autre source méconnue de consommation électrique (et donc de pollution) : l'utilisation d'Internet. Contrairement à ce que l'on pourrait spontanément penser, utiliser Internet est loin d'être 100% green.

Adopter de bonnes pratiques sur Internet permet aussi de réduire la consommation d'énergie, dans les établissements, mais aussi au niveau des serveurs. Supprimer régulièrement ses e-mails, éviter les pièces jointes lourdes et systématiques dans les e-mails, ainsi que les transferts de mail à toute l'établissement quand ce n'est pas nécessaire, sont autant de moyen de réduire la facture. Certaines pratiques simples sur le Web permettent d'optimiser sa navigation : passer par la barre d'adresse plutôt que par Google lorsqu'on veut accéder à un site par exemple.

Au total, près de 72 éco-gestes et bonnes pratiques ont été regroupées dans un guide par greenit.fr, le spécialiste des technologies informatiques plus vertes. Ce guide donne des pistes pour l'utilisation du matériel, d'Internet, la gestion des déchets, mais aussi la gouvernance.

L’ADEME a aussi proposé son guide pratique en 29 actions, pour réduire l’impact environnemental de l’informatique au bureau.

I.7.4. Solutions managériales

I.7.4.1. Mesures d’accompagnement pour la mise en œuvre

Il est crucial de prendre des mesures complémentaires pour promouvoir efficacement la maîtrise de l'énergie au Maroc. Cela comprend notamment :

a) Mise en place de mesures financières et fiscales incitatives pour encourager l'adoption de techniques d'efficacité énergétique :

- Prise en charge des surcoûts liés à l'acquisition d'équipements énergétiquement performants, avec une répartition concertée entre l'État, les promoteurs et les acquéreurs.
- Continuation de la défiscalisation des matériaux et matériels utilisés pour l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables pour les opérateurs publics et privés.
- Création d'un fonds de soutien pour les études spécifiques d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables ainsi que pour l'adoption de l'architecture bioclimatique.
- Mise en place de mesures de défiscalisation pour les particuliers concernant les équipements d'efficacité énergétique et les appareils électroménagers économes en énergie.
- Octroi de crédits à des taux préférentiels pour l'acquisition de logements à faible consommation d'énergie, tant pour les promoteurs que pour les particuliers.

b) Intégration de modules de formation sur les référentiels techniques et réglementaires de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables dans les programmes de formation continue pour les professionnels du secteur de la construction.

c) Inclusion des critères d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables dans le processus d'instruction des demandes d'autorisation de construire, avec l'établissement d'un canevas pour l'évaluation des mesures proposées.

d) Veiller au respect des dispositions du décret 2-13-874 du 14 novembre 2013 concernant les règles énergétiques des constructions et la création de la commission nationale de l'efficacité énergétique.

e) Instauration d'une accréditation pour les bureaux d'études et de contrôle spécialisés en efficacité énergétique et énergies renouvelables, garantissant leur expertise pour les projets bénéficiant de soutiens financiers.

f) Assurer la formation et la sensibilisation de tous les acteurs impliqués dans la construction (chefs de chantier, maçons, plombiers, électriciens, producteurs de matériaux de construction) pour intégrer des composantes d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables dans leurs travaux.

g) Mener des campagnes de sensibilisation auprès de la population pour encourager des comportements favorables à la maîtrise de l'énergie, tels que encourager la limitation du chauffage à 18°C et de la climatisation à 26°C, ainsi que l'optimisation de l'ouverture des fenêtres et des portes en fonction des besoins saisonniers.

I.7.4.2.Sensibilisation

Il est toujours judicieux de faire un bon choix lors de l'acquisition des équipements en favorisant ceux a haute efficacité énergétique : classe A, A+ et A++, toutefois une mauvaise utilisation, peut influencer la consommation dans équipement efficace.

Dans ce contexte la sensibilisation trouve sa raison, il est important d'établir des plans d'action de sensibilisation aux bons pratiques d'usage des dites équipements.

Des affiches peuvent être collé sur les endroits par les quelle passe les fonctionnaires et dans les endroits ou une surconsommation peut être perçue (les sanitaires, les bureaux…),

La figure I.18 donne un exemple d'une affiche à suspendre dans les des portes des bureaux et les portes des sanitaires.



Figure I. 18. Affiche de sensibilisation

I.7.4.3.Comportement de l'utilisateur et solutions quick wins

La particularité de l'utilisateur des bâtiments publics est qu'il est peu averti et surtout non payeur. Des mesures automatiques doivent être prise tel que la détection de présence, la coupure d'électricité après l'horaire du travail, l'extinction à la source des systèmes de climatisation après l'horaire du travail, et en période confortable, d'autres mesures pour le contrôle tel que les compteurs séparés et l'affichage des consommations par département.

Les « Quick wins ». Sont des solutions peu coûteuses et faciles à mettre en œuvre.

Les « Quick wins » accélèrent le changement du comportement de l'utilisateur, et quelque fois elle le remplace en agissant à sa place.

La mise en place de temporisateurs pour l'éclairage, la programmation de la climatisation 1C plus au moins, l'affichage des consommations mensuelles sont tous des actions comme peut classer de « Quick wins ».

Conclusion du chapitre

Ce chapitre fournit une vision claire et détaillée des initiatives d'efficacité énergétique dans les bâtiments publics au Maroc, mettant en lumière l'importance stratégique de cette question dans le contexte énergétique actuel du pays. Le Maroc, bien qu'ayant une forte dépendance aux combustibles fossiles importés, a identifié l'efficacité énergétique comme un moyen essentiel de réduire cette dépendance, en particulier dans le secteur du bâtiment qui est un consommateur majeur d'énergie. Les efforts déployés par le gouvernement pour intégrer l'efficacité énergétique dans la stratégie nationale sont palpables, en particulier avec l'introduction d'une réglementation sur les performances énergétiques. Toutefois, il existe encore des obstacles à surmonter, notamment en ce qui concerne la mise en œuvre effective de ces réglementations. Le chapitre insiste également sur l'importance d'une mise en œuvre à grande échelle de solutions techniques, et la nécessité d'un financement adéquat. Il conclut en soulignant l'importance des aspects managériaux pour garantir des améliorations durables en matière d'efficacité énergétique, tout en mettant en perspective les réalisations actuelles et les défis à venir.

Alors que nous concluons ce chapitre qui expose des fondements théoriques et généraux, il est essentiel de se tourner vers l'application pratique de ces connaissances et solutions dans un contexte pratique. Le chapitre suivant s'intéresse ainsi à la politique de maîtrise de l'énergie dans les marchés publics de bâtiments à travers l'étude du processus de maîtrise d'ouvrage déléguée, en se focalisant sur le cas du Maroc. Il vise à appliquer et à confronter les concepts, les stratégies et les solutions exposés dans ce chapitre au contexte spécifique des marchés publics marocains de bâtiments. Cette analyse permettra de mettre en lumière les opportunités et les défis spécifiques liés à l'implémentation de l'efficacité énergétique dans les projets de construction publics, et d'offrir des perspectives et recommandations concrètes pour optimiser la performance énergétique dans ce secteur crucial.

Références du chapitre

Agostino, D., Cuniberti, B., Bertoldi, P., 2017. Energy consumption and efficiency technology measures in European nonresidential buildings. Energy Build. 1–41. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.062.

Alhamwi, A., Kleinhans, D., Weitemeyer, S., Vogt, T., 2015. Moroccan National Energy Strategy reviewed from a meteorological perspective. Energy Strategy Rev. 6 (1), 39–47. https://doi.org/10.1016/j.esr.2015.02.002.

Boharb, A., Allouhi, A., Saidur, R., Kousksou, T., Jamil, A., Mourad, Y., Benbassou, A., 2016. Auditing and analysis of energy consumption of an industrial site in Morocco. Energy 101 (1), 332–342. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.035.

Chami, A., 2020. Annual Report.

Costacampi, M., Garcíaquevedo, J., Segarra, A., 2015. Energy efficiency determinants: an empirical analysis of Spanish innovative firms. Energy Pol. 83 (1), 229–239. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.01.037.

Dépendance énergétique du Maroc: Le taux chute à 88% en 2020. https://fnh.ma/article/actualites-marocaines/dependance-energetique-du-maroc-le-taux-chute-a-88-en-2020.

Dongmei, S., 2018. Research and application of energy consumption benchmarking: method for public buildings based on actual energy consumption. Energy Proc. 152 (1), 475–483. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.256.

Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., Agostino, D., Zangheri, P., Castellazzi, L., 2020. Energy & Buildings Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. Energy Build. 225 (1), 1–20. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322.

El Iysaouy, L., El Idrissi, N., Tvaronavičienė, M., Lahbabi, M., Oumnad, A., 2019. Towards energy efficiency: case of Morocco. Insights Reg. Dev. 1 (3), 259–271. https://doi.org/10.9770/ird.2019.1.3(6).

Font, J., 2019. The integration of energy efficiency measures in construction in the context of the objectives of the EU's 20202030 Horizons: district heating and cooling networks. RCDA 1 (1), 1–55. https://doi.org/10.17345/rcda2433_1.

Garcia, D., Cumo, F., Tiberi, M., Sforzini, V., 2016. Costbenefit analysis for energy management in public buildings: Four Italian case studies. Energies 9 (522), 1–17. https://doi.org/10.3390/en9070522.

Hamdaoui, S., Mahdaoui, M., Allouhi, A., Alaiji, R., Kousksou, T., Bouardi, A., 2018. Energy demand and environmental impact of various construction scenarios of an office building in Morocco. J. Clean. Prod. 1–39. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.298.

Hamza, N., Greenwood, D., 2009. Energy conservation regulations: impacts on design and procurement of low energy buildings. Build. Environ. 44 (5), 929–936. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.010.

Hani, A., Koiv, T.A., 2012. Energy consumption monitoring analysis for residential, educational and public buildings. Smart Grid Renew. Energy 3 (1), 231–238. https://doi.org/10.4236/sgre.2012.33032.

IEA (2023), Global energy investment in clean energy and in fossil fuels, 2015-2023, IEA, Paris https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-investment-in-clean-energy-and-in-fossil-fuels-2015-2023, IEA. Licence: CC BY 4.0

IEA. (2019a). Energy Efficiency program for public buildings. Policies. Retrieved from https://www.iea.org/policies/8575-energy-efficiency-program-for-public-buildings.

IEA. (2019b). Energy policies beyond IEA countries.

IEA. (2019c). International Energy Agency publishes new review of Morocco's energy policies. News. Retrieved from https://www.iea.org/news/international-energy-agency-publishes-new-review-of-moroccos-energy-policies.

IEA. (2021). Energy-related CO2 emissions from buildings have risen in recent years. In Buildings: A Source of Enormous Untapped Efficiency Potential. Retrieved from https://www.iea.org/topics/buildings.

Khatib, N., 2018. Country Profile: Morocco 2018.

La centrale solaire Noor Ouarzazate. https://sudestmaroc.com/la-centrale-solaire-noor-ouarzazate/

Lang, S., 2004. Progress in energyefficiency standards for residential buildings in China. Energy Build. 36 (1), 1191–1196. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.09.014.

Le Coz, C., Maurel, J., 2019. L'efficacité énergétique, principal axe de la révolution du bâtiment. Investir J. Des Finances 2392, 18–19. https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bsu&AN=139592805&lang=fr&site=ehostlive.

Liu, G., Wu, Z., Hu, M., 2012. Energy consumption and management in public buildings in China: an investigation of Chongqing. Energy Proc. 14 (2011), 1925–1930. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.887.

Lopezochoa, L., Bobadillamartínez, D., Lasherascasas, J., Lopezgonzalez, L., 2019. Towards nearly zeroenergy educational buildings with the implementation of the Energy Performance of Buildings Directive via energy rehabilitation in cold Mediterranean zones: the case of Spain. Energy Rep. 5 (1), 1488–1508. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.008.

Ma, H., Li, C., Lai, J., Yang, F., Zihao, L., 2019a. Analysis of school building energy consumption in Tianjin, China. Energy Proc. 158 (1), 3476–3481. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.924.

Merini, I., MolinaGarcía, A., GarcíaCascales, M., Mahdaoui, M., Ahachad, M., 2020. Analysis and comparison of energy efficiency. Energies 13 (5979), 1–21. https://doi.org/10.3390/en13225979.

Nourdine, B., Saad, A., 2020. About energy efficiency in Moroccan health care buildings. Mater. Today Proc. 1–7 https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.135.

Pan, W., Garmston, H., 2012. Building regulations in energy efficiency: compliance in England and Wales. Energy Pol. 45 (2012), 594–605. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.010.

Salvalai, G., Masera, G., Sesana, M., 2015. Italian local codes for energy efficiency of buildings: theoretical definition and experimental application to a residential case study. Renew. Sustain. Energy Rev. 42 (1), 1245–1259. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.038.

Simelyte, A., 2020. Promotion of renewable energy in Morocco. In: Energy Transformation towards Sustainability. Elsevier, pp. 249–287. https://doi.org/10.1016/B9780128176887.000136.

Tolónbecerra, A., Lastrabravo, X., Fernandez, V., 2013. Opportunities in Spanish energy efficiency: current situation, trends and potential in the building sector. Energy Proc. 42 (1), 63–72. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.006.

Yanping, F., Yong, W., Changbin, L., 2009. Energyefficiency supervision systems for energy management in large public buildings: necessary choice for China. Energy Pol. 37 (1), 2060–2065. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.033.

Chapitre II : La maîtrise de l'énergie dans les bâtiments publics à travers l'analyse du mécanisme de la maîtrise d'ouvrage déléguée au Maroc.

Résumé

Ce travail tente d'établir une nouvelle méthode pour atteindre l'efficacité énergétique dans les bâtiments publics en intégrant cet aspect dans le mécanisme de suivi et de contrôle qui délivrent ce type de bâtiments au Maroc ; à savoir, la maîtrise d'ouvrage déléguée.

À travers des enquêtes auprès d'experts, nous avons proposé d'analyser le processus de ce mécanisme, de le modéliser, et de mettre en évidence les différentes actions et politiques par lesquelles l'efficacité énergétique peut être intégrée ou améliorée dans son processus.

Introduction du chapitre

Face à un contexte mondial marqué par le changement climatique, la sécurité énergétique et le développement économique, l'efficacité énergétique des bâtiments publics émerge comme une priorité indiscutable. Ces structures, perçues comme des modèles d'exemplarité, ont le devoir de contribuer activement à la lutte contre les défis environnementaux et énergétiques. Néanmoins, des études, notamment celles de Garcia et al. (2016) et Ruiz et al. (2017), ont souligné des problèmes récurrents de haute consommation énergétique dans ces bâtiments. Zhao et al. (2012) ont de leur côté évoqué un potentiel d'économie d'énergie significatif dans ce domaine. Les immeubles de bureaux gouvernementaux et les grands bâtiments publics consommant beaucoup d'énergie, présentent un potentiel d'économies d'énergie et d'amélioration de l'efficacité énergétique (**Dongmei, 2018 ; Liu et al., 2012 ; Ma et al., 2019a; Yan-ping et al., 2009**). La directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments stipule que: "Les bâtiments occupés et détenus par les autorités publiques doivent être convertis en bâtiments à énergie quasi nulle en 2018" (2010/31/UE). (**Yan-ping et al., 2009)** ont déclaré que l'EE dans le grand secteur public peut réduire les coûts du cycle de vie des bâtiments et les impacts environnementaux négatifs.

Confronté à ces défis, le Maroc, pays en pleine expansion, doit adresser des enjeux énergétiques conséquents. La quête d'une meilleure efficacité énergétique pour les bâtiments publics se positionne donc au cœur des politiques énergétiques marocaines. Toutefois, malgré une abondante littérature sur les différentes politiques d'efficacité énergétique, la promotion de cette efficacité à travers le mécanisme de la maitrise d'ouvrage déléguée des bâtiments publics a été négligée. Après avoir exploré le cadre global de l'efficacité énergétique dans le chapitre précédent, ce chapitre se focalisera spécifiquement sur les bâtiments publics. S'appuyant sur des enquêtes auprès d'experts, nous visons à définir une approche novatrice pour améliorer l'efficacité énergétique, répondant à la question cruciale : quelles sont les actions clés pour une énergie durable dans les bâtiments publics au Maroc ?

Nous aspirons à ce que les conclusions de ce travail fournissent un guide clair aux autorités marocaines, démontrant comment réaliser les ambitions énergétiques sans avoir recours systématiquement à des mesures techniques supplémentaires, mais en adoptant plutôt une stratégie judicieuse. Ainsi, ce chapitre sera articulé de la manière suivante : une revue de la littérature, une présentation de la méthodologie, une synthèse et analyse des résultats, une discussion autour de ces derniers, et enfin, une conclusion proposant des recommandations et esquissant des perspectives futures de recherche.

II.1. Revue de la littérature

II.1.1. Aperçu de la consommation d'énergie des bâtiments publics

En Europe, les bâtiments non résidentiels, qui comprennent les bâtiments non gouvernementaux, les bureaux, les installations commerciales, les installations gastronomiques, les installations sanitaires, les installations éducatives, les bâtiments industriels et les bâtiments publics, représentent en moyenne 25 % de la consommation d'énergie du parc immobilier européen total (**Agostino et al., 2017**). Les bâtiments publics

(PB)[11] constituent un type de bâtiments non résidentiels, contiennent des bureaux, des hôtels, des commerces, des hôpitaux et des écoles (**Xu & Chan, 2013**). Ils se distinguent par leur grande consommation d'énergie totale et leur forte intensité de consommation d'énergie (**Dongmei, 2018**). En outre, la France a affirmé que les BP sont très énergivores (**ADEME, 2009**).

En Chine, les PB représentent 18% de la surface totale des bâtiments (10,765 milliards de mètres carrés sur 59,193 milliards de mètres carrés). En 2015, la consommation totale d'énergie des bâtiments en Chine était de 857 millions de tonnes de charbon standard, soit 19,93% de la consommation totale d'énergie du pays, dont les PB consommaient 292 millions de tonnes de charbon standard, soit 34% de la consommation totale d'énergie des bâtiments (**Ma et al., 2019a**) et (**Ma et al., 2019b**). Ce chiffre confirme que les bâtiments publics représentent une part importante de la consommation d'énergie des bâtiments en Chine. La consommation énergétique globale moyenne par valeur de surface de bâtiment de 50 PB était de 26,34 kgce/(m^2.a). Cependant, la consommation d'énergie des bâtiments publics est influencée par la fonction du bâtiment, le type de source de refroidissement et de chauffage, la structure de la construction et la performance de l'enveloppe du bâtiment (**Ma et al., 2019b**).

Hani & Koiv (2012) ont mené une étude pour évaluer la consommation énergétique des bâtiments résidentiels, éducatifs et publics. Ils ont remarqué la grande variété de la consommation d'énergie dans l'échantillon ciblé de 44 BP. Deux types de BP ont été trouvés, qui sont : les très vieux bâtiments du patrimoine culturel et les nouveaux bâtiments de bureaux. Dans les nouveaux immeubles de bureaux, la consommation d'énergie électrique représentait 70 % de la consommation totale d'énergie, les plus gros consommateurs d'énergie électrique étant les systèmes de refroidissement et les salles de serveurs (**Hani & Koiv, 2012**).

Au Maroc, le secteur du bâtiment est actuellement le deuxième secteur économique le plus énergivore ; après le secteur des transports. Il représente 33% de la consommation énergétique totale du pays (25% pour le secteur résidentiel et 8% pour le secteur tertiaire) (**Merini et al., 2020**).

II.1.2. Place de l'Efficacité Énergétique dans les Bâtiments Publics au Maroc : Enjeux et Perspectives

La demande d'énergie augmente dans le monde entier en raison de la croissance démographique, ainsi que de l'industrialisation et du processus de développement urbain (**El Iysaouy et al., 2019**). ~~Au Maroc,~~ les secteurs du bâtiment et de la construction sont responsables, ensemble, de plus d'un tiers de la consommation finale d'énergie dans le monde et de près de 40 % du total des émissions directes et indirectes de CO2 , selon l'Agence internationale de l'énergie (**AIE, 2021**). Les bâtiments sont une partie essentielle de la vie sociale, dans laquelle les gens passent une fraction importante de leur temps et consomment une grande quantité d'énergie (**Ruiz et al., 2017**). Ainsi, l'efficacité énergétique des bâtiments devient un objectif primordial de la politique énergétique aux niveaux régional, national et international (**Pan et Garmston, 2012**). **Zhao et al. (2012)** ont déclaré que le phénomène de forte consommation d'énergie et de faible efficacité énergétique des bâtiments publics est

[11] Bâtiments publics (BP)

commun, ce qui signifie qu'il existe un grand potentiel d'économie d'énergie dans les bâtiments publics. Par conséquent, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments publics est l'une des principales stratégies à l'échelle nationale et internationale pour des bâtiments respectueux de l'environnement, et la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz connexes, avec les économies économiques qui en découlent (**Garcia et al., 2016 ; Ruiz et al., 2017**). Malgré ce potentiel et le rôle important des marchés publics dans la réalisation d'une EE rentable, il est nécessaire de renforcer l'EE dans les marchés publics (Haddadi et al., 2017). Ceci est confirmé par l'inefficacité de la mise en œuvre de la réglementation thermique marocaine dans le secteur tertiaire, y compris les BP (**Haddadi et al., 2017**).

II.1.3. Efficacité énergétique à l'aide d'approches managériales et organisationnelles

L'amélioration de l'EE passe principalement par l'utilisation de différentes technologies. Par exemple, les économies d'énergie en Europe ont été réalisées grâce à l'adoption de différentes mesures technologiques efficaces qui sont classées en sept catégories liées au chauffage (ex: pompes à chaleur) ; à la ventilation et/ou à la climatisation (ex : avec ou sans récupération de chaleur) ; à l'enveloppe (ex : protection thermique estivale, isolation) ; à l'éclairage (ex : lampes fluorescentes) ; aux sources d'énergie renouvelables (ex : panneaux solaires) ; aux systèmes de contrôle (ex : dispositifs intelligents) et autres (ex : systèmes d'économie d'eau) **(Agostino et al., 2017**).

De l'autre côté, **(Zhang et al., 2018)** ont déclaré que la technologie seule ne permettra pas de réaliser l'EE des bâtiments, et que les humains et leur comportement lié à l'énergie dans les bâtiments doivent être inclus dans les efforts de performance énergétique. **(Delgado & Shealy., 2018)** ont constaté qu'il est nécessaire de mettre davantage l'accent sur la gestion des installations pour atteindre les futurs objectifs de réduction de l'énergie et des émissions. Par conséquent, une tactique appelée architecture de choix a été suggérée, qui consiste à restructurer les environnements de décision pour les aligner sur la théorie de la décision comportementale. Des exemples d'architecture de choix sont proposés pour aider les gestionnaires d'installations à faire des choix d'efficacité énergétique, par exemple en permettant aux systèmes d'approvisionnement de demander des produits verts et en modifiant les paramètres par défaut des systèmes mécaniques (**Delgado & Shealy, 2018**).

Dans la même lignée du comportement humain, l'occupant est le principal consommateur d'énergie dans la phase d'exploitation d'un bâtiment, ce qui a nécessité de comprendre son comportement. Ainsi, des méthodes de gestion de l'énergie et de suivi de la consommation deviennent disponibles, dans lesquelles les informations provenant des capteurs sont vérifiées pour identifier les modèles de consommation et mettre en œuvre des actions pour économiser l'énergie dans un bâtiment (**Zhang et al., 2018**). La compréhension du comportement de l'occupant dans la performance énergétique du bâtiment a montré un potentiel d'économie d'énergie entre 10% et 25% pour les bâtiments résidentiels et entre 5% à 30% pour les bâtiments commerciaux (**Zhang et al., 2018**).

Outre l'EE par la technologie et le comportement humain, la gestion de l'énergie peut être encouragée par des politiques. En Finlande, la stratégie nationale sur l'énergie et le climat a été

établie en 2016 pour réduire les émissions de GES de la construction. Le ministère de l'environnement a lancé un processus visant à améliorer l'EE dans le secteur de la construction (**Kuittinen & Roux, 2018**). Le ministère de l'Environnement a élaboré un guide qui fournit des recommandations sur les critères d'achat afin de réduire les émissions de GES produites au cours du cycle de vie des nouveaux bâtiments et des bâtiments rénovés. Au stade de la conception, les critères recommandaient de concevoir les nouveaux bâtiments avec une performance énergétique supérieure de 10% au niveau réglementaire, et de concevoir les projets de rénovation avec une performance énergétique supérieure de 20% au niveau réglementaire. Il a imposé que dans la phase de contrat de construction, la performance énergétique est contractée. Par conséquent, la consommation d'énergie sur le site doit être mesurée, et les émissions dues à la consommation d'énergie doivent être calculées et déclarées. Lors de l'achat de matériaux et d'équipements liés à l'EE, il est recommandé de choisir les équipements parmi les deux meilleures classes d'évaluation énergétique (**Kuittinen & Roux, 2018**).

Dans le même contexte, Le gouvernement marocain a promu une politique d'EE axée sur la clarification des relations entre les administrations et les opérateurs. Elle vise à fournir un système de gestion publique institutionnalisé pour les questions d'EE et un cadre législatif et réglementaire approprié, ainsi qu'à promouvoir des normes et des standards (**Merini et al., 2020**). En conséquence, le ministère marocain de l'énergie, des mines et du développement durable, qui dirige les projets d'EE, a annoncé une série de mesures de gestion pour renforcer l'EE (N. **Dref, 2019).** A partir de 2019, le Maroc a fixé comme objectifs aux administrations publiques de réduire leur facture d'électricité de 5% par an. En 2021, la part d'électricité issue de sources propres, notamment solaire, doit atteindre 20%. De plus, l'État doit réduire sa consommation de 5 % en kwh/agent/an **(N. Dref, 2019).**

En 2019, le Comité national du développement durable a lancé le Pacte d'exemplarité de l'administration (PEA)[12]. Ce pacte a été publié et fourni à toutes les administrations publiques concernées. La Direction de l'environnement a mené plusieurs actions afin d'accompagner les ministères dans le processus d'élaboration de leur Plan ministériel d'exemplarité de l'administration (PMEA). Ces actions comprennent le développement et la diffusion d'un guide méthodologique pour l'administration exemplaire, et des fiches d'orientation pour des sujets spécifiques tels que (l'eau, les déchets, la mobilité, l'efficacité énergétique, etc), ainsi que des termes de référence standard pour les audits environnementaux des BP.

En outre, une assistance technique a été fournie aux départements ministériels en association avec de l'assistance internationale. Un programme allant du quatrième trimestre de 2019 au troisième trimestre de 2023 a été lancé pour améliorer l'EE des bâtiments appartenant au gouvernement. Sa première phase a été financée par la banque allemande KFW à hauteur de 20 millions d'euros avec 5 millions d'euros de financement additionnel pour l'assistance technique (**AIE, 2019a**). Son objectif était d'accélérer la mise en œuvre de l'EE et la généralisation des mesures susmentionnées au niveau des institutions publiques et des autorités locales. En conséquence, certains départements ministériels ont réussi à réduire leur consommation d'eau de 50 % et à produire 22 % de leur électricité à partir d'ER. D'autres

[12] Pacte d'exemplarité de l'administration (PEA)

départements ont déjà 32% de véhicules propres dans leur flotte et réduisent leurs déchets à environ 35% (**Pacte d'Exemplarité de l'Etat, 2019**).

En plus de la technologie, du comportement humain et des politiques, la gestion de l'énergie pourrait être atteinte en utilisant différentes approches de gestion. Cependant, peu d'articles ont abordé le sujet de l'EE à travers des approches managériales et organisationnelles. En Chine, (**Xu & Chan., 2013**) a constaté que l'EE des bâtiments existants à forte consommation d'énergie peut être améliorée grâce au programme BEER (Building Energy Effeciency Retrofit)[13]. Pour assurer les projets BEER, le contrat de performance énergétique (EPC)[14] est un mécanisme de marché possible pour réaliser des projets d'EE avec un service clé en main afin de fournir aux clients un ensemble complet de mesures d'EE, d'énergie renouvelable et de production décentralisée visant à garantir l'amélioration de la performance énergétique et de la rentabilité des installations. En conséquence, un modèle d'amélioration du BEER dans le cadre du mécanisme EPC a été élaboré sur la base de six groupes, à savoir : la gestion de projet, le financement de projet, la mise en œuvre d'une stratégie de développement durable, la connaissance et l'innovation de l'EPC, le développement durable, le M&V (Mesure et Vérification), la passation de marchés et l'économie externe (**Xu & Chan, 2013**).

Au Royaume-Uni, (**Hamza & Greenwood., 2009)** a déclaré que la passation de marchés pour les BP incluait le concept d'EE. Il a été incorporé dans l'étape de l'appel d'offres conformément à la réglementation basée sur la performance pour la conservation de l'énergie et de l'électricité dans les bâtiments). Le "modèle énergétique du bâtiment" devient une partie intégrante des documents contractuels de l'appel d'offres pour atteindre des niveaux de consommation d'énergie minimum. En outre, le respect de cette réglementation s'étend de la phase de conception à l'achèvement et à l'exploitation du bâtiment (**Hamza & Greenwood, 2009).**

Une étude menée en Italie a analysé les performances des PB actuels afin de déterminer les bâtiments les plus prioritaires pour entreprendre des actions de rénovation énergétique à grande échelle. En conséquence, ils ont suggéré des politiques énergétiques locales pour encourager l'incorporation de mesures d'EE dans les BP (**Vergerio et al., 2018**). Ils ont adopté la méthodologie de l'analyse décisionnelle multicritères (MCDA), qui est un outil de prise de décision permettant de choisir entre différentes hypothèses d'interventions de rénovation. Cette méthodologie a prouvé son importance lorsqu'une administration publique est impliquée dans le processus d'évaluation visant à planifier l'environnement bâti de nos futures villes **(Vergerio et al., 2018).**

Plus loin, (**Copiello., 2018)** a suggéré l'amélioration de l'EE par la gestion du partenariat public-privé (PPP) . En outre, l'étude a présenté des conseils de gestion financière et technique pour gérer la consommation d'énergie des bâtiments. (**Najjar et al., 2018)** ont travaillé à intégrer la Modélisation des Informations du Bâtiment (BIM) avec l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) afin de renforcer le processus de prise de décision et la conception durable des bâtiments dans le secteur de la construction vers des bâtiments à énergie quasi nulle. À Berlin, en Allemagne, les coûts de l'approvisionnement en énergie des bâtiments publics sont restés

[13] Rénovation énergétique des bâtiments (BEER)
[14] Contrat de performance énergétique (EPC)

élevés. Le gouvernement a donc décidé de déléguer la gestion énergétique des bâtimentspublics à des entreprises privées afin de garantir les investissements en matière d'économies d'énergie et depromouvoir l'efficacité énergétique (**Monstadt, 2007**).

La section précédente a montré qu'il existe différentes technologies, régimes réglementaires, cadres et approches de gestion qui ont émergé afin de promouvoir l'EE dans le secteur de la construction. Dans ce travail, une nouvelle approche est suggérée pour promouvoir l'EE dans les PB, à savoir la Maitrise d'ouvrage déléguée de projet (MOD)[15]. (**Julius, 2021**) décrit la délégation comme le transfert du pouvoir du manager aux subordonnés qui exécutent la tâche. La gestion de projet implique un processus séquentiel de contrôle, de planification, d'exécution, de suivi, de lancement et d'évaluation d'une tâche pour atteindre un objectif (**Julius, 2021**). Dans la plupart des cas, les BP au Maroc sont construits en utilisant le processus de la MOD. Par conséquent, il est suggéré de promouvoir l'EE dans les BP à travers ce mécanisme. La MOD dans notre cas, consiste en la délégation de la construction d'un projet d'une entité étatique propriétaire du projet à une entité étatique experte.

II.2. Méthodologie

II.2.1. Justification de l'étude de cas

L'étude des PB présente plusieurs enjeux pour être adoptée comme étude de cas dans cette étude. Ces questions sont liées à la dimension culturelle, à la dimension symbolique et à l'image, à la dimension socio- économique, à la commande de partis et de fonds publics, et au champ d'expérimentation. La figure II.1 résume ces questions.

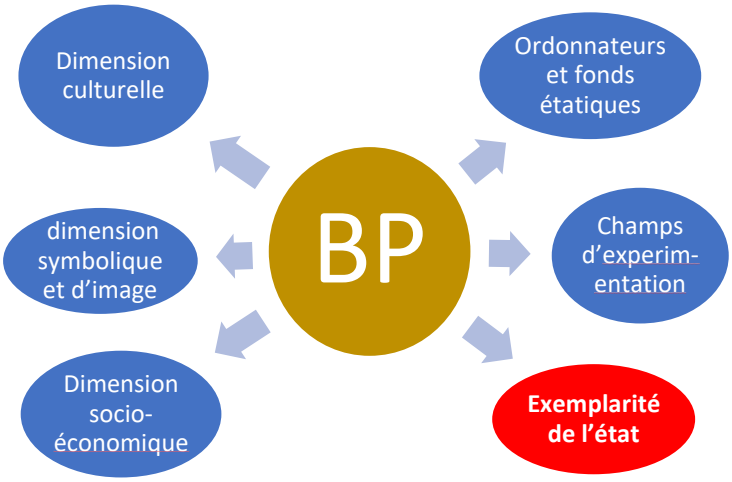


Figure II. 1. Les enjeux de la sélection des BP

Dans le cadre de l'exemplarité de l'Etat, les BP jouent un rôle fondamental pour orienter l'ensemble du secteur de la construction au Maroc. Le secteur privé qui suit les expériences réussies menées par l'Etat sera éclairé. L'étude de cas se concentre sur la MOD réalisée par l'état pour le compte de l'état. Il comprend la construction de nouveaux projets de BP, leur réhabilitation et l'entretien de leur patrimoine immobilier. Ce type de construction de BP utilisant le MOD a prouvé son efficacité. En 2021, le montant du portefeuille de projets confiés

[15] Maitrise d'Ouvrage déléguée (MOD)

en MOD est passé à 25 milliards MAD contre 3 milliards de MAD en 2010. Ce portefeuille connaîtra une croissance importante au cours des prochaines années suite aux investissements prévus dans le secteur des BP. Ce mode de construction a produit 3000 projets durant les 10 dernières années. Actuellement, il produit une moyenne de 400 projets par an. Géré par 372 agents, le MOD contrôle le travail de tous les prestataires de services opérant dans la construction des BP : architectes, bureaux d'études (BET)[16], bureaux d'inspection (BCT)[17], et laboratoires d'essais (LAB)[18]. L'adoption de l'EE dans le processus de MOD des BP, qui est un processus de suivi et de contrôle de ces bâtiments, permet d'atteindreun grand nombre de BP et de sensibiliser la majorité des prestataires de services. Ainsi, le Maroc peut contribuer efficacement à la stratégie de transition énergétique.

Un nombre croissant d'acteurs du secteur réorientent leurs prises de décision. Ils passent d'une approche économique de la performance énergétique au cas par cas, chronophage et génératrice de débats à une approche plus globale. Cette approche est renforcée par la conviction que ces projets sont, à long terme, générateurs de valeur, le raisonnement énergétique par projet n'est plus impressionnant, c'est le raisonnement global ou par catégorie de projet qui donne ces effets (**Franck et al., 2014**). Dans ce chapitre, un raisonnement global est présenté pour intégrer l'EE dans le processus de suivi et de contrôle des BP, la MOD.

II.2.2. Collecte des données

II.2.2.1. Approche de la collecte des données

Un guide d'entretien a été préparé pour la collecte des données afin d'étudier le problème de l'intégration de l'EE dans les BP sous différents angles. Les principales données collectées par le biais de ce guide étaient les données relatives aux actions de modélisation et pistes d'amélioration. Dans un premier temps, des entretiens ont été menés avec trois experts afin de tester l'efficacité du guide d'entretien et la manière dont les experts répondraient aux questions. Les personnes interrogées ont fait des commentaires sur le nombre de questions et la clarté des questions. Le guide a donc été revu et développé pour devenir le guide d'entretien final. Les experts avaient le choix entre l'entretien en face à face et les entretiens par e-mail. Certains des entretiens par courriel manquaient de clarté ou d'informations, ce qui a nécessité la réalisation d'un mini-entretien téléphonique pour compléter les données requises. En résumé, et tout en respectant l'éthique de la collecte et de l'exploitation des données en termes d'anonymat et de confidentialité. En résumé, la collecte des données a été réalisée en deux étapes :

1. Entretien préliminaire avec 3 experts pour vérifier l'efficacité du guide d'entretien ;
2. Collecte de données par des entretiens en face à face ou par e-mail (selon le choix de l'expert) auprès des acteurs du processus.

II.2.2.2. Guide d'entretien

Le guide d'entretien comprenait 72 questions réparties en plusieurs thèmes, notamment : les étapes du processus de la MOD, l'état de l'EE dans le processus et à chaque étape, les obstacles et les contraintes. Le guide d'entretien contenait des questions générales et d'autres spécifiques

[16] Bureaux d'études (BET)
[17] Bureaux de contrôle (BCT)
[18] Laboratoire d'essais (LAB)

à chaque profil (ingénieurs, techniciens et architectes). Les entretiens ont permis de recueillir des informations sur la modélisation du processus MOD et les actions d'amélioration de l'EE (voir annexe n°4).

II.2.2.3. Échantillonnage

Le processus MOD est le processus qui valide les études et les travaux de réalisation liés aux PB. Il est géré en interne par environ 372 agents de l'État de différents profils : architectes, ingénieurs et techniciens, qui constituent la population de l'étude. L'échantillon a été sélectionné parmi les acteurs internes du processus MOD car ils ont le pouvoir d'influencer le travail des acteurs externes du processus. Par conséquent, 50 experts ont été sélectionnés comme échantillon en utilisant la méthode d'échantillonnage par choix pour être interviewés. Sur ce nombre, 17 entretiens ont suffi à collecter les données requises pour cette recherche qualitative. Les entretiens ont été limités à ces experts en raison de leur grande expérience du sujet de recherche, et parce que les informations collectées étaient saturées. En d'autres termes, il n'y a pas d'informations nouvelles ou supplémentaires à recueillir après avoir interrogé les 17 experts.

II.2.3. Analyse des données

Les données recueillies lors des entretiens ont été analysées à l'aide de l'analyse de contenu. (**Elo & Kyngäs, 2008**) précise que l'analyse de contenu qualitative vise à décrire le phénomène sous une forme conceptuelle. Elle se compose essentiellement de trois phases principales : la préparation, l'organisation et le rapport. La phase de préparation commence par la sélection de l'unité d'analyse, qui peut être un mot ou un thème. Ensuite, le chercheur s'efforce de donner un sens aux données et de se familiariser avec elles. L'étape suivante consiste à organiser les données de l'entretien par le codage, la création de catégories et l'abstraction. Enfin, l'analyse de contenu se termine par la communication des résultats (**Elo & Kyngäs, 2008**). Dans cette étude, l'analyse des entretiens a commencé par l'identification de l'unité d'analyse, à savoir les phases du processus de la MOD et actions d'amélioration possibles. Ensuite, le chercheur a lu et relu la transcription des entretiens pour se familiariser avec les données. Par la suite, les données ont été codées et classées en actions et en phases. Enfin, les données ont été représentées comme indiqué dans les résultats de la recherche.

Ainsi, les données recueillies lors des entretiens ont été triées et classées en phases et en actions d'amélioration. L'étape suivante a consisté à montrer le degré d'importance des actions d'amélioration en fonction de leur numéro de citation (voir section II.3.4). Ensuite, elles ont été divisées en : actions très importantes, importantes, modérées et sans importance. Le but de cette étape est de trouver le nombre minimum d'actions permettant d'atteindre 80% de l'objectif (80% des citations) selon la méthode de Pareto, afin d'identifier les actions les plus importantes. Les données qualitatives recueillies ont permis de créer des catégories en fonction de leur nature et d'attribuer chaque action d'amélioration à la catégorie correspondante (voir section II.3.5). La dernière étape a consisté à regrouper les actions d'amélioration dans les phases du processus de la MOD en classant par ordre décroissant le nombre de citations et le nombre d'actions par phase (voir section II.3.6).

II.2.4. Modèle de processus d'affaires pour la construction de BP

Un projet de construction consiste en un processus long et souvent complexe impliquant de multiples acteurs aux cultures de travail différentes. Il s'agit d'un ensemble de phases liées entre elles afin de surveiller, contrôler, maîtriser et livrer un produit, qui est le PBs dans cette étude. L'introduction des concepts et pratiques de l'EE dans le processus du MOD permettra d'améliorer la qualité de son service. Comme tout processus d'amélioration, une analyse de l'existant est essentielle pour comprendre et décomposer le processus MOD en étapes. En conséquence, une meilleure compréhension du processus MOD sera réalisée et une amélioration potentielle de l'EE sera réalisée pour chaque étape du processus. Finalement, le résultat de cette analyse est le modèle du processus de MOD (voir section II.3.2).

Selon (**ISO, 2009)** la collecte d'informations pour la modélisation des processus peut se faire par le biais de plusieurs méthodes, notamment : atelier de brainstorming, entretien individuel, entretien de groupe, observation sur le terrain, consultation de la littérature, ainsi que par le biais de questionnaires et d'entretiens individuels avec ses acteurs internes et externes. Dans cette étude, les informations utiles pour la modélisation du processus ont été collectées par les entretiens avec les experts internes du processus.

II.3. Résultats et analyse

II.3.1. Historique des participants

Comme mentionné dans la méthodologie, l'étude a ciblé l'échantillon de 50 experts parmi les ingénieurs, techniciens et architectes du processus. Sur un échantillon de 50 experts, 17 experts ont répondu dans les délais et leurs réponses ont été étudié. Sur ces 17 experts, 59% étaient des femmes. L'âge des répondants variait comme suit : 23,5% entre 20 et 30 ans, 29,4% entre 30 et 35 ans, 17,6% entre 40 et 50 ans et 11,8% entre 50 ans et plus. En ce qui concerne leur catégorie professionnelle, 65% sont des ingénieurs, 29% des architectes et 6% des techniciens. Différentes spécialités liées au bâtiment et à l'énergie ont participé à l'étude. 35% des personnes interrogées étaient des managers. Les personnes interrogées effectuaient différentes tâches liées au processus de MOD. L'expérience moyenne des répondants à leur poste actuel dans le MOD est de 5 ans. Cependant, ils ont en moyenne 9,71 ans d'expérience dans le domaine de la construction. Le **tableau II.1** présente les données relatives aux répondants de manière plus détaillée. Il ressort clairement du tableau que l'échantillon est un échantillon pluridisciplinaire.

II.3.2. Modèle de processus

Le processus peut être modélisé sommairement comme une boîte noire dont les entrées sont : le besoin exprimé par un propriétaire de projet, appelé maitre d'ouvrage (MO)[19], le besoin et les exigences du MO, le budget et le temps alloué pour répondre à ce besoin. D'autre part, le processus aboutirait à un BP satisfaisant en tant que sortie exploitable par le MO. La figure II.2 résume le modèle du processus MOD.

[19] Maitre d'ouvrage (MO)

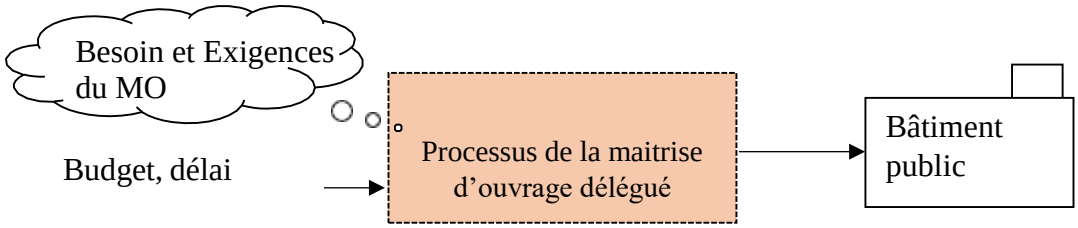


Figure II. 2. Macro-modèle de processus

Pour atteindre son objectif, le processus traverse toutes les phases d'un projet de construction en impliquant toutes les parties prenantes. L'intérêt d'une modélisation détaillée est donc justifié. Dans ce modèle, les étapes du projet PB ont été identifiées. Pour chacune de ces étapes, de nombreux éléments ont été définis dont : le code de l'étape, le contenu, les entrées, les sorties, les responsables internes, les responsables externes, les liens avec les autres étapes ainsi que les particularités. Il s'agit d'un processus long et complexe impliquant plusieurs compétences et intervenants, dont les tâches dépendent les unes des autres. Le **tableau II.2** résume la modélisation du processus.

II.3.3. Actions proposées par les experts et leurs citations

Les actions d'amélioration proposées par les experts au cours de la collecte de données ont été triées, codifiés et placées dans Le tableau II.3, qui présente une synthèse des actions et politiques d'amélioration, avec les explications et justifications, l'index des experts ayant cité la piste et ratio d'occurrence de la piste. Sur la base du modèle de processus de la MOD, tableau II.2, chaque action d'amélioration a été assignée à une phase appropriée qui était déjà caractérisée par des entrées et des sorties spécifiques avec d'autres caractéristiques. Cela a permis de vérifier la faisabilité de l'action. Les phases ont été codées pendant la modélisation avec des lettres, tandis que les actions liées à la phase ont été codées en ajoutant des chiffres aux lettres. Ces codes sont présentés dans le tableau II.3. Évidemment, plusieurs actions ont été citées de différentes manières et regroupées en une seule action significative. Cela a donné un nombre de 83 actions et un total de 334 citations. Certaines actions ont été mentionnées par plusieurs experts, tandis que d'autres l'ont été moins. Le ratio d'occurrence des actions Par conséquent, chaque action d'amélioration a été incluse dans la phase de construction appropriée de la MOD codifiées est présenté dans la figure II.3. Le tableau II.4 résume les politiques et actions d'amélioration par phases.

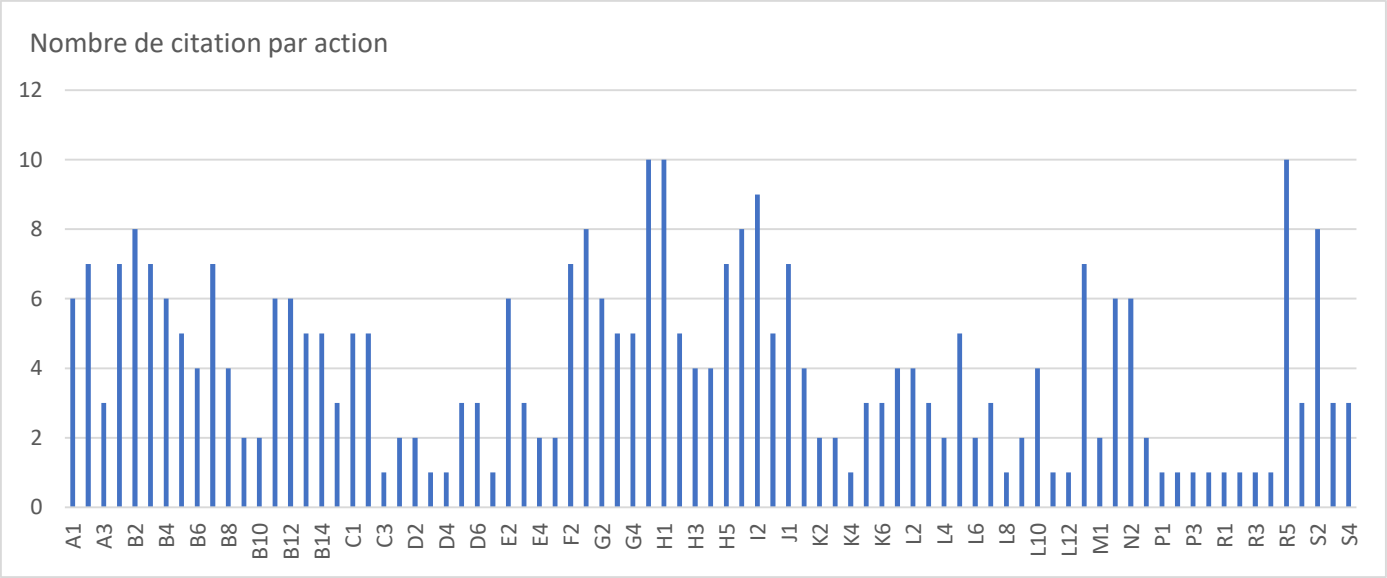


Figure II. 3. Bilan des citations des actions

La figure II.3 montre une multitude d'actions exprimées par les experts pour améliorer l'EE dans le processus du MOD. Le nombre d'actions d'amélioration diffère d'une phase à l'autre. Parallèlement, le nombre de citations des actions varie d'une action à l'autre. Toutes les phases du processus de MOD ont été marquées par la présence d'actions d'amélioration de l'EE, mais certaines phases ont été marquées par un plus grand nombre d'actions d'amélioration ou un plus grand nombre de citations.

Tableau II. 1. Profil des répondants

Expert	Sexe	Groupe d'âge	Qualification Professionnelle	Spécialisation	Emploi	Taches	Expérience dans le poste actuel	Durée de l'expérience dans le bâtiment
1	M	25-30	Ingénieur d'état	Thermique des bâtiments	Doctorant	Recherche	2	2
2	F	30-35	Ingénieur d'état	Génie civil	Cadre	Planification budgétaire et gestion des marchés	7	7
3	F	30-35	Ingénieur d'état	Génie civil	Cadre	Gestion des marchés	5	7
4	F	35-40	Ingénieur d'état	Génie industriel/bâtiment	Chef de service	Recherche, développement de la qualité et formation	4	13
5	M	40-50	Architecte	Architecture	Chef de service	Etudes des projets de restauration	10	15
6	F	25-30	Technicien	Bâtiment	Technicien	Métreur	5	7
7	F	40-50	Architecte	Architecture	Cadre	Etudes architecturales	5	13
8	M	25-30	Ingénieur d'état	Génie électrique	Cadre	Suivi de chantier	2	2
9	F	30-35	Ingénieur d'état	Génie civil	Chef de service	Suivi de chantier	6	10
10	M	30-35	Architecte	Architecture	Chef de projet	Programmation architecturale	4	10
11	F	30-35	Ingénieur d'état	Génie civil	Cadre	Etudes technique	3	10
12	F	35-40	Architecte	Architecture	Chef de service	Programmation architecturale	5	15
13	M	25-30	Ingénieur d'état	Energétique	Chargé d'affaires	Audit énergétique	1	3
14	F	30-35	Architecte	Architecture	Cadre	Gestion de projet	6	8
15	M	30-35	Ingénieur d'état	Génie électrique	Consultant dans les AO	Etude, maintenance et suivi des projets	4	4
16	M	40-50	Ingénieur d'état	Génie civil	Chef de service	Prescripteur	10	21
17	M	40-50	Ingénieur d'état	Génie civil	Chef de service	Prescripteur	6	18

Tableau II. 2. Modélisation du processus MOD des équipements publics

N° Etape	A	B	C	D
Intitulé de l'étape	Elaboration de la convention	Definition du besoin du MO	Choix du terrain	Désignation de l'architecte
Contenu de l'étape	Définition du budget disponible, responsabilité et engagement du MO et MOD, durée du projet, validité de la convention.	Définition de l'organigramme fonctionnel, les natures de liaisons horizontales et verticales, de proximité, les surface des locaux, simulation de la vie (se mettre dans la peau de l'utilisateur final) définition de la surface total, l'estimation provisoire et définition du standing.	Evaluation de la note de renseignements sur le terrain et vérification de l'adaptation du terrain au programme du projet.	Préparation du concours ou de la consultation de désignation de l'architecte. Réponse aux diverses interrogations posées par les architectes concurrents, participation au jugement lors du concours ou de la consultation.
Entrées et outils	Exigences du MO et du MOD	Besoin particulier du MO Budget réservé par le MO pour la réalisation des projet objet de la convention	Note de renseignement sur le terrain	Note de renseignement sur le terrain Cahier des charges Règlement de consultation Contrat d'architecte
Sorties	Convention signée	Programme physique Estimation prévisionnelle	Terrain sélectionnées	Architecte lauréat Plan esquisse Contrat d'architecte
Responsable interne	Directeur MOD, responsable de la Programmation budgétaire	Architectes responsable de la programmation architecturale et technique	Architectes responsable de la programmation architecturale et technique, représentant régional du MOD	Architectes, ingénieur et technicien du MOD, représentant régional du MOD
Responsable externe	MO	MO, architecte programiste	MO	MO, Agence urbaine, représentant du ministère des finances, représentant de l'ordre des architectes
Etape précédente	-	**A**	**B**	**C**
Particularité	La convention peut être Cadre (pour tous les projets du PO) ou par projet, Totale ou partielle (assistance technique sans gestion du budget).			Concours (pour les projets estimés à plus de 30 millions de MAD HT) ou consultation ou consultation négociée

N° Etape	E	F	G	H	I
Intitulé de l'étape	Désignation du laboratoire	Désignation du topographe (Topo)	Designation du bureau d'etude (BET)	Désignation du bureau de Contrôle (BCT)	Examen des etudes architecturales
Contenu de l'étape	Préparation du RC et du CPS Assistance du MO dans l'ouverture des plis	Préparation du RC et du CPS ou du bon de commande de la désignation du topographe. Assistance à l'ouverture des plis	Préparation du RC et du CPS du BET Assistance du MO à l'ouverture des plis	Préparation du RC et du CPS du BCT Assistance du MO à l'ouverture des plis	Examen de la conformité des plans architecturaux aux règles de l'art, aux règlements en vigueur, à la notice de sécurité, aux exigences du MO
Entrées et outils	RC du labo CPS du labo	Règlement de consultation de la désignation du topographe CPS du topographe Ou Bon de commande du topographe	RC du BET CPS du BET	RC du BCT CPS du BCT	Plan topographique Note de renseignement Notice de sécurité Plans architecturaux
Sorties	Marché du laboratoire Laboratoire Attributaire	Contrat du topo Topo Attributaire	Marché du BET BET Attributaire	Marché du BCT BCT Attributaire	Projet architectural approuvé par le MOD
Responsable interne	Ingénieur du MOD, représentant régional du MOD	Ingénieur du MOD, représentant régional du MOD	Ingénieur du MOD, représentant régional du MOD	Ingénieur du MOD, représentant régional du MOD	Ingénieurs, architectes et techniciens du MOD, représentant régional du MOD
Responsable externe	MO	MO	MO	MO	MO, Architecte, BET, BCT
Etape précédente	**C**	**C**	**D**	**D**	**D, G et H**
Particularité	Dans certain cas la MOD lance un marché pour l'étude géotechnique et un autre pour la réception des fonds de fouilles et le suivi et contrôle de la qualité.	Ce prestataire est en majorité désigné par un bon de commande			

N° Etape	J	K	L	M	N
Intitulé de l'étape	Examen technique de la Structure et des lots architecturaux	Examen des lots techniques	Preparation du Dossier d'appetel d'offres (DAO) et designation de l'entreprise	demande de l'autorisation de construire	Suivi de chantier
Contenu de l'étape	Examen de la conformité des plans de structure aux règles de l'art, aux normes, à la réglementationen vigueur, aux exigences du MO, aux plans architecturaux, à la note de sécurité.	Examen de la conformité des études des lots techniques aux règles de l'art, aux normes, à la réglementation en vigueur, aux exigences du MO, aux plans architecturaux et structuraux , à la note de sécurité.	Examen de la conformité des pièces écrites (CPS et RC) aux règles de l'art, aux règlements en vigueur, à la notice de sécurité, aux plans architecturaux, aux plan de structure, aux plans techniques, et aux exigences du MO.	Demande d'autorisation	Suivi de chantier, réception des matériaux, réception des fond de fouilles et coordination entre les intervenants.
Entrées et outils	Plans de structure Plans architecturaux Plan du topo Notice de sécurité Métrés Fiche d'instruction modèle	Plan des lots technique Plans de structure Plans architecturaux Notice de sécurité Métrés Fiche d'instruction modèle	CPS Travaux Bordereaux des prix - détail estimatif Notice de sécurité	Plans architecturaux Plans structurels	Tous les plans approuvés Fiche d'instruction Entreprise attributaire Marché des travaux Autorisation de construire
Sorties	Plans de structure approuvé par le MOD Fiche d'instruction renseignée	Plans des lots technique approuvé par le MOD Fiche d'instruction renseignée	DAO approuvé (plans approuvés, CPS et RC approuvés, Bordereaux des prix - détail estimatif approuvé) Entreprise lauréate designée Marché des travaux	Autorisation	PV de réunion de chantier Bon de réception Etats d'avancement Projet achevé
Responsable interne	Ingénieur MOD	Ingénieur MOD	Ingénieur du MOD, responsable des marchés du MOD representant régional du MOD	Architecte du MOD, représentant régional du MOD	Représentant régional du MOD
Responsable externe	MO, Architecte, BET, BCT, labo	MO, architecte, BET, BCT	MO, Architecte, BET, BCT	Architecte, agence urbaine	Architecte, Labo, BET, BCT, MO
Etape précédente	**I**	**I**	**J, K, I**	**I**	**M**
Particularité	L'Opération peut être une construction, une extension, une réhabilitation	L'Opération peut être une construction, une extension, une réhabilitation	L'Opération peut être une construction, une extension, une réhabilitation, un achèvement. Le marché travaux peut être à lot unique (tous les lots dans le même marché ou à lots séparés). Le marché peut être objet d'avenant en cas d'oubli d'une ou plusieurs prestations.		

N° Etape	O	P	Q	R
Intitulé de l'étape	Récéption provisoire de la construction	Exploitation du projet	Réception definitive	Service aprés livraison au MO
Contenu de l'étape	Validation de la conformité du bâtiment au marché et aux plans	Exploitation du bâtiment par l'utilisateur pendant une année dans les conditions normales d'exploitation	il s'agit de la validation de la conformité du bâtiment à l'exigence initiale du MO, elle se fait après un an d'exploitation par le MO,	**Service post-livraison au MO** concerne la maintenance et l'assurance de la bonne exploitation des biens immobiliers du projet. Ce service doit assurer : Le diagnostic des pathologies L'accompagnement à la mise en conformité L'analyse de la facture énergétique, des pannes électriques et des coupures
Entrées et outils	Construction achevée	Consigne d'utilisation Rapport de la Réception provisoire du projet	Recommandation de la réception provisoire Analyse des dysfonctionnements, des pathologies et de la non-conformité	Pathologies des batiments et dysfonctionnements Historique des factures énergétiques Historique des pannes électriques Historique des coupures
Sorties	Réception provisoire prononcée Rapport de la Réception provisoire du projet Recommandations	Retour d'information sur le fonctionnement du bâtiment observation des pathologies	Pathologies et non-conformités corrigées Projet achevé, réceptionné par le MO Rapport de la réception définitive du projet	Recommandations et propositions sur les contrats de maintenance des bâtiments et d'abonnement électrique, Modèles de contrats de maintenance, Rapports de suivi des dysfonctionnements du bâtiment et de recommandations pour améliorer la durée de vie du bâtiment, Base de données de suivi de la maintenance des bâtiments,
Responsable interne	Représentant régional du MOD	Représentant régional du MOD	Représentant régional du MOD	Responsable de la gestion du patrimoine du MOD Représentant régional du MOD
Responsable externe	Architecte, BET, BCT, MO	MO, entreprises des travaux	Architecte, BET, BCT, MO	MO
Etape précédente	**N**	**O**	**P**	**Q**
Particularité				Malgré son importance, ce service demeure insuffisamment développé par le Maître d'Ouvrage Délégué, bien qu'il soit intégré dans ses missions et son organigramme

Tableau II. 3. Synthèse des actions et politiques d'amélioration, explication, index des experts et ratio d'occurrence

Indice-étape	Intitulé de l'étape	Indice-action	Actions	Indice-expert	Nombre -expert
A	Elaboration de la convention	A1	Révision globale de la convention type	4,6,7,11,13,14	6
		A2	L'insertion de clauses sur l'EE dans la convention type	4,11,13,14,15,16,17	7
		A3	L'inclusion de clauses sur l'audit énergétique.	8,11,13	3
B	Définition du besoin du MO	B1	Intégrer l'EE dans le CPS du programmiste	7,9,11,12,15,16,17	7
		B2	Prévoir dans le RC du programmiste la compétence et l'expérience en EE	7,9,10,11,14,15,16,17	8
		B3	Passez en revue le questionnaire sur le besoin du MO en faveur de l'EE.	1,3,5,6,7,11,14	7
		B4	Prise en compte du cout d'investissement de l'EE	1,3,5,7,11,14	6
		B5	Prise en compte des coûts d'exploitation.	2,4,7,11,14	5
		B6	Calcul des surfaces avec l'isolation prévue des murs.	7,15,16,17	4
		B7	Précision du taux de baies vitrées (TGBV).	1,3,13,14,15,16,17	7
		B8	Sensibiliser le MO lors des réunions de programmation architecturale	7,11,13,14	4
		B9	Développer l'argumentaire du MOD sur l'EE	11,14	2
		B10	Sensibiliser le MO des matériaux locaux	11,14	2
		B11	Tenir compte des besoins des utilisateurs et du climat de la région	7,11,13,14,16,17	6

		B12	Intégration de l'ingénierie énergétique dans la programmation architecturale et technique.	3,4,7,11,13,14	6
		B13	Formation des architectes	1,7,11,13,14	5
		B14	Financement des projets durables	1,3,4,6,14	5
		B15	Généralisation l'application de l'EE	8,10,14	3
C	Choix du terrain	C1	Révision de la fiche d'enquête sur le terrain	1,4,5,7,11	5
		C2	Évaluation de l'impact énergétique du site.	4,7,10,13,14	5
		C3	Visite des lieux	11	1
D	Désignation de l'architecte	D1	Evaluation énergétique de la proposition architecturale	7,11	2
		D2	Stratégie énergétique	7,11	2
		D3	Exigence de projets références conformes énergétiquement	7	1
		D4	Exigence d'une Etude thermique	7	1
		D5	Révision du Contrat-type de l'architecte	8,10,11	1
		D6	Exigence de la fiche de conformité thermique	1,5,11	3
E	Désignation du labo	E1	Revue de la mission « élaboration du rapport géotechnique » dans le CPS du laboratoire	5	1
		E2	Révision de la Mission « Contrôle et suivi de la qualité » dans le CPS du laboratoire	3,5,7,9,13,14	6
		E3	Fiche d'instruction pour l'examen des CPS et RC du Labo	2,5,12	3
		E4	Intégration du RGCPE dans le CPS du laboratoire.	6,7	2

F	Désignation du topo	F1	Révision du cahier des charges du topographe	2,10	2
		F2	Etablissement d'une fiche d'instruction pour l'examen du livrable du topographe	2,5,7,11,12,13	6
G	Désignation du BET	G1	Révision du CPS Type du BET	2,5,7,9,11,12,13,14	8
		G2	Révision du RC Type du BET	2,5,10,11,12,13	6
		G3	Etablissement d'une fiche d'instruction pour l'examen du CPS et du RC du BET	2,5,11,12,13	5
		G4	Prévoir le RGCPE dans le CPS du BET.	2,10,11,12,13	5
		G5	BET spécialisés en énergétique	2,3,4,5,7,9,10,11,12,13	10
H	Désignation du BCT	H1	Révision du CPS Type du BCT en ajoutant des missions pour garantir l'EE	1,2,5,7,8,9,10,11,12,13	10
		H2	Révision du RC type du BCT	1,10,11,12,13	5
		H3	Etablissement d'une fiche d'examen du CPS et du RC du BCT.	2,11,12,13	4
		H4	Prévoir le RGCPE dans le CPS du BCT.	2,11,12,13	4
		H5	Mettre en valeur la mission de l'optimisation chez le BCT	1,2,5,7,11,12,13	7
I	Examen des études architecturales	I1	Promouvoir l'architecture bioclimatique dans l'examen des études architecturales	1,2,4,6,7,8,10,11	8
		I2	Révision des fiches d'examen architectural	1,2,3,4,5,6,7,8,11,12	9
		I3	Surfaçage responsable	2,4,7,8,10	5
J	Examen technique de Structure	J1	Révision des fiches d'examen structural	2,4,7,8,10,13,14	7
K	Examen technique des lots techniques	K1	Révision des fiches d'instruction technique	4,5,11,14	4

	K2	Un standard avancé sur les équipements techniques	11,14	2
	K3	La classe énergétique tolérable pour les marchés publics	2,11	2
	K4	Efficacité énergétique dans la phase préliminaire du projet.	9	1
	K5	Promouvoir la domotique énergétique	11,13,14	3
	K6	Contrat de souscription d'électricité	8,10,11	3
L	L1	Révision de la fiche d'examen du DAO	2,4,8,11	4
	L2	Respect du RGCPE dans les descriptifs	11,13,14,15	4
Préparation du DAO et désignation de l'entreprise	L3	Vigilance dans les descriptifs de l'isolation de l'enveloppe	4,11,14	3
	L4	Vigilance dans les descriptifs des équipements techniques	9,11	2
	L5	Prévoir le RGCPE dans le CPS travaux	3,5,7,9,11	5
	L6	Analyse de l'estimation du surcout lié à l'EE	7,9	2
	L7	Guide sur l'efficacité énergétique pour la MOD	4,9,11	3
	L8	CPS Type responsable énergétiquement	11	1
	L9	RC type responsable énergétiquement	4,11	2
	L10	Base de données de l'EE	1,3,7,8	4
	L11	Algorithme simplifié de conformité au RGCPE	11	1
	L12	Etude de conformité au RTCM des éléments constructifs usuels	11	1
	L13	Fiches de désordres liés à l'EE	3,4,8,9,10,11,14	7

M	Demande de l'autorisation de construire	M1	Intégration de la fiche de conformité RGCPE	2,3	2
N	Suivi de chantier	N1	Fiches de contrôle /procédure de contrôle	3,4,9,11,13,14	6
		N2	Formation	3,4,8,9,10,14	6
O	Réception provisoire	O1	Fiche de contrôle de la réception provisoire	8,9	2
P	Exploitation du bâtiment	P1	Guide type d'utilisation du bâtiment	9	1
		P2	Guide Type de la maintenance et de l'entretien des bâtiments	12	1
		P3	Contrat type de maintenance	8	1
Q	Réception définitive	Q1	Post contrôle après un an d'exploitation	12	1
R	Service après livraison au MO	R1	Interprétation de la facture d'électricité des projets.	12	1
		R2	Audits énergétiques	12	1
		R3	Optimisation du contrat d'électricité.	8	1
		R4	Redimensionnement de la batterie de compensation	12	1
		R5	Banque de donnée	2,5,6,7,8,9,11,12,13,14	10
S	Commun à toutes les étapes	S1	Indicateurs énergétiques	8,11,13	3
		S2	Vérification de la conformité au RGCPE le long du projet	2,4,7,8,10,11,13,14	8
		S3	Service d'accompagnement technique en EE/durabilité	10,11,14	3
		S4	Audit interne des projets.	10,11,14	3

Tableau II. 4. Résumé des politiques et actions d'amélioration

N° de l'étape	A	B	C	D
Titre de l'étape	**Elaboration de la convention**	**Définition des besoins du MO**	**Choix du terrain**	Désignation de l'architecte
Actions d'amélioration	A1. Révision globale de la convention type A2. L'insertion de clauses sur l'EE dans la convention type A3. L'inclusion de clauses sur l'audit énergétique.	B1. Intégrer l'EE dans le CPS du programmiste B2. Prévoir dans le RC du programmiste la compétence et l'expérience en EE B3. Passez en revue le questionnaire sur le besoin du MO en faveur de l'EE. B4. Prise en compte du cout d'investissement de l'EE B5. Prise en compte des coûts d'exploitation. B6. Calcul des surfaces avec l'isolation prévue des murs. B7. Précision du taux de baies vitrées (TGBV). B8. Sensibiliser le MO lors des réunions de programmation architecturale B9. Développer l'argumentaire du MOD sur l'EE B10. Sensibiliser le MO des matériaux locaux B11. Tenir compte des besoins des utilisateurs et du climat de la région B12. Intégration de l'ingénierie énergétique dans la programmation architecturale et technique. B13. Formation des architectes B14. Financement des projets durables B15. Généralisation l'application de l'EE	C1. Révision de la fiche d'enquête sur le terrain C2. Évaluation de l'impact énergétique du site. C3. Visite des lieux	D1. Evaluation énergétique de la proposition architecturale D2. Stratégie énergétique D3. Exigence de projets références conformes énergétiquement D4. Exigence d'une Etude thermique D5. Révision du Contrat-type de l'architecte D6. Exigence de la fiche de conformité thermique

N° de l'étape	E	F	G	H	I
Titre de l'étape	Désignation du laboratoire	Désignation du topo	Désignation du BET	Désignation du BCT	Examen des études architecturales
Actions d'amélioration	E1. Revue de la mission « élaboration du rapport géotechnique » dans le CPS du laboratoire E2. Révision de la Mission « Contrôle et suivi de la qualité » dans le CPS du laboratoire E3. Fiche d'instruction pour l'examen des CPS et RC du Labo E4. Intégration du RGCPE dans le CPS du laboratoire.	F1. Révision du cahier des charges du topographe F2. Etablissement d'une fiche d'instruction pour l'examen du livrable du topographe	G1. Révision du CPS Type du BET G2. Révision du RC Type du BET G3. Etablissement d'une fiche d'instruction pour l'examen du CPS et du RC du BET G4. Prévoir le RGCPE dans le CPS du BET. G5. BET spécialisés en énergétique	H1. Révision du CPS Type du BCT en ajoutant des missions pour garantir l'EE H2. Révision du RC type du BCT H3. Etablissement d'une fiche d'examen du CPS et du RC du BCT. H4. Prévoir le RGCPE dans le CPS du BCT. H5. Mettre en valeur la mission de l'optimisation chez le BCT	I1. Promouvoir l'architecture bioclimatique dans l'examen des études architecturales I2. Révision des fiches d'examen architectural I3. Surfaçage responsable

N° de l'étape	J	K	L	M	N
Titre de l'étape	Examen technique de Structure	Examen technique des lots techniques	Préparation du DAO et désignation	Demande de permis de construire	Suivi de chantier
Actions d'amélioration	J1. Révision des fiches d'examen structural	K1. Révision des fiches d'instruction technique K2. Un standard avancé sur les équipements techniques K3. La classe énergétique tolérable pour les marchés publics K4. Efficacité énergétique dans la phase préliminaire du projet. K5. Promouvoir la domotique énergétique K6. Contrat de souscription d'électricité	L1. Révision de la fiche d'examen du DAO L2. Respect du RGCPE dans les descriptifs L3. Vigilance dans les descriptifs de l'isolation de l'enveloppe L4. Vigilance dans les descriptifs des équipements techniques L5. Prévoir le RGCPE dans le CPS travaux L6. Analyse de l'estimation du surcout lié à l'EE L7. Guide sur l'efficacité énergétique pour la MOD L8. CPS Type responsable énergétiquement L9. RC type responsable énergétiquement L10. Base de données de l'EE L11. Algorithme simplifié de conformité au RGCPE L12. Etude de conformité au RTCM des éléments constructifs usuels L13. Fiches de désordres liés à l'EE	M1. Intégration de la fiche de conformité RGCPE	N1. Fiches de contrôle /procédure de contrôle N2. Formation

N° de l'étape	O	P	Q	R	S
Titre de l'étape	Réception provisoire	Exploitation du bâtiment	Réception définitive	Service après livraison au MO	Commun a toutes les étapes
Actions d'amélioration	O1. Fiche de contrôle de la réception provisoire	P1. Guide type d'utilisation du bâtiment P2. Guide Type de la maintenance et de l'entretien des bâtiments P3. Contrat type de maintenance	Q1. Post contrôle après un an d'exploitation	R1. Interprétation de la facture d'électricité des projets. R2. Audits énergétiques R3. Optimisation du contrat d'électricité. R4. Redimensionnement de la batterie de compensation R5. Banque de donnée	S1. Indicateurs énergétiques S2. Vérification de la conformité au RGCPE le long du projet S3. Service d'accompagnement technique en EE/durabilité S4. Audit interne des projets.

II.3.4. Regroupement des actions en fonction du nombre de citations

La figure II.4 illustre la fréquence des citations des actions en ordonnant ces actions par nombre de citations de manière décroissante. Cela permet d'obtenir une visualisation claire et ordonnée des actions les plus fréquemment citées à celles qui le sont le moins, offrant ainsi une perspective sur l'importance relative accordée à chaque action par les experts. Cette méthode de représentation graphique aide à l'identification rapide des actions prioritaires qui nécessitent une attention particulière en fonction de la fréquence de leur citation.

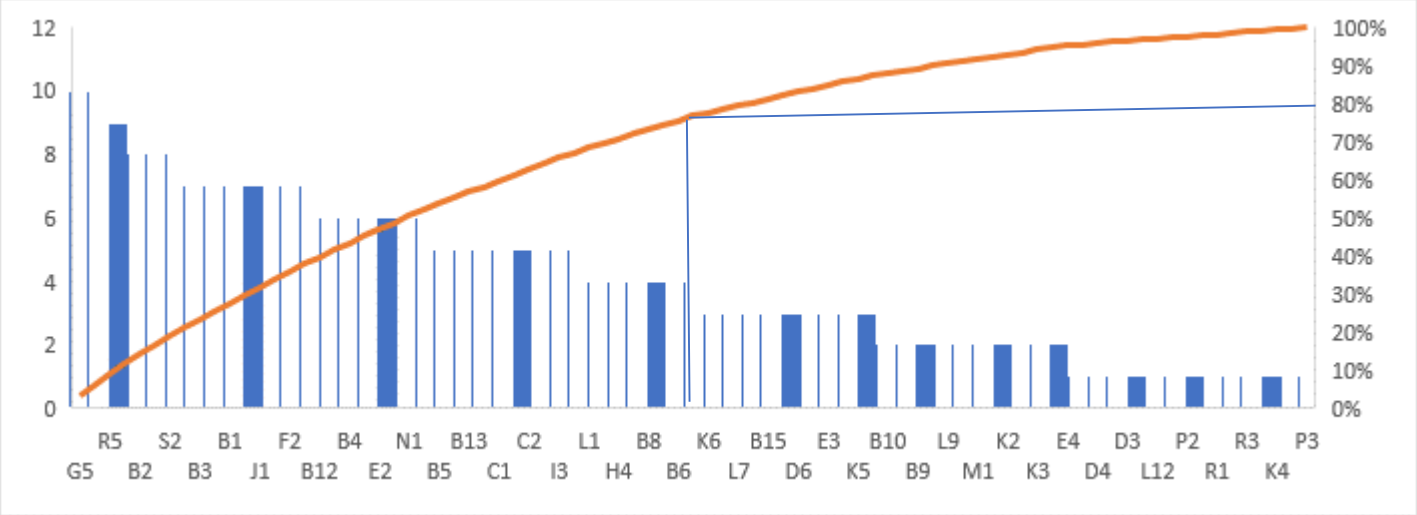


Figure II. 4. Score de citation des actions d'amélioration

En divisant le nombre de citations en 4 intervalles de [10-7.5[; [7.5-5[; [5-2.5[; [2.-,0[, les actions peuvent être classées en : actions très importantes, importantes, modérées et sans importance. Il s'agit d'une simple hiérarchisation des actions dans le but de distinguer les actions les plus citées dans le processus MOD.

Tableau II. 5. Les actions d'amélioration les plus citées – Intervalle [10-7.5[.

Code	Actions d'amélioration
G5	BET spécialisée dans l'EE
H1	Révision du CPS du BCT en ajoutant des tâches pour assurer l'EE
R5	Création d'une base de données sur la consommation de PB
I2	Révision des fiches d'examen architectural
B2	Inclure la compétence et l'expérience de l'EE dans le Contrat de l'architecte programiste
G1	Révision du CPS Type du BET
I1	Promouvoir l'architecture bioclimatique dans l'examen des études architecturales
S2	Circulaire sur la vérification de la conformité avec le RGCPE

Les actions d'amélioration les plus citées sont: BET spécialisé dans l'énergie, révision du cahier des prescriptions spéciales (CPS) de le BCT en ajoutant des tâches pour assurer l'EE, établissement d'une base de données sur la consommation des PB, révision des fiches d'examen architectural, inclusion de la compétence et de l'expérience de l'EE dans les documents de concours architectural, révision du CPS type du BET, promotion de l'architecture bioclimatique

dans la révision des études architecturales, et diffusion d'une vérification sur les employés sur leur conformité au Règlement général de construction sur la performance énergétique (RGCPE)[20]. Le tableau II.5 résume ces actions d'amélioration les plus citées avec leurs codes.

La **figure II.4** montre qu'en agissant sur les actions du premier intervalle [10-7.5[(8 actions, représentant 10% des actions), et du second intervalle [7.5-5[(14 actions, représentant 17%) ; et une partie du troisième intervalle [5-2.5[; il est possible d'atteindre plus de 80% de la performance étudiée en agissant sur 50%. La figure II.4 montre que la règle de Pareto de 20/80 n'est pas appliquée sur ces résultats en raison de la petite taille de l'échantillon étudié et de sa diversité. En d'autres termes, chaque répondant a eu une réponse différente en fonction de la phase dans laquelle il travaille. Cependant, il est essentiel de connaître 50% des actions les plus citées à cibler dans le processus de la MOD.

II.3.5. Regroupement qualitatif des actions

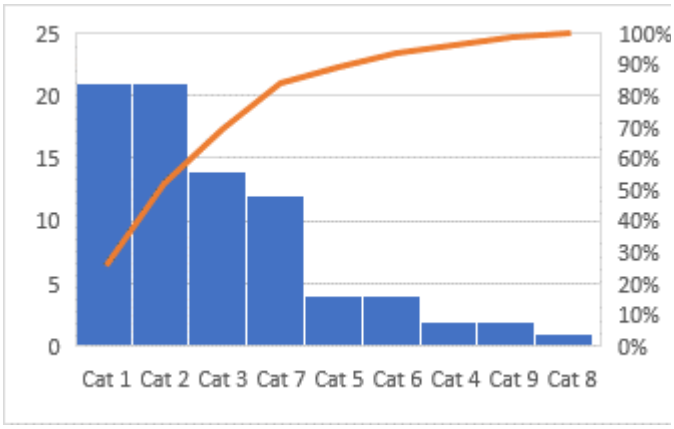
Un autre point de vue présenté dans cette étude a été de trier les actions d'amélioration en catégories basées sur la nature des actions collectées. En conséquence, 9 catégories ont été identifiées qui sont liées à : la standardisation des pièces écrits, les fiches de contrôle, les méthodes de travail, l'aide à la décision, le financement, les décisions simples, la coordination, l'expérience et la formation. Le tableau II.6 présente ces catégories avec quelques explications relatives à ces catégories.

Tableau II. 6. Catégories d'actions d'amélioration

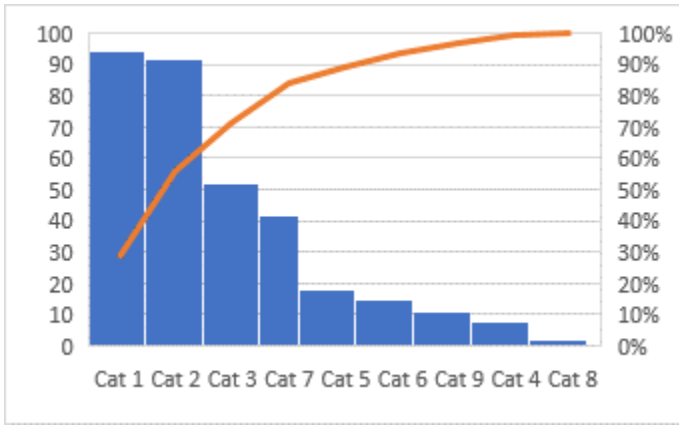
Catégorie (Cat.)	Intitulé	Explication
Cat 1.	**Standardisation des pièces écrites**	La mise en conformité des pièces écrites des marchés publics (conventions, CPS, RC) et l'établissement de pièces type.
Cat 2.	**Fiches de contrôle**	Révision des fiches de contrôle et établissement de ces fiches pour certaines étapes.
Cat 3.	**Méthodes de travail**	Les méthodes de travail et recommandations pour l'examen
Cat 4.	**Aide à la décision**	Développement d'outils d'aide à la décision autres que les fiches de contrôle.
Cat 5.	**Financement**	
Cat 6.	**Simples décisions**	
Cat 7.	**Coordination**	
Cat 8.	**Experience**	
Cat 9.	**Formation**	

[20] Règlement général de la construction sur la performance énergétique (RGCPE)

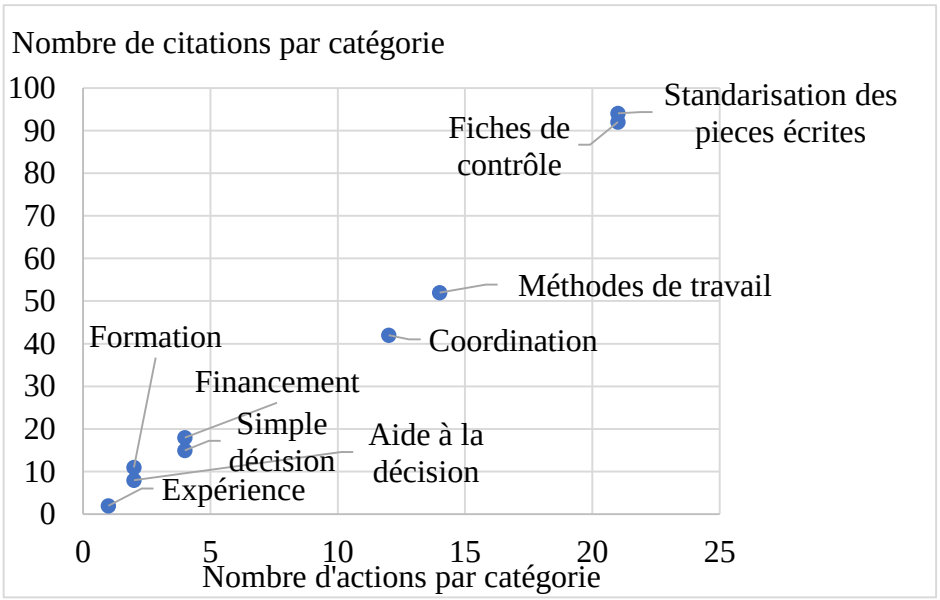
La répartition du nombre de citations et du nombre d'actions par catégorie donnent les graphiques suivants comme afficher dans la **figure II.5** :



5.a. Nombre d'actions par catégorie



5.b. Nombre de citations par catégorie



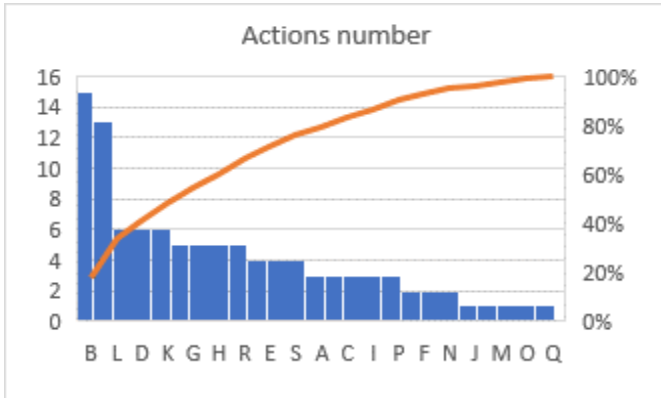
5.c. Corrélation entre le nombre d'actions et le nombre de citations par catégorie

Figure II. 5. Regroupement qualitatif des actions

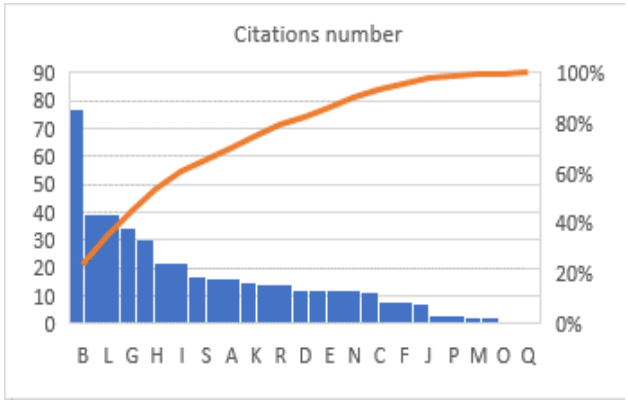
Les **figures II.5.a et II.5.b** montrent que les principales catégories sont : la standardisation des pièces écrits (cat.1), les fiches de contrôle (cat.2), les méthodes de travail (cat.3) et la coordination (cat.7). Ces 4 catégories couvraient plus de 80% des citations et actions. Les deux graphiques suivent le même schéma et montrent presque le même classement des catégories. La corrélation entre le nombre de citations et le nombre d'actions par catégorie a été observée et a donné lieu à une corrélation significative avec un coefficient de corrélation de 0,99 (voir **figure II.5.c**). En d'autres termes, la corrélation signifie que plus la catégorie est citée, plus le nombre d'actions à entreprendre est élevé.

II.3.6. Regroupement des actions selon les phases du processus MOD

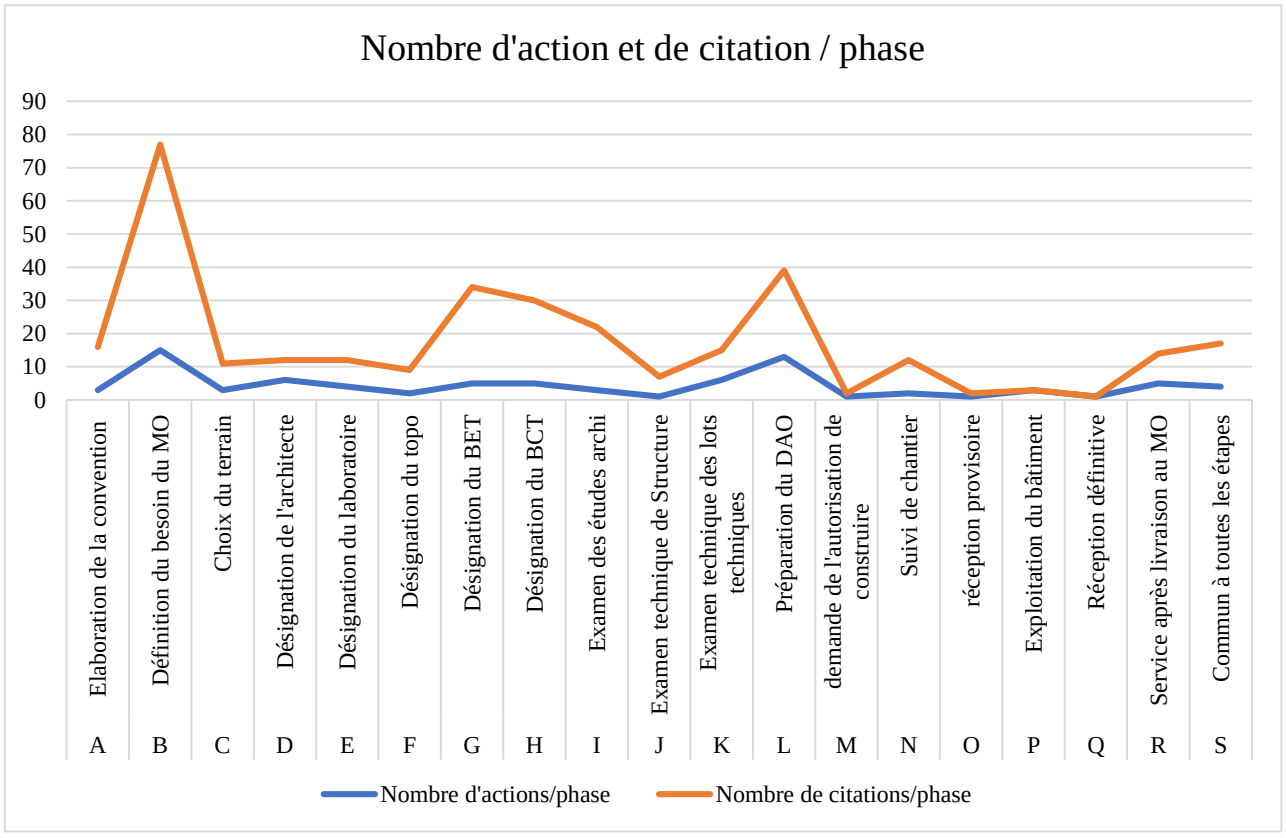
Un regroupement par phase est également présenté en mettant par ordre décroissant le nombre de citations et le nombre d'actions par phase (voir **Figure II.6**):



a. Nombre d'actions par phase



b. Nombre de citations par phase



c. Présentation séquentielle – comparaison entre le nombre d'actions et le nombre des citations par phase

Figure II. 6. Bilan des citations global toute action confondue par phase

Dans toutes les étapes, les experts ont défini des actions d'amélioration possibles. La figure II.6 montre la variation du nombre d'actions citées par les experts. Cela a permis d'évaluer l'importance de la phase du processus de MOD. La distance entre les deux courbes montre que le nombre de citations d'actions est plus important que le nombre d'actions. Ainsi, plus la différence entre le nombre de citations et le nombre d'action dans une phase est élevée, plus la phase est importante. Par conséquent, l'ordre des phases en fonction de leur

importance a été séquentiellement le suivant : B (définition des besoins du MO), G (désignation de BET), H (désignation de BCT), I (examen de la conception architecturale), L (préparation du dossier d'appel d'offres pour la désignation de l'entrepreneur), N (supervision du chantier), R (service après livraison au MO), et enfin S (les actions proposées qui agissent sur toutes les étapes).

II.4. Discussion

Le rapport de l'AIE a recommandé au gouvernement marocain de donner la priorité aux mesures les plus importantes et les plus urgentes, tout en veillant à ce que les mesures actuelles se traduisent par des actions sur le terrain (**AIE, 2019b**). En se basant sur l'AIE **(2019a)** l'analyse visant à identifier les solutions les plus rentables et les données permettant d'évaluer les progrès, cette étude vise à répondre à cette recommandation au niveau du processus MOD. Ainsi, les actions et les phases les plus importantes pour la promotion de l'EE dans le processus MOD ont été mises en évidence.

II.4.1. Actions d'amélioration prioritaires

Comme indiqué dans la section II.3.4, le regroupement quantitatif des actions d'amélioration a donné lieu aux actions prioritaires. Les actions prioritaires ont été définies en fonction du nombre de citations qui se situait dans l'intervalle [10-7,5[. Chaque action mise en évidence dans cette étude a sa raison. Le **tableau II.7** présente les raisons de la priorisation des actions d'amélioration dans le premier groupe, qui est l'intervalle [10-7.5[.

Tableau II. 7. Actions prioritaires

Code	Les actions d'amélioration les plus prioritaire	Commentaire
G5	BET spécialisés en énergétique	Recours à des BET spécialisés en énergétique pour le conseil technique le long du projet permet mieux d'assister le contrôle et de réagir en temps opportun.
H1	Révision du CPS Type du BCT en ajoutant des missions pour garantir l'EE	Révision du CPS Type en ajoutant des missions pour garantir l'EE dans les études tels que : la vérification de la conformité du bâtiment au RTCM[21] ou la vérification des données de la fiche de conformité, la vérification de l'étude énergétique, la vérification de l'étude de l'éclairagisme, la vérification de l'étude sur les ER. Ces vérifications visent à confirmer et à optimiser la pertinence des études, permettant ainsi d'atteindre les objectifs fixés par le MO et le MOD.
R5	Etablissement d'une banque de donnée sur la consommation des BP	Etablissement d'une banque de donnée sur la consommation des Equipements publics permet de constitue un argumentaire pour convaincre les MOD et MOE de l'EE à travers des exemples concrets.
I2	Révision des fiches d'examen architectural	Révision des fiches d'instruction (prévoir la vérification de la présence de la fiche de conformité, vérifications des coupes y afférentes, la présence de l'isolation prévue par la fiche dans

[21] Réglementation thermique dans la construction au Maroc (RTCM)

		les plans, la vérification de la présence des engagements énergétiques et environnementaux présentés lors du concours....), ces fiches représentés des points de contrôles très intéressantes ; une fois le projet réussi à passer par ces fiches ; les futures modifications seront très difficiles car le projet devient figé.
B2	Prévoir dans le RC de la désignation de l'architecte programmiste la compétence et l'expérience en EE	Intégrer le RC du programiste des profils dotés d'une expertise en efficacité énergétique (EE) et exiger des projets de référence performants sur le plan énergétique est essentiel. Le programiste joue un rôle déterminant dans le projet étant donné qu'il est le premier acteur à intervenir. Il possède la capacité d'orienter le projet vers l'EE ou non. Par conséquent, sa maîtrise et son expérience en matière d'EE constituent des leviers essentiels pour guider efficacement le projet dans cette direction.
G1	Révision du CPS Type du BET	Révision du CPS Type du BET en ajoutant des missions garantissant l'EE dans les études tels que : la mise en conformité du bâtiment au RTCM avec édition de la fiche de conformité, étude de choix de l'isolation, étude de simulation énergétique, étude de l'éclairagisme avant l'établissement des plans de lustrerie, étude sur les ER. Ces études constituent la base d'intégration de l'EE dans les projets de BP.
I1	Promouvoir l'architecture bioclimatique dans l'examen des études architecturales	L'architecture bioclimatique procure de l'économie d'énergie gratuitement, Promouvoir l'architecture bioclimatique dans l'examen des études architecturales via : l'Elaboration d'un guide sur l'architecture bioclimatique, via l'introduction de points de contrôle dans les fiches de contrôle permet d'assurer cette économie.
S2	Circulaire de la vérification de la conformité au RGCPE	Prévoir un circulaire pour la démarche de vérification de la conformité au RGCPE tout en répartissant les rôles des intervenants internes du processus, permet avec une action gratuite et instantanée donnant un élan à l'EE.

II.4.2. Phases et catégories prioritaires du processus MOD

Parallèlement, le regroupement des actions d'amélioration a également entraîné les phases prioritaires en fonction de leurs citations. Comme le montre la figure II.6, l'**identification des besoins et exigences du maitre d'ouvrage** (phase B) est une étape clé du projet de construction. Au cours de cette étape, la demande en énergie, le budget pour les décisions liée d'EE, les contraintes de l'adoption de ces décisions qui pourraient affecter le calendrier sont discutés et convenus. Cette étape est nécessaire pour assurer le bon déroulement du projet. Les personnes interrogées ont souligné cette étape comme étant la plus importante, ce qui reflète leur conscience de son importance. (**Deng & Poon, 2013)** ont signalé que les grands bâtiments publics (BP) chinois rencontrent des problèmes après quelques années de fonctionnement. Ils ont pointé du doigt l'absence de programmation architecturale, phase durant laquelle les besoins du maître d'ouvrage (MO) sont identifiés, comme un facteur significatif contribuant à cette situation. Ils ont également relevé un grand écart entre les

meilleures pratiques et les pratiques effectivement mises en œuvre lors de cette phase de projet (**Deng & Poon, 2013**).

Le **bureau d'études** (BET) (phase G) joue un rôle très important dans la construction en général et dans l'optimisation énergétique en particulier. Le BET propose des solutions, compare les solutions, optimise les solutions, suit et contrôle l'application des résultats de son étude dans l'exécution. Par conséquent, la sensibilisation, l'expérience et les compétences sont essentielles pour assurer sa mission. La désignation du BET est de la responsabilité du Maître d'Ouvrage Délégué (MOD). Réussir cette désignation soulage le MOD et garantie l'EE dans le projet.

Dans la phase suivante, les **bureaux de contrôle** (BCT) (phase H) complètent, contrôlent et optimisent le travail des BET. La désignation du BCT est une phase aussi importante que celle du BET. Cependant, le rôle du BCT apparaît évidemment lorsque le travail du BET est inefficace. Il est principalement considéré comme un point de contrôle et fournit une garantie pour le MOD et le MO.

L'examen des études **architecturales** (phase I) permet de vérifier le maintien de la logique énergétique convenu dans les étapes préalables, de comparer plusieurs alternatives afin d'identifier la plus appropriée pour l'EE, comme le présente (**De Castro, 2005). (De Castro, 2005**) présente un outil de décision multicritères qui aide à la décision architecturale.

Le dossier d'appel d'offres (DAO)[22] (phase L) est composé des pièces maîtresses de l'exécution de la construction, dans laquelle le projet est représenté sur papier, à savoir le CPS, le RC, les plans architecturaux et les plans techniques. Par conséquent, tout défaut, toute non-conformité ou tout oubli des concepts de l'EE dans le DAO influencerait l'adoption effective de l'EE dans le projet. Un recours à des avenants (contrats supplémentaires pour pallier au défaut du DAO d'origine) peut remédier à cela, mais, il est toujours accompagné d'une influence négative sur le coût, sur le délai du projet. Le cas échéant (cas ou aucun avenant n'est prévu) le projet lui-même est influencé dans sa qualité, sa conformité, le confort ressenti, sa maintenance et sur sa durée de vie. Il est nécessaire de s'assurer que les engagements annoncés dans la conception et les études sont effectivement mis en œuvre sur place (**AIE, 2019b**). La prestation convenue en DAO doit être réalisée selon les normes.

Une supervision suffisante du chantier (phase N) permet de s'assurer que les besoins, les conceptions et les objectifs du projet définis dans la DAO se traduisent par des actions sur le chantier.

La phase R qui est le **service post-livraison au MO** concerne la maintenance et l'assurance de la bonne exploitation des biens immobiliers du projet. Malgré son importance, ce service demeure insuffisamment développé par le Maître d'Ouvrage Délégué (MOD) de l'État marocain, bien qu'il soit intégré dans ses missions et son organigramme. Les entretiens avec les experts ont souligné l'importance d'un suivi post-livraison solide. Ce suivi permettrait d'élaborer un tableau de bord consolidé reflétant l'impact des décisions

[22] Dossier d'appel d'offres (DAO)

prises tout au long du projet sur le Budget Prévisionnel. Un tel outil offrirait au MOD l'opportunité de tirer des enseignements de ses erreurs, d'assumer pleinement la responsabilité de ses décisions et d'identifier, grâce à une analyse des données approfondie, les solutions financièrement les plus avantageuses (**AIE, 2019b**).

Les actions communes à toutes les phases, (Indicateurs énergétiques ; Vérification de la conformité au RGCPE le long du projet ; Service d'accompagnement technique en EE/durabilité ; Audit interne des projets), elles sont codifiées conventionnellement par phase S, sont des actions essentielles et déterminantes et peuvent avoir un impact sur l'identité énergétique du projet. Les indicateurs de performance sont importants pour détecter la déviation de l'EE et garantissent la mesure des écarts en temps opportun, l'audit interne sur les projets permet le contrôle à posteriori, il permet de fournir un retour d'information après la fin de chaque phase et permet de surveiller la présence des actions d'amélioration suggérées dans toutes les phases du MOD.

Le regroupement par catégorie a montré que des efforts considérables doivent être faits dans l'élaboration des documents écrits des marchés publics, des fiches de contrôle et des méthodes de travail. De plus, la coordination entre les phases du MOD est un élément important mentionné dans cette étude. À cette fin, la modélisation des données du bâtiment (BIM) est un outil fiable pour assurer la coordination entre les phases et améliorer la vision globale et garantir la vision initiale déclarée dans la définition des exigences du MO. En effet, ces exigences peuvent devenir floues au fur et à mesure que le projet avance et que diverses parties prenantes s'impliquent. Les actions qui doivent être présentes dans toutes les étapes garantissent la pérennisation de la volonté exprimée initialement par le MO et MOD dans la définition du besoin et de promouvoir l'EE dans le BP, qui est une volonté exprimée par le Maroc.

II.4.3. Actions d'accompagnement à la mise en œuvre des actions EE

Ce chapitre met l'accent sur diverses mesures et politiques visant à accroître l'efficacité énergétique des bâtiments publics en agissant sur le processus MOD. Ce processus peut être appliqué volontairement à tous les maîtres d'ouvrage. Pour une mise en œuvre efficace du cadre suggéré, il est conseillé au MOD d'intégrer les actions suggérées suivantes :

II.4.3.1. Présentation de l'approche :

La définition claire du modèle proposé, incluant ses objectifs et défis, est essentielle pour les parties prenantes. Une présentation détaillée aidera les participants à comprendre et à mettre en œuvre le modèle de manière efficace. Des ateliers sont planifiés pour partager le modèle proposé et transférer les connaissances nécessaires aux parties concernées.

II.4.3.2. Désignation d'une équipe dédiée au contrôle de l'efficacité énergétique

Le pilotage de la mise en œuvre devra être fait par un corps multidisciplinaire contenant au moins un architecte et un ingénieur et un cadre d'un service externe au processus et ayant une vue sur toute l'étude qui a été faite dans le cadre de ce projet, pouvant faire le

lien entre les diverses actions amélioratives afin de corriger tout dysfonctionnement dans l'application en temps opportun aussi il doit avoir l'œil sur les actualités du secteur en permanence : ce corps donnera de la matière informative nécessaire, opérera à des audits internes, motivera et corrigera les dysfonctionnements.

Il est recommandé de designer une équipe parmi les personnes les plus motivées et les plus sensibilisées à la problématique énergétique et environnementales et ayant une connaissance profonde du processus, car elle constituera l'équipe chargée de l'accompagnement et du contrôle de la mise en pratique de la démarche, en fait c'est le garant de la réussite de cette démarche.

II.4.3.3. Formation et sensibilisation

Un plan de formation sur mesure est impératif pour l'équipe désignée pour l'accompagnement. Ce plan devrait englober des thèmes tels que l'architecture bioclimatique, l'efficacité énergétique intégrée dans les lots techniques, et l'isolation. Il est souhaitable qu'un cabinet d'ingénierie spécialisé dans la formation soit mandaté pour l'élaboration de ce programme de formation.

Le savoir et l'expertise amassés au cours de cette formation devront être diffusés aux parties prenantes, en sensibilisant les gestionnaires de projets de BP et les encadrants tout au long du processus. Cette sensibilisation devrait également comprendre l'immersion des parties prenantes dans des environnements de travail qui incarnent les principes d'économie d'énergie. Ils devraient par exemple être incités à éteindre l'électricité en quittant les locaux, des affiches soulignant l'engagement de l'entité en faveur de l'EE doivent être communiquées, les terrasses et les parkings doivent être couvert avec des panneaux solaires.

La certification ISO 50001 serait une étape significative pour la MOD dans son objectif de sensibilisation des fonctionnaires et surtout des examinateurs des bâtiments publics. Ils peuvent simplement s'inspirer des bonnes pratiques observées dans leur entourage.

II.4.3.4. Acquisition et développement de logiciels

Les logiciels de simulation sont un outil essentiel pour modéliser un bâtiment ou vérifier le modèle proposé par le BET, comme TRNSYS ou Design Builder. Il est également nécessaire d'améliorer les compétences des ingénieurs thermiciens et autres pour l'utilisation du logiciel BINAYATE en raison de son importance en tant qu'outil réglementaire.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a mis en lumière une approche managériale novatrice pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments publics marocains, en se concentrant sur le processus de la maîtrise d'ouvrage déléguée. L'analyse détaillée du processus, complétée par des entretiens avec 17 experts du domaine, a permis d'identifier et de hiérarchiser des actions concrètes pour renforcer l'efficacité énergétique à différentes phases du processus de la maitrise d'ouvrage déléguée.

Ce processus représente une étude de cas pertinente, il a été choisie en raison de la diversité des projets qu'il produit, mettant en lumière le rôle central des acteurs internes dans le processus qui détiennent un pouvoir significatif d'influence sur les acteurs externes du processus, soulignant leur rôle dans l'amélioration de l'efficacité énergétique à chaque étape.

La recherche a permis d'identifier et de prioriser diverses actions et étapes pertinentes pour la promotion de l'efficacité énergétique, offrant une vue claire et organisée pour une mise en œuvre efficace. Les résultats, axés sur les actions et les étapes, minimisent l'effort et le temps nécessaires, optimisant ainsi le processus.

Bien que cette étude se limite à l'analyse des acteurs internes et n'apporte pas de modifications au processus lui-même, elle jette les bases pour des recherches futures qui pourraient envisager une refonte plus profonde du processus pour faciliter davantage l'intégration de l'efficacité énergétique, ou des études futures où l'échantillon pourrait s'étendre pour inclure tant les acteurs internes qu'externes, fournissant ainsi une vue d'ensemble plus exhaustive. Ce travail constitue une étape cruciale vers une meilleure compréhension et une amélioration concrète de la gestion énergétique des bâtiments publics au Maroc, ouvrant la voie à des bâtiments plus respectueux de l'environnement et économiquement plus efficients.

En conclusion, bien que l'accent ait été mis sur l'amélioration de l'efficacité énergétique à travers une approche managériale, il est crucial de noter que la réglementation thermique joue un rôle tout aussi important dans cette démarche. Le prochain chapitre se penchera de manière approfondie sur les aspects réglementaires thermiques, en examinant la législation en vigueur, ses impacts et son efficacité dans la promotion de l'efficacité énergétique des bâtiments publics marocains.

Références du chapitre

ADEME. (2009). *Utilisation rationnelle de l ' énergie dans les bâtiments publics*. Intelligent Energy, Europe.

Agostino, D., Cuniberti, B., & Bertoldi, P. (2017). Energy consumption and efficiency technology measures in European non-residential buildings. *Energy & Buildings*, 1–41. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.062

Agouzoul, A., Tabaa, M., Chegari, B., Simeu, E., Dandache, A., & Alami, K. (2021). Towards a Digital Twin model for Building Energy Management: Case of Morocco. *Procedia Computer Science*, *184*(1), 404–410. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.03.051

Alam, M., Zou, P., Stewart, R., Bertone, E., Sahin, O., Buntine, C., & Marshall, C. (2018). Government championed strategies to overcome the barriers to public building energy efficiency retrofit projects. *Sustainable Cities and Society*, 1–41. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.022

Alhamwi, A., Kleinhans, D., Weitemeyer, S., & Vogt, T. (2015). Moroccan National Energy Strategy reviewed from a meteorological perspective. *Energy Strategy Reviews*, *6*(1), 39–47. https://doi.org/10.1016/j.esr.2015.02.002

Boharb, A., Allouhi, A., Saidur, R., Kousksou, T., Jamil, A., Mourad, Y., & Benbassou, A. (2016). Auditing and analysis of energy consumption of an industrial site in Morocco. *Energy*, *101*(1), 332–342. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.035

Chami, A. (2020). *Annual report*.

Copiello, S. (2018). Economic parameters in the evaluation studies focusing on building energy efficiency: A review of the underlying rationale, data sources, and assumptions. *Energy Procedia*, *157*, 180–192. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.179

Costa-campi, M., García-quevedo, J., & Segarra, A. (2015). Energy efficiency determinants: An empirical analysis of Spanish innovative fi rms. *Energy Policy*, *83*(1), 229–239. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.01.037

Cour des comptes. (2018). *Rapport annuel de la Cour des comptes au titre de l'année*.

Danish, M., Senjyu, T., Ibrahimi, A. M., Ahmadi, M., & Howlader, A. M. (2019). A managed framework for energy-efficient building. *Journal of Building Engineering*, *21*, 120–128. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.013

De Castro, E. (2005). *Méthode d'aide à la conception architecturale basée sur l'analyse multicritère et sur des données simulées des comportements des bâtiments*. l'Université Fédérale de Juiz de Fora.

Delgado, L., & Shealy, T. (2018). Opportunities for greater energy efficiency in government facilities by aligning decision structures with advances in behavioral science. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 3952–3961. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.078

Deng, Y., & Poon, S. (2013). Professional practice in programming large public buildings in China: A questionnaire survey. *Frontiers of Architectural Research*, *2*(2), 222–233. https://doi.org/10.1016/j.foar.2013.04.002

Energy performance of buildings, 1 (2010).

Dongmei, S. (2018). Research and Application of Energy Consumption Benchmarking: Method for Public Buildings Based on Actual Energy Consumption. *Energy Procedia*, *152*(1), 475–483. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.256

Dref, N. (2019). *Efficacité énergétique: L'Etat, mauvais élève*. Leconomiste. https://www.leconomiste.com/article/1043780-efficacite-energetique-l-etat-mauvais-eleve

Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2020). Energy & Buildings Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy & Buildings*, *225*(1), 1–20. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322

El Iysaouy, L., El Idrissi, N., Tvaronavičienė, M., Lahbabi, M., & Oumnad, A. (2019). Towards energy efficiency: case of Morocco. *Insights into Regional Development*, *1*(3), 259–271. https://doi.org/10.9770/ird.2019.1.3(6)

Elo, S., & Kyngäs, H. (2008). The qualitative content analysis process. *Journal of Advanced Nursing*, *62*(1), 107–115. https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2007.04569.x

Fatiha, B., & Karim, M. (2019). Key Determinants of Energy Demand: Case of Morocco. *International Journal of Economics and Finance*, *11*(5), 50–58. https://doi.org/10.5539/ijef.v11n5p50

Font, J. (2019). The Integration of Energy Efficiency Measures in Construction in the Context of the Objectives of the EU's 2020-2030 Horizons: District Heating and Cooling Networks. *RCDA*, *1*(1), 1–55. https://doi.org///doi.org/10.17345/rcda2433 1

Franck, R., Jover, G., & Hovorka, F. (2014). *L'efficacité énergétique du bâtiment* (Eyrolles (ed.)). Librairie Eyrolles.

Garcia, D., Cumo, F., Tiberi, M., & Sforzini, V. (2016). Cost-Benefit Analysis for Energy Management in Public Buildings: Four Italian Case Studies. *Energies*, *9*(522), 1–17. https://doi.org/10.3390/en9070522

Haddadi, T., Mourabit, T., & Haddadi, A. (2017). Évaluation de la Durabilité Dans les Marchés Publics Marocains. *Centre National de Documentation*, 1–9. https://atlas.irit.fr/PIE/VSST/Actes-VSST2018-Toulouse/Mourabit.pdf

Hamdaoui, S., Mahdaoui, M., Allouhi, A., Alaiji, R., Kousksou, T., & Bouardi, A. (2018). Energy demand and environmental impact of various construction scenarios of an office building in Morocco. *Journal of Cleaner Production*, 1–39. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.298

Hamza, N., & Greenwood, D. (2009). Energy conservation regulations: Impacts on design and procurement of low energy buildings. *Building and Environment*, *44*(5), 929–936. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.010

Hani, A., & Koiv, T.-A. (2012). Energy Consumption Monitoring Analysis for Residential, Educational and Public Buildings. *Smart Grid and Renewable Energy*, *03*(1), 231–238. https://doi.org/10.4236/sgre.2012.33032

IEA. (2019a). *Energy Efficiency program for public buildings*. Policies. https://www.iea.org/policies/8575-energy-efficiency-program-for-public-buildings

IEA. (2019b). *Energy policies beyond IEA countries*.

IEA. (2019c). *International Energy Agency publishes new review of Morocco's energy policies - News - IEA*. News. https://www.iea.org/news/international-energy-agency-publishes-new-review-of-moroccos-energy-policies

IEA. (2021). *Energy-related CO2 emissions from buildings have risen in recent years*. Buildings: A Source of Enormous Untapped Efficiency Potential. https://www.iea.org/topics/buildings

Conception de l'environnement des bâtiments, Pub. L. No. 23045, 1 (2009).

Julius, A. (2021). *Key Success Factors for Successful Delegation in Construction Project Management Master Thesis*. Joint Study Programme of Metropolia UAS and HTW Berlin.

Khatib, N. (2018). *Country Profile: Morocco 2018*.

Kuittinen, M., & Roux, S. (2018). *Procurement criteria for Low-Carbon Building*. Ministry of the Environment. http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4788-3

Lang, S. (2004). Progress in energy-efficiency standards for residential buildings in China. *Energy and Buildings*, *36*(1), 1191–1196. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.09.014

Le Coz, C., & Maurel, J. (2019). L'efficacité énergétique, principal axe de la révolution du bâtiment. *Investir - Journal Des Finances*, *2392*, 18–19. https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bsu&AN=139592805&lang=fr&site=ehost-live

Liu, G., Wu, Z., & Hu, M. (2012). Energy Consumption and Management in Public Buildings in China : An Investigation of Chongqing. *Energy Procedia*, *14*(2011), 1925–1930. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.887

López-ochoa, L., Bobadilla-martínez, D., Las-heras-casas, J., & López-gonzález, L. (2019). Towards nearly zero-energy educational buildings with the implementation of the Energy Performance of Buildings Directive via energy rehabilitation in cold Mediterranean zones : The case of Spain. *Energy Reports*, *5*(1), 1488–1508. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.008

Lopez, F., & Santiago, M. (2015). Sensitivity study of an opaque ventilated façade in the winter season in different climate zones in Spain. *Renewable Energy*, *75*(1), 524–533. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.031

Ma, H., Li, C., Lai, J., Yang, F., & Zihao, L. (2019a). Analysis of school building energy consumption in Tianjin, China. *Energy Procedia*, *158*(1), 3476–3481. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.924

Ma, H., Li, C., Lai, J., Yang, F., & Zihao, L. (2019b). Investigation on energy consumption of public buildings in Tianjin. *Energy Procedia*, *158*(1), 3427–3432. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.932

Merini, I., Molina-García, A., García-Cascales, M., Mahdaoui, M., & Ahachad, M. (2020). Analysis and Comparison of Energy Efficiency. *Energies*, *13*(5979), 1–21. https://doi.org/10.3390/en13225979

Monstadt, J. (2007). Urban governance and the transition of energy systems: Institutional change and shifting energy and climate policies in Berlin. *International Journal of Urban and Regional Research*, *31*(2), 326–343. https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.2007.00725.x

Najjar, M., Figueiredo, K., & Haddad, A. (2018). Increasing energy efficiency of building envelopes towards nearly zero energy buildings integrating BIM and LCA. *Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 1–28.

Nourdine, B., & Saad, A. (2020). About energy efficiency in Moroccan health care buildings. *Materials Today: Proceedings*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.135

Pact of Exemplary Administration, 1 (2019). http://www.mhpv.gov.ma/wp-content/uploads/2020/04/Pacte-Exemplarite-Administration.pdf

Pan, W., & Garmston, H. (2012). Building regulations in energy efficiency: Compliance in England and Wales. *Energy Policy*, *45*(2012), 594–605. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.010

Ruiz, L., Rueda, R., Cuéllar, M., & Pegalajar, M. (2017). Energy consumption forecasting based on Elman neural networks with evolutive optimization. *Expert Systems with Applications*, *92*(1), 1–25. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.09.059

Salvalai, G., Masera, G., & Sesana, M. (2015). Italian local codes for energy ef fi ciency of buildings: Theoretical de fi nition and experimental application to a residential case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*(1), 1245–1259. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.038

Simelyte, A. (2020). Promotion of renewable energy in Morocco. In *Energy Transformation Towards Sustainability* (pp. 249–287). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817688-7.00013-6

Tolón-becerra, A., Lastra-bravo, X., & Fernández-, V. (2013). Opportunities in Spanish energy efficiency: Current situation , trends and potential in the building sector. *Energy Procedia*, *42*(1), 63–72. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.006

Vergerio, G., Becchio, C., Delmastro, C., Lanzini, A., Corgnati, S. P., & Borchiellini, R. (2018). A decision-making process to support public administrations in defining local energy policies. *Thermal Science and Engineering Progress*, *6*, 398–409. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.01.016

Xu, P., & Chan, E. (2013). ANP model for sustainable Building Energy Efficiency Retrofit (BEER) using Energy Performance Contracting (EPC) for hotel buildings in China. *Habitat International*, *37*, 104–112. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.12.004

Yan-ping, F., Yong, W., & Chang-bin, L. (2009). Energy-efficiency supervision systems for energy management in large public buildings: Necessary choice for China. *Energy Policy*, *37*(1), 2060–2065. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.033

Zhang, Y., Bai, X., Mills, F., & Pezzey, J. (2018). Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review. *Energy and Buildings*, *172*, 279–294. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.017

Zhao, J., Xin, Y., & Tong, D. (2012). Energy consumption quota of public buildings based on statistical analysis. *Energy Policy*, *43*(1), 362–370. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.01.015

Chapitre III : Analyse de la Conformité et de l'Efficacité Énergétique des Bâtiments Publics Marocains Selon la RTCM

Résumé :

Ce chapitre évalue la conformité d'un bâtiment public à la Réglementation Thermique de la Construction (RTCM) et les bénéfices potentiels de cette conformité. L'étude examine en profondeur l'enveloppe du bâtiment dans les six zones climatiques pour analyser l'impact de la RTCM sur les performances énergétiques. L'étude montre que, pour le bâtiment étudié, l'enveloppe conventionnelle n'est que partiellement conforme à l'approche prescriptive, notamment pour le toit et le rez-de-chaussée. La mise en conformité améliore les performances dans des zones comme la zone 2 représentée par la ville de Tanger et la zone 6 représentée par la ville d'Errachidia mais la dégrade dans la zone 1. L'isolation du toit est très efficace dans les zones froides, Z3 et Z4, en réduisant les besoins de chauffage, mais elle est contreproductive dans la zone 1. L'isolation des murs a peu d'influence, sauf dans les zones 5 et 6. L'isolation du sol se traduit par une dégradation énergétique dans toutes les zones. Le vitrage avancé améliore significativement les résultats, surtout pour des TGBV élevés. L'approche de performance globale nommée approche performancielle est plus efficace que l'approche prescriptive par élément. Des recommandations sont proposées dans ce chapitre pour améliorer la réglementation et sa mise en œuvre. Cette étude met en évidence le potentiel d'une approche performancielle pour l'application de la RTCM dans les bâtiments publics au Maroc.

Introduction du chapitre

Le secteur du bâtiment et de la construction représente plus d'un tiers de la consommation mondiale d'énergie finale et environ 40 % du total des émissions directes et indirectes de CO_2, selon l'Agence internationale de l'énergie (**International Energy Agency, 2019**). Il se classe au deuxième rang mondial pour la consommation d'énergie, après les transports, et une part importante est consacrée à la climatisation et au chauffage.Cette consommation importante entraîne des coûts énergétiques de plus en plus élevés, ce qui incite les pays du monde entier à rechercher des solutions globales pour relever ces défis. Dans les pays en développement, l'accès facile à l'énergie, associé à l'utilisation généralisée d'appareils consommateurs d'énergie et à l'expansion rapide de la surface des bâtiments dans le monde, a accéléré la consommation mondiale de ressources énergétiques (**Jamil, 2022**). Il est donc impératif d'utiliser l'énergie de manière rationnelle et économique (**Abdou et al., 2021**). L'optimisation de l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments peut donc conduire à une réduction de la consommation d'énergie non renouvelable et de l'émission de gaz à effet de serre (**Ozoadibe & Obi, 2023**). L'efficacité énergétique (EE) est considérée comme le premier pilier de la révolution du bâtiment (**Aljawabra & Nikolopoulou, 2018**). Des analyses ont montré que l'efficacité énergétique est possible à une telle échelle qu'elle deviendra la "ressource énergétique primaire" dans de nombreux pays. Par conséquent, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est devenue un pilier des politiques énergétiques, en particulier dans les bâtiments publics (BP). (**Zhao, Xin, & Tong, 2012**) ont déclaré que le phénomène de forte consommation d'énergie et de faible efficacité énergétique des bâtiments publics est courant, ce qui signifie qu'il existe un grand potentiel d'économie d'énergie dans les bâtiments publics. De nombreux pays dans le monde ont mis l'accent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et sur l'utilisation rationnelle et économique de l'énergie (**El Asri et al., 2022**). (**Sick et al., 2020**) ont montré que plusieurs pays, dont l'Algérie, l'Égypte, la Turquie, la Syrie, le Liban, les Territoires palestiniens et la Tunisie, ont établi des réglementations thermiques pour le secteur du bâtiment. En outre, des pays comme la Tunisie, l'Algérie, l'Égypte et la Turquie ont rendu obligatoire l'application de ces réglementations thermiques. En revanche, la Jordanie, la Syrie et le Liban ont élaboré des réglementations thermiques qui sont en cours d'adoption. Au Maroc, le secteur du bâtiment est actuellement le deuxième secteur économique le plus énergivore ; après le secteur des transports, il représente 33% de la consommation totale d'énergie du pays (**AMEE, 2022**). Dans le cadre de la stratégie énergétique nationale, plusieurs actions ont été initiées, notamment la Réglementation Thermique de la Construction au Maroc (RTCM) à travers le Décret d'Urbanisme portant approbation du Règlement Général de la Construction fixant les règles de la performance énergétique générale de la construction et l'introduction de la fiche de conformité parmi les documents requis pour obtenir l'autorisation de construire. Cependant, les marchés publics restent à une efficacité énergétique réduite (**Haddadi, Mourabit, & Haddadi, 2017**). Pour preuve, la réglementation thermique marocaine est restée depuis sa publication au bulletin officiel en 2014, modestement appliquée dans le secteur tertiaire, y compris dans les BP. En conséquence, le Maroc s'emploie à faire de l'efficacité énergétique une priorité nationale en renforçant la législation existante, en élaborant des politiques et des normes pour une efficacité énergétique rentable, et en s'empressant d'adopter et de mettre en œuvre la Stratégie nationale d'efficacité énergétique pour 2030 afin d'atteindre les objectifs du gouvernement pour

2030, avec l'appui de ressources financières adéquates. L'objectif de notre étude est double : évaluer l'adhésion des bâtiments publics à la Réglementation Thermique des Bâtiments au Maroc (RTCM) et quantifier les avantages potentiels de la conformité à la RTCM pour ces établissements. Un examen complet des typologies d'enveloppe des bâtiments dans les six zones climatiques facilite l'étude de l'influence de la conformité au RTCM sur la performance énergétique. La structure de ce chapitre est la suivante : La section 2 contient une revue de la littérature pertinente et des études antérieures. La section 3 décrit la méthodologie utilisée dans cette recherche. La section suivante présente les résultats de l'étude et les analyses sont présentées dans l'avant-dernière section. Le chapitre se conclut par la mise en lumière des enseignements cruciaux tirés de cette étude.

III.1. Revue de la littérature

III.1.1. Implications politiques pour l'amélioration de l'efficacité énergétique

Les tendances actuelles, la forte croissance de la demande, les conflits et les préoccupations diplomatiques soulignant leur importance croissante, l'attention internationale portée aux questions énergétiques s'intensifie (**Modi et al., 2022**). Dans ce cadre global, le secteur du bâtiment contribue à environ 40 % de la consommation globale d'énergie, les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation en étant les principaux utilisateurs (**Lopez & Santiago, 2015**). Une attention particulière a été accordée aux bâtiments non résidentiels en Europe, y compris les bureaux privés, les installations commerciales et gastronomiques, les bâtiments de santé et d'enseignement, les structures industrielles et les bâtiments publics. Ces entités représentent environ un quart de la consommation d'énergie des bâtiments européens (**D'Agostino, Cuniberti, & Bertoldi, 2017**). Les bâtiments publics (BP), tels que les bureaux, les hôtels, les commerces de détail, les hôpitaux et les écoles, ont une forte intensité de consommation d'énergie (**Dongmei, 2018**). Au sein de l'Union européenne, l'amélioration de l'efficacité énergétique (EE) dans les bâtiments est devenue un élément clé de la politique énergétique. Ce développement politique est apparu dans les années 1970 et a d'abord pris la forme d'instruments de contrôle, de codes de construction, de campagnes d'information et d'incitations économiques (**Economidou et al., 2020**). La base réglementaire a été établie avec l'introduction de la directive sur la performance énergétique des bâtiments, qui a fixé des exigences minimales en matière d'efficacité énergétique pour les bâtiments neufs et rénovés (**Salvalai, Masera, & Sesana, 2015**). L'Allemagne a fixé des objectifs ambitieux en matière d'efficacité énergétique, notamment une réduction de 80 % de la demande d'énergie dans le secteur du bâtiment en à 2050, ainsi qu'un objectif intermédiaire visant à réduire la demande de chauffage de 20 % en 2020 (**Alam et al., 2019**). D'autre part, les municipalités italiennes ont largement contribué à la mise en œuvre des codes de réglementation énergétique des bâtiments (BERC), qui visent à réduire la consommation d'énergie des bâtiments et à encourager les pratiques de construction respectueuses de l'environnement (**Salvalai, Masera, & Sesana, 2015**). Le BERC a profondément influencé diverses parties prenantes du secteur du bâtiment, notamment les ingénieurs, les architectes, les planificateurs locaux et les entreprises de construction. En Espagne, les progrès en matière d'efficacité énergétique des bâtiments ont été plus lents que dans d'autres pays européens. Toutefois, la dernière version du code technique de la construction a permis de réaliser des avancées significatives, publié par le biais du décret

royal 732/2019, qui désigne les économies d'énergie et l'isolation thermique comme des éléments clés de l'efficacité énergétique des bâtiments (**Tolón-Becerra et al., 2013**). Au Royaume-Uni, des mesures visant à réduire la consommation d'énergie par le biais de réglementations en matière de construction ont été introduites en 1965, en mettant principalement l'accent sur une conception efficace. Au fil du temps, ces réglementations ont évolué pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre en abaissant progressivement la valeur U pour les murs exposés de 1,7 W/m^2K en 1965 à 0,35 W/m^2K en 2002. Ces réglementations ont nécessité des améliorations de l'épaisseur de l'isolation et des restrictions sur les surfaces vitrées des façades, ce qui a conduit à des contraintes perçues sur l'innovation dans la conception architecturale, les matériaux de construction et les systèmes de contrôle (**Hamza & Greenwood, 2009**). Au Maroc, la croissance démographique et l'augmentation substantielle de la demande d'électricité, à un rythme de 6 à 8 % par an, pèsent sur l'approvisionnement en énergie (**AMEE, 2022**). Le secteur de l'électricité est très dépendant de l'énergie, puisque plus de 90% de son approvisionnement énergétique est importé, principalement sous forme de combustibles fossiles, notamment le charbon, le gaz, le pétrole, les produits pétroliers et l'électricité. Cette dépendance à l'égard des importations détermine le profil et la politique énergétiques du Maroc.

III.1.2. Efficacité énergétique des bâtiments au Maroc

De nombreux travaux publiés au Maroc traitent de l'efficacité énergétique dans les bâtiments et la Réglementation Thermique Marocain. Ces travaux ont abouti à une variété d'idées, conclusions et recommandations, chacune ayant fait l'objet de discussions et d'examens détaillés. (**Merini et al., 2020**) ont étudié un nouveau bâtiment en construction dans la ville de Tanger dans la zone climatique Z2. Ils ont déterminé et analysé l'énergie thermique demandée par le bâtiment en utilisant le logiciel BINAYATE. Différentes couches de matériaux ont été introduites dans le logiciel BINAYATE, en tenant compte des différents éléments de construction du bâtiment : murs extérieurs, planchers, dalles intérieures, cloisons, portes et fenêtres. L'analyse a montré que le bâtiment étudié n'est pas conforme aux exigences du RTCM. Ainsi, une isolation thermique de 3 cm en polyuréthane a été adoptée pour les murs extérieurs, et un double vitrage a été utilisé pour atteindre la limite de demande d'énergie exigée par le RTCM. L'application de ces exigences a permis de réduire de 36 % la demande d'énergie pour le chauffage et la climatisation. L'application du RTCM a permis d'améliorer la performance énergétique, le confort intérieur et les économies d'énergie par rapport à la consommation énergétique actuelle. L'étude a montré qu'il ne suffit pas d'appliquer des mesures d'efficacité énergétique à l'enveloppe du bâtiment. Il est nécessaire d'appliquer des mesures supplémentaires telles que les systèmes d'éclairage et les appareils, qui, avec l'enveloppe, représentent une économie potentielle de 69 %. (**Mastouri et al., 2020**) ont mené une étude pour évaluer et comparer la performance thermique d'un bâtiment existant avec les exigences de performance du RTCM. Ils ont mené une étude de simulation dynamique sur un bâtiment existant à Ben-Guerir en utilisant le logiciel TRNSYS pour différentes configurations de certaines techniques passives. Ces techniques sont l'isolation en chanvre, les dalles creuses et les murs à forte inertie. Ils ont constaté que les techniques passives incorporées dans cette maison réelle sont plus que suffisantes pour répondre aux exigences du RTCM. En revanche, la version standard de cette maison, dans laquelle ces techniques sont absentes, ne répond pas aux

exigences du RTCM. Ainsi, il a été nécessaire d'intégrer des matériaux locaux simples pour l'isolation thermique en utilisant du chanvre et en renforçant l'inertie thermique avec des roches de Bouskoura. L'étude a conclu que l'intégration d'une enveloppe appropriée est nécessaire pour assurer le confort thermique intérieur et réduire les effets des fluctuations de température. En outre, les murs, le toit et le vitrage sont des facteurs clés de l'enveloppe du bâtiment car ils sont directement exposés aux conditions climatiques extérieures, telles que le rayonnement solaire, la température de l'air, l'humidité et le vent. (**El Kadiri et al., 2018**) ont proposé deux conceptions de maisons basse consommation à deux étages d'une superficie de 35 m2 chacune dans la ville de Ben-Guerir au Maroc (Zone 5), en prenant en considération plusieurs facteurs tels que le contexte climatique, la performance énergétique visée et le niveau de confort thermique requis. Ils comparent ensuite les résultats des conceptions proposées à ceux d'une maison conventionnelle. Les modèles de maisons proposés associent des matériaux de construction locaux et durables à des solutions innovantes afin de créer des maisons passives abordables, qui ont contribué à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Afin de réduire la demande énergétique des bâtiments et d'augmenter le confort thermique intérieur. Ils ont suggéré l'utilisation de murs doubles en briques creuses d'argile dans la première maison avec une isolation en laine de chanvre, un toit et une dalle de béton armé au premier étage avec une couche de laine de chanvre. Dans la seconde maison, les murs sont constitués d'un seul mur de briques creuses en terre cuite, d'un enduit et d'une couche de polystyrène extrudé. Le toit et le premier étage sont également composés d'une dalle en béton armé avec une isolation en polystyrène extrudé. Après analyse, il s'avère que la maison standard, dépourvue d'isolation thermique, ne répond pas aux exigences en termes de coefficient de transmission des éléments de l'enveloppe imposées par le RTCM. En revanche, la première et la deuxième maison, qui ont été isolées avec une couche d'isolant, répondent aux exigences du RTCM.

III.2. Nouveauté et contribution à la recherche

Cette étude présente une évaluation complète et distinctive de l'application de la Réglementation Thermique de la Construction Marocaine (RTCM) dans les bâtiments publics. Soulignant le potentiel tangible de l'adoption d'une approche basée sur la performance plutôt que prescriptive, notre étude comble une lacune importante dans la littérature existante sur la politique énergétique marocaine, étant donné le peu d'attention que cet aspect a reçu auparavant. L'étude se focalise sur la performance des bâtiments, examinant principalement le niveau de conformité des bâtiments publics avec le RTCM et les impacts qui en résultent. La raison pour laquelle nous nous concentrons sur les bâtiments publics découle de diverses considérations stratégiques. Initialement, le secteur des équipements publics au Maroc représente une fraction significative du budget national, réservant 10,2 milliards de dirhams pour 2022 et actualisant 4,616 milliards de dirhams en 2021 pour les nouvelles constructions et les rénovations. Il est important de noter que les bâtiments publics, en tant que structures intrinsèquement intensives en énergie, représentent un point de levier clé pour la politique énergétique, en particulier compte tenu de la dynamique économique unique selon laquelle les utilisateurs des bâtiments ne sont pas des contributeurs directs à l'investissement économique pendant les phases de conception ou d'exploitation. Les bâtiments publics sont également remarquables pour leur représentation symbolique de l'engagement de l'État en faveur de la durabilité, ce qui en fait un point focal crucial pour la recherche sur la réglementation énergétique. Enfin, la tendance du

secteur privé marocain à intégrer les initiatives couronnées de succès lancées par l'État amplifie l'influence potentielle de cette recherche sur la conformité à la réglementation dans les bâtiments publics.

III.3. Matériels et méthodes

III.3.1. Méthode adoptée

Dans cette étude, nous nous concentrons principalement sur les matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment, puisque c'est l'objet du RTCM. Pour identifier la typologie de l'enveloppe des bâtiments publics, nous avons adopté une méthodologie qui implique l'analyse des marchés publics. Nous avons sélectionné un échantillon de 10 contrats dans le portail des marchés publics et avons procédé à un examen approfondi pour identifier les matériaux de construction liés à l'enveloppe du bâtiment. Pour évaluer la conformité énergétique d'un bâtiment au Maroc, il est essentiel de déterminer s'il répond aux exigences du RTCM en utilisant l'une des deux approches : l'approche prescriptive (A-Pres) ou l'approche performancielle (A-Perf). Pour vérifier la conformité d'un bâtiment selon l'A-Pres, il faut calculer les coefficients de transmission thermique (U) des différents éléments composant l'enveloppe, à savoir : la toiture, les murs extérieurs et les ouvertures vitrées, ainsi que le facteur solaire équivalent (FS*) et la résistance thermique (R) des planchers au sol, puis les comparer aux exigences limites données dans le RTCM en fonction de la zone thermique et de la valeur du TGBV. L'A- Perf est obligatoire pour un TGBV supérieur à 45%. La vérification, selon l'approche A-Perf, est basée sur une simulation thermique dynamique. Il faut pour cela modéliser un bâtiment typique à l'aide d'un logiciel de simulation standard. La figure III.1 donne un aperçu de la méthodologie adoptée dans cette étude.

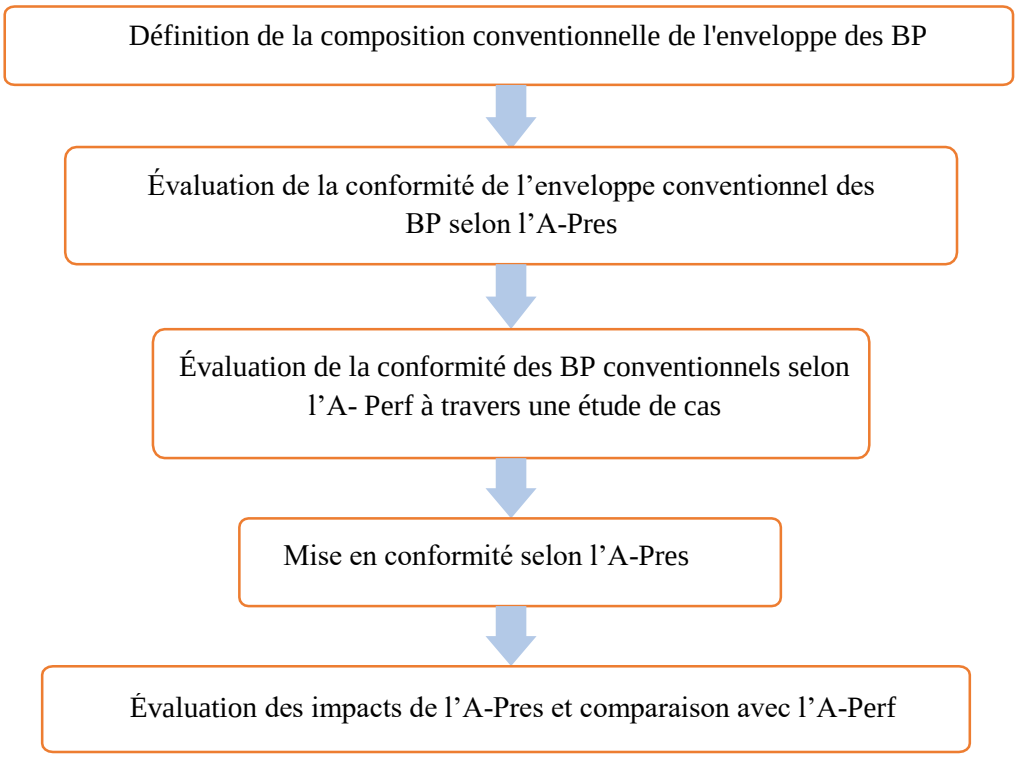


Figure III. 1. Méthodologie de travail.

III.3.2. Définition de la composition conventionnelle de l'enveloppe des BP

L'étude de typologie est axée sur les matériaux constituant l'enveloppe car c'est le sujet du RTCM, alors pour identifier la typologie de l'enveloppe des BP, la méthodologie adoptée est l'étude des marchés publics, alors nous avons téléchargé du portail des marchés publics un échantillon de 10 marchés et nous avons effectué une lecture approfondie pour repérer les matériaux de construction relatives à l'enveloppe.

III.3.3. Evaluation de la conformité énergétique de la composition conventionnelle de l'enveloppe

Pour vérifier la conformité énergétique d'un bâtiment au Maroc, il est nécessaire de vérifier s'il répond aux exigences du RTCM selon l'une des deux approches suivantes :

III.3.3.1. Selon l'approche perspective

Pour vérifier la conformité d'un bâtiment selon cette approche, il faut calculer les coefficients de transmissions thermiques (U) des différents éléments composant l'enveloppe (en se basant sur la composition de l'enveloppe prédéfinie ci-dessus), à savoir : les toitures, les murs extérieurs, et les baies vitrées ainsi que le facteur solaire équivalent (FS*) et la résistance thermiques (R) des planchers sur sol puis les comparer aux exigences limites données dans le RTCM en fonction de la zone thermique et de la valeur du TGBV.

III.3.3.2. Selon l'approche performantielle

L'A-Perf est obligatoire pour un TGBV supérieure à 45 %, mais applicable pour toute valeur de TGBV. La vérification selon cette approche est basée sur la simulation thermique dynamique. Ce qui nécessite de modéliser un cas typique sur un logiciel STD. Sur la base des Marchés et des plans, nous avons choisi un bâtiment conforme à la typologie extraite selon 2.1.

III.3.3.3. Simulation thermique dynamique

Le logiciel STD choisi est Design Builder qui est un logiciel de simulation thermique dynamique, offrant une interface graphique permettant de bénéficier de plusieurs fonctionnalités, comme montre la figure III.2.

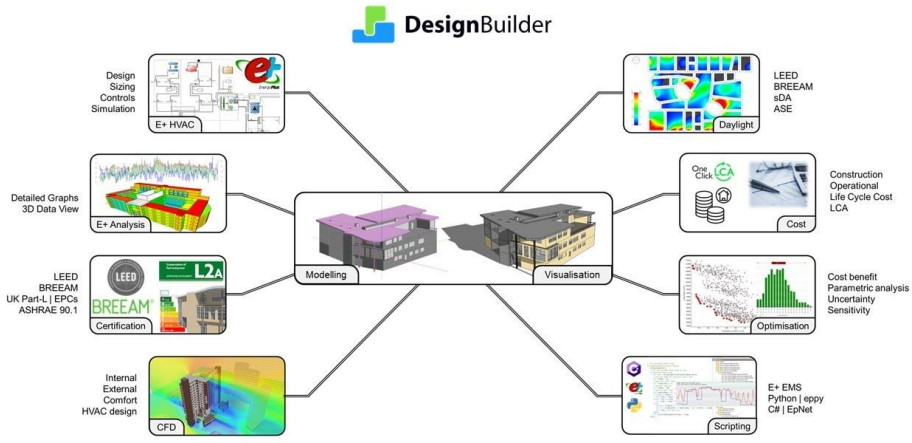


Figure III. 2. Options du logiciel DesignBuilder

Les données climatiques ont été fournies au logiciel DesignBuilder sous extension EPW jour par jour entre le 1 janvier et le 31 décembre 2020, le fichier EPW (Energy Plus Weather file) est généré par le logiciel MeteoNorm V8. Les simulations sont effectuées pour toutes les zones climatiques, pour 3 cas de TGBV et par élément de l'enveloppe ce qui a donné 126 simulations, en plus de 6 simulations effectuées dans la ville de Berlin, puis les résultats sont comparés aux exigences du RTCM.

III.3.3.4. Hypothèses

La simulation thermique a été réalisée en tenant compte :

- Les heures d'occupation de chaque pièce.
- L'effectif de chaque pièce figurant sur les plans.
- Les apports des équipements ont été pris à partir de la bibliothèque du logiciel.
- Les températures de confort sont : 20 °C pour le chauffage et 26 °C pour la climatisation, Conformément à la norme marocaine NM ISO 7730.
- Les pièces telles que les sanitaires, les toilettes, les couloirs, les escaliers, les entrepôts et les cuisines étaient considérées comme non climatisées.

III.3.3.5. Exigences

L'A-Perf s'intéresse aux besoins énergétiques globale du bâtiment et exige des spécifications maximales du BECth et ce pour chaque zone climatique et selon le type de bâtiment comme illustre le tableau III.1.

Tableau III. 1. Besoins thermiques spécifiques annuels maximums pour le chauffage et le refroidissement dans le secteur tertiaire en kWh/m^2.an. Source : RTCM

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

Le besoin énergétique annuel lié au confort thermique est défini comme :

$$BECth = \frac{BECh + BERef}{STC}$$

III.3.4. Mise en conformité de la composition conventionnelle de l'enveloppe selon l'A-Pres

Répondre à l'A-Pres de la manière la plus optimale, est l'objectif de cette section.

III.3.4.1. Mise en conformité des parois opaques

Pour les parois opaques ; le U des parois doit être rendu conforme aux exigences du règlement. L'isolation est la solution la plus appropriée, compte tenu de son impact sur le U. Selon la norme NF P 75-101, un isolant thermique est un produit qui réduit fortement les échanges thermiques à travers les parois. Caractérisé par sa résistance thermique élevée exprimée en m^2 .K/W et par sa conductivité thermique très faible, exprimée en W/m^2 .K.

III.3.4.2. Critères de choix de l'isolant

Les critères de choix adoptés dans cette étude :

- La compatibilité de l'isolant avec tous les éléments opaques de l'enveloppe
- La disponibilité au marché marocain ;
- La performance thermique ;
- Le coût d'investissement.

III.3.4.3. Démarche de mise en conformité par l'isolant choisi

Afin d'avoir la conformité selon l'A-Pres, il faut déterminer l'épaisseur minimale théorique de l'isolant, qui respecte les valeurs exigées par le RTCM : soit en modifiant sur le logiciel Binayate, jusqu'à l'obtention de la conformité, soit en calculant théoriquement selon la relation suivante :

$ei = \lambda i/(Umax - Ucalculé)$

Avec :

λi : Conductivité thermique du matériau « i » constituant la paroi (W/m.K)

ei : Épaisseur minimale du matériau isolant « i » constituant la paroi (m)

Umax : Valeur maximale réglementaire du coefficient de transmission ($W/m^2.K$)

Ucalculé : Valeur calculée du coefficient de transmission sans isolation ($W/m^2.K$).

III.3.4.4. Mise en conformité des parois vitrées

Pour assurer la conformité des parois vitrées, deux conditions doivent être vérifiées : le U et le facteur solaire Fs*.

III.3.4.5. Impact de l'A-Pres et identification des éléments influents

Puisque l'objectif consiste à évaluer l'impact d'A-Pres sur la consommation d'énergie, nous allons d'abord mettre en conformité l'enveloppe type selon les normes d'A-Pres, nous permettant d'obtenir une nouvelle enveloppe conforme. Cette dernière sera ensuite adoptée dans notre étude de cas pour en évaluer l'impact. Par la suite, il sera important d'identifier les éléments ayant le plus et le moins d'impact, ou même ceux qui sont nuisibles. Enfin, nous proposons d'évaluer l'impact du TGBV sur le comportement thermique du bâtiment en général, et sur le comportement individuel des éléments requis par l'A-Pres..

III.4. Résultats et analyses

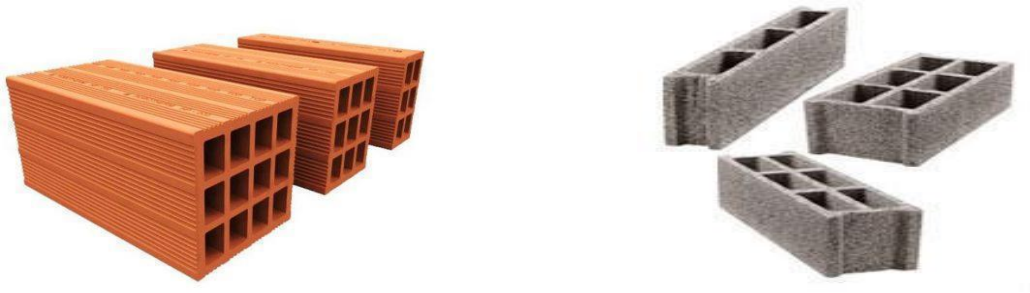
III.4.1. Prescription technique de l'enveloppe

III.4.1.1. Résultats de l'Étude des marchés publics

Une similarité au niveau des matériaux de construction a été observée lors de l'examen des marchés publics des bâtiments ainsi qu'une ressemblance dans les prescriptions des produits.

a) Murs extérieurs

Les principaux matériaux utilisés pour les murs sont les briques creuses (voir Figure III.3). Les agglomérés sont également utilisés, principalement dans les régions du sud en raison de l'absence des usines de construction de briques dans ces régions.



(a) *(b)*

Figure III. 3. Briques. (a) Briques Creuses. (b) Agglos creux

En particulier, on rencontre fréquemment un type de composition de mur extérieur typique, comportant les éléments suivants (de l'extérieur vers l'intérieur) :

- Un revêtement extérieur en mortier de ciment et de sable ;
- Des briques extérieures en céramique à 8 trous (10 cm d'épaisseur) ;
- Une lame d'air ;
- Des briques intérieures avec 6 trous (7 cm d'épaisseur) ;
- Un revêtement intérieur en mortier de ciment et de sable.

b) Toitures et plancher intermédiaires

Généralement la solution du plancher à poutrelles est plus présente que la solution de la dalle pleine pour le plancher-toiture et les planchers intermédiaires, les poutrelles les plus utilisées sont en béton précontraint, préfabriquées en usine (voir Figure III.4).

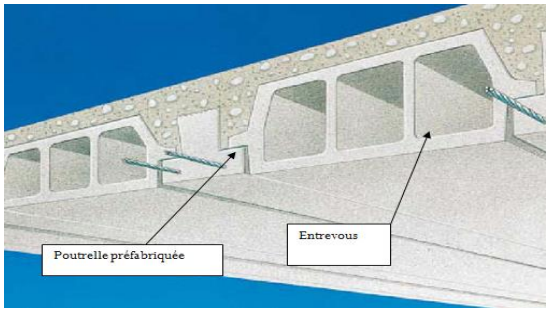


Figure III. 4. Plancher à poutrelles

La toiture est composée de : poutrelles et hourdis, d'une forme de pente, d'une chape de lissage (ciment lissé) et d'un système d'étanchéité, d'une protection mécanique (dalots en béton de 4 cm ou carreaux de ciment rouge). Une isolation de 4 cm en polystyrène ou en laine de roche a été prévue dans le plancher de la toiture dans certains cas.

Pour les toitures inclinées, et les coupoles, l'étanchéité est soit auto-assurée, ou en étanchéité liquide.

c) Plancher sur sol

Généralement, le plancher sur sol se compose comme suit :

- Carrelage de 2 cm ;
- Lit de sable de 4 cm ;
- Dalle de béton de 13 cm ;
- Hérisson de 15 à 20 cm ou tout-venant de 20 cm.

d) Baies vitrées

Toutes les vitres de notre échantillon sont de simple vitrage, avec des épaisseurs variant de 2.5 jusqu'à 12 mm. L'épaisseurs la plus utilisée est de 6 mm, pour les grandes baies vitrées, on atteint 8, 10 et 12 mm, la menuiserie des fenêtres est majoritairement en aluminium.

e) Enveloppe conventionnelle

L'étude des marchés publics nous conduit à déduire que l'enveloppe des BP (parois opaques et transparentes) est construite avec une composition peu variable et qu'il y a une typologie conventionnelle suivie par les spécialistes du secteur, cette typologie est presenté dans le tableau III.2.

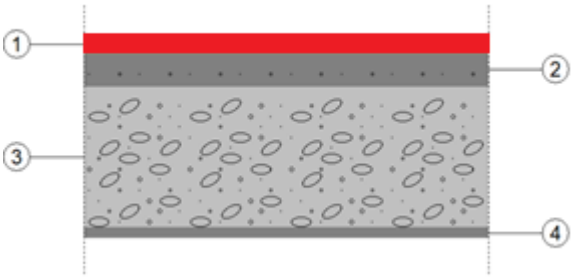
Tableau III. 2. Composition typique des parois

Composition typique des murs extérieurs : Mortier (masse volumique sèche 1700) :1,5 cm Brique rouge 8 trous (0,190 W/m.K)) : 10 cm Lame d'air non ventilée : 5 cm Brique rouge 6 trous (0,196 W/(W/m.K)) : 7 cm Mortier (masse volumique sèche 1700) :1,5 cm	**Composition typique de la toiture :** Carreaux de ciment rouges ou dalots en béton de 4 cm Isolation de 4cm polystyrène ou laine de roche (facultative) Mortier (masse volumique sèche 2300) : 5 cm Plancher unidirectionnel 15+5 cm : 20 cm Mortier (masse volumique sèche 1900) : 1,5 cm
Composition typique du plancher sur sol : Carreaux en céramique : 2 cm Mortier (Masse volumique sèche 1900) : 5 cm Dalle en béton de 13 cm Lit de sable : 4 cm Hérissons 20 cm ou couche de tout-venant de 20 cm.	**Composition typique du vitrage :** Vitrage simple de 6 mm à 8 mm

III.4.2. Conformité du bâtiment conventionnel selon l'A-Pres

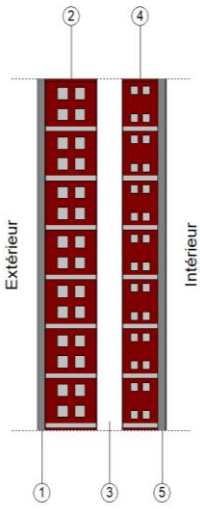
III.4.2.1. Simulation sur le logiciel Binayate Prescriptive

Pour vérifier la conformité selon l'approche prescriptive, nous avons utilisé le logiciel BINAYAT. La Figure III.5 présente les résultats pour les parois opaques.



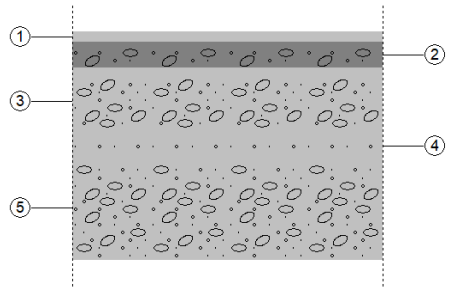
Couches
1 - **Carreaux de ciment rouge:** 2 cm
2 - Mortier (Masse volumique sèche 2300): 5 cm
3 - Plancher unidirectionnel 15+5 cm (entrevous en béton): 20 cm
4 - Mortier (Masse volumique sèche 1900): 1.5 cm
Épaisseur totale: 28.5 cm
Caractérisation thermique
Coefficient de transmission thermique: 2.25 W/(m²·K)

Toiture



Couches
1 - Mortier (Masse volumique sèche 1700): 1.5 cm
2 - Brique rouge 8 trous (0.190 W/(m·K)): 10 cm
3 - Lame d'air non ventilée: 5 cm
4 - Brique rouge 6 trous (0.196 W/(m·K)): 7 cm
5 - Mortier (Masse volumique sèche 1700): 1.5 cm
Épaisseur totale: 25.0 cm
Caractérisation thermique
Coefficient de transmission thermique: 0.93 W/(m²·K)

Murs extérieurs



Couches
1 - Céramique: 2 cm
2 - Mortier (Masse volumique sèche 1900): 5 cm
3 - Dalle de béton: 13 cm
4 - Lit de Sable: 4 cm
5 - Hérissons: 20 cm
Épaisseur totale: 44.0 cm
Caractérisation thermique
Résistance thermique: 0.86 m²·K/W

Planchers sur sol

Figure III. 5. Composition et caractéristiques des parois opaques

Les Caractéristiques des baies vitres sont comme suit :

- Vitrage : simple vitrage
- Épaisseur (cm) : 6
- U ($W/m^2.K$) : 5,6
- Facteur solaire : 0,69

III.4.2.2. Évaluation de la conformité de l'enveloppe par zone climatique

Le tableau III.3 conclut que la composition de l'enveloppe conventionnel n'est jamais conforme au RTCM, cependant une conformité partielle est constatée. En effet, la toiture n'est pas conforme dans toutes les zones, le plancher sur sol est conforme seulement dans la zone 3, et dans les zones 1 et 2 où il y a pas d'exigences, les murs extérieurs sont conformes seulement

pour la zone 1, le U du vitrage est conforme que dans la zone 1 pour un TGBV inférieur à 25% et dans la zone 2 pour un TGBV inférieur à 15%, mais vu que la conformité du vitrage est conditionnée aussi par le FS*, le vitrage n'est conforme dans la zone 1 que pour un TGBV inférieur à 15%.

Tableau III. 3. Conformité de l'enveloppe conventionnelle par zone climatique au Maroc selon l'A-Pres, (Source : Évaluation personnelle)

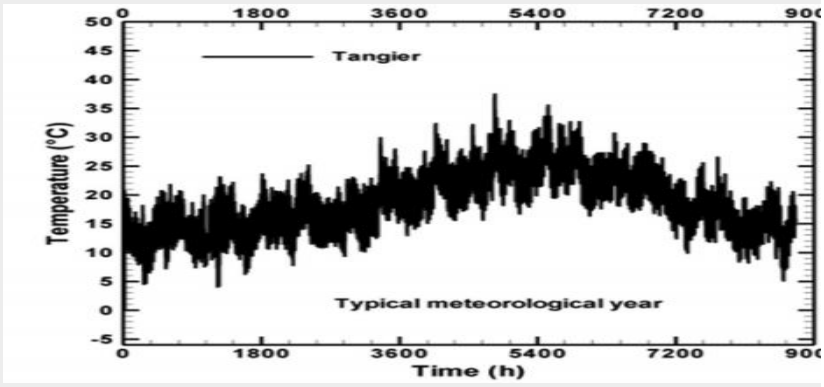
	TGBV	**U des toitures (W/m²K)**	**U des murs (W/m²K)**	**U du vitrage (W/m²K)**	**R minimale du plancher sol (m²K/W)**	**FS*, Nord**	**FS*, ? Autres**
Z1	15%	NC	C	C	NE	NE	NE
	16-25%	NC	C	C	NE	NE	NC
	26-35%	NC	C	NC	NE	NE	NC
	36-45%	NC	C	NC	NE	NC	NC
Z2	15%	NC	NC	C	NE	NE	NE
	16-25%	NC	NC	NC	NE	NE	NC
	26-35%	NC	NC	NC	NE	NE	NC
	36-45%	NC	NC	NC	NE	NC	NC
Z3	15%	NC	NC	NC	C	NE	NE
	16-25%	NC	NC	NC	C	NE	NC
	26-35%	NC	NC	NC	C	NE	NC
	36-45%	NC	NC	NC	C	NC	NC
Z4	15%	NC	NC	NC	NC	NE	NE
	16-25%	NC	NC	NC	NC	NE	NC
	26-35%	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	36-45%	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Z5	15%	NC	NC	NC	NC	NE	NE
	16-25%	NC	NC	NC	NC	NE	NC
	26-35%	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	36-45%	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Z6	15%	NC	NC	NC	NC	NE	NE
	16-25%	NC	NC	NC	NC	NE	NC
	26-35%	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	36-45%	NC	NC	NC	NC	NC	NC

- NC : Non conforme, C : Conforme, NE : Non exigé

III.4.3. Conformité du bâtiment conventionnel selon l'A-perf

III.4.3.1. Présentation de l'étude de cas

A. Fiche technique

• Surface	• 852 m²
• Superficie Conditionnée :	• 522,45 m².
• Fonctionnalité :	• Centre de formation et de renforcement des compétences des femmes
• Localisation :	• JOAMAA, une petite ville au nord de Tanger située dans la province de Fahs-Anjra de la région de Tanger-Tétouan-Al Hoceima.
• Climat :	• Humide en hiver et relativement chaud en été, avec une température varie entre 6°C à 35° • 

B. Fiche fonctionnelle et graphique

Le bâtiment comporte un rez-de-chaussée et un étage, répartis de la manière suivante : au rez-de-chaussée se trouvent une salle de repos/réfectoire, trois salles préscolaires, deux bureaux, un atelier de cuisine, un atelier de pâtisserie, un bureau du responsable, une infirmerie et un espace de jeux. Le 1er étage abrite un atelier de coiffure et d'esthétique, un atelier de coupe et couture, une salle informatique, une salle de cours, deux salles d'alphabétisation, une salle de soutien, un autre bureau du responsable et une seconde infirmerie.

Les Figures III.6, III.7, III.8 et III.9 illustrent en détail les composantes du bâtiment, incluant les plans architecturaux du rez-de-chaussée et du 1er étage, ainsi que la modélisation 3D de l'ensemble du bâtiment.

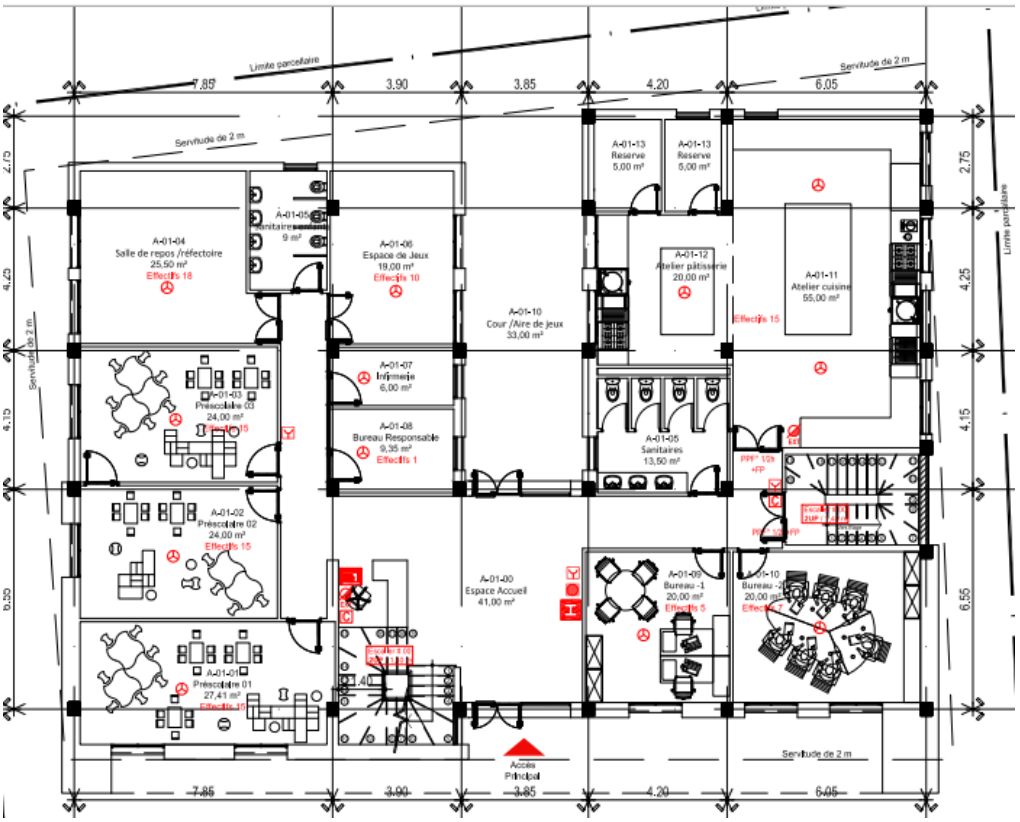


Figure III. 6. Plan du rez-de-chaussée

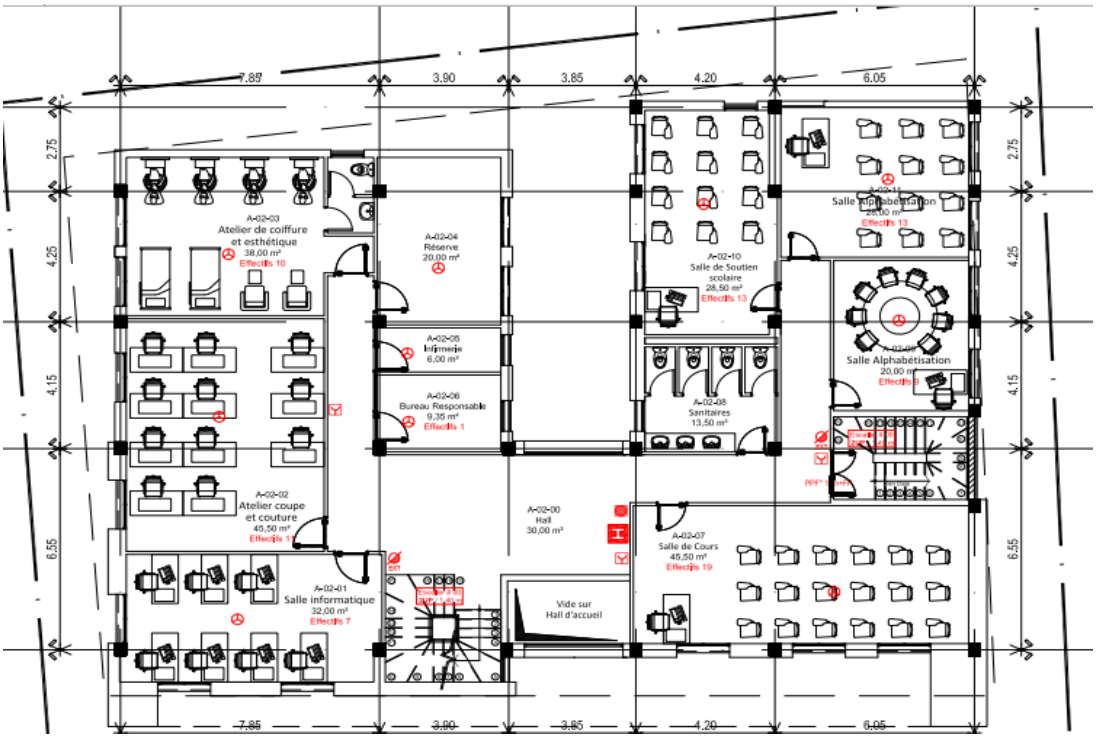


Figure III. 7. Plan du 1er étage

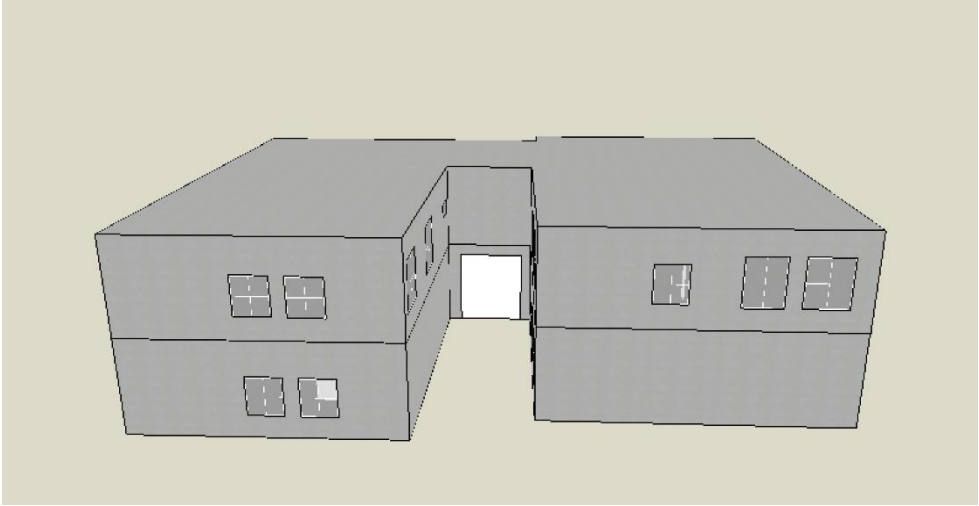


Figure III. 8.Vue de face en 3D

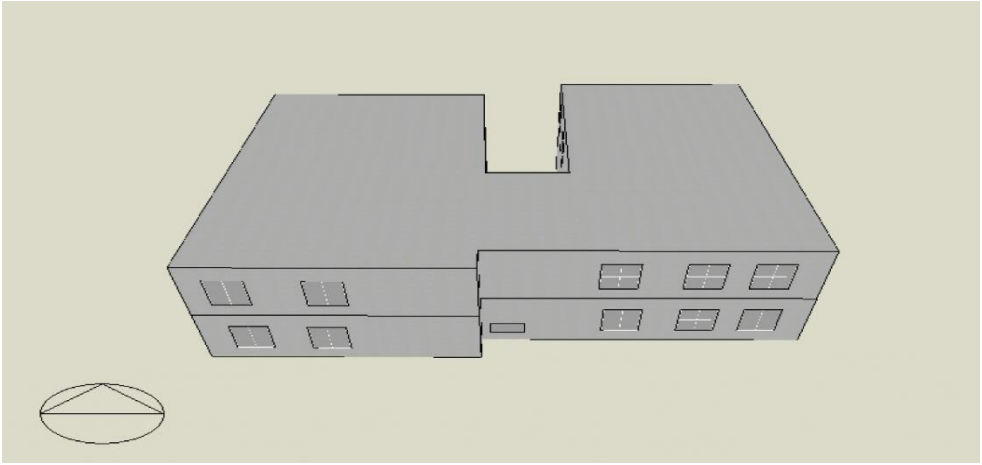


Figure III. 9.Vue d'arrière en 3D

III.4.3.2. Analyse du besoin thermique et évaluation de la conformité

La Figure III.10 illustre que le BECth varie d'une zone à l'autre. La zone 1 est la moins énergivore, tandis que la zone 6 est la plus énergivore. Les zones 1 et 2 présentent des besoins énergétiques similaires, tout comme les zones 3 et 4, bien qu'il existe une différence dans la répartition des BECh et du BERef. Pour ce bâtiment, le BERef est généralement beaucoup plus élevé que celui du chauffage, à l'exception de la zone 4 où ils sont à l'équilibre.

Le Tableau III.4 montre que ce bâtiment est conforme à l'A-Perf pour les zones 1,2,3,4 et 5 mais non conforme pour la zone 6, on peut en déduire un taux de conformité de 83%, contrairement à l'A-Pres où le bâtiment conventionnel n'est jamais totalement conforme.

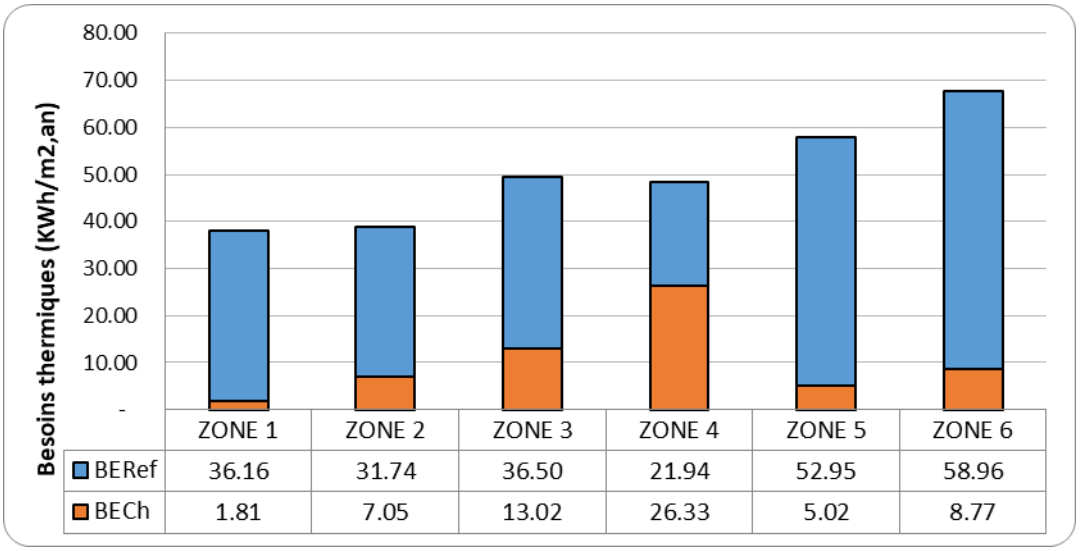


Figure III. 10. Répartition des Besoins thermiques du bâtiment conventionnel

Tableau III. 4. Conformité du bâtiment conventionnel selon l'A-Perf

	BECth (KWh/m2.an)	**Limite RTCM (école)**	**Conformité**
ZONE 1	37,97	44,00	Conforme
ZONE 2	38,79	50,00	Conforme
ZONE 3	49,52	61,00	Conforme
ZONE 4	48,27	80,00	Conforme
ZONE 5	57,97	65,00	Conforme
ZONE 6	67,73	67,00	Non conforme

III.4.4. Mise en conformité du bâtiment conventionnel selon l'A-Pres

III.4.4.1. Choix de l'isolation des parois opaques

Les isolants sélectionnés conformément aux critères précisés dans la section méthodologie, sont : le polystyrène extrudé, le polyuréthane et le liège aggloméré. Le prix demeure le critère décisif et il varie en fonction de l'épaisseur de l'isolant. Pour déterminer quel isolant sera retenu pour la suite de notre étude, nous avons évalué les épaisseurs requises pour les différentes parties de l'enveloppe pour chacun des trois isolants. Les résultats sont présentés sur le Tableau III.5. En tenant compte de ces épaisseurs, le coût de l'isolation pour le bâtiment de l'étude de cas est présenté dans le Tableau III.6. Selon ce tableau, le polystyrène extrudé s'avère être l'isolant le plus approprié pour le bâtiment étudié.

Tableau III. 5. Épaisseurs exigées par l'A-Pres pour les isolants thermiques

Zone	Parois	Polystyrène extrudé		Polyuréthane (PUR)		Liège aggloméré	
		Epaisseur théorique (cm)	Epaisseur installé (cm)	Epaisseur théorique (cm)	Epaisseur installé (cm)	Epaisseur théorique (cm)	Epaisseur installé (cm)
Z2	Toiture terrasse	3,68	4	2,71	4	4,12	6
	Murs extérieurs	0,50	2	0,36	2	0,56	2
	Planchers sur sol	NE	NE	NE	NE	NE	NE

Tableau III. 6. Coût d'isolation du bâtiment selon l'isolant

	Polystyrène extrudé	Polyuréthane (PUR)	Liège aggloméré
Coût d'isolation (DH)	77 382,04	204 338,71	267 410,46

III.4.4.2. Choix des parois vitrés

Les types de vitrage les plus répandus sur le marché marocain ont été comparés en vue de la mise en conformité. Les caractéristiques des vitres utilisées pour la mise en conformité sont présentées dans le Tableau III.7.

Tableau III. 7. Caractéristiques des vitres, Source Saint Gobain Glass

Type de vitrage	Simple vitrage	Double vitrage (cat 1)	Double vitrage (cat 2)	Double vitrage (cat 3)
Facteur solaire	0,69	0,47	0,60	0,35
U ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	5,6	2,6	2,6	2,6
Prix (DH)	200-283	400-800	1040	1040
Cas d'utilisation pour la mise en conformité selon l'A-Pres	Cas initial	TGBV =15%	TGBV =25%	TGBV =35%

III.4.5. Impacts des résultats dans les 6 zones

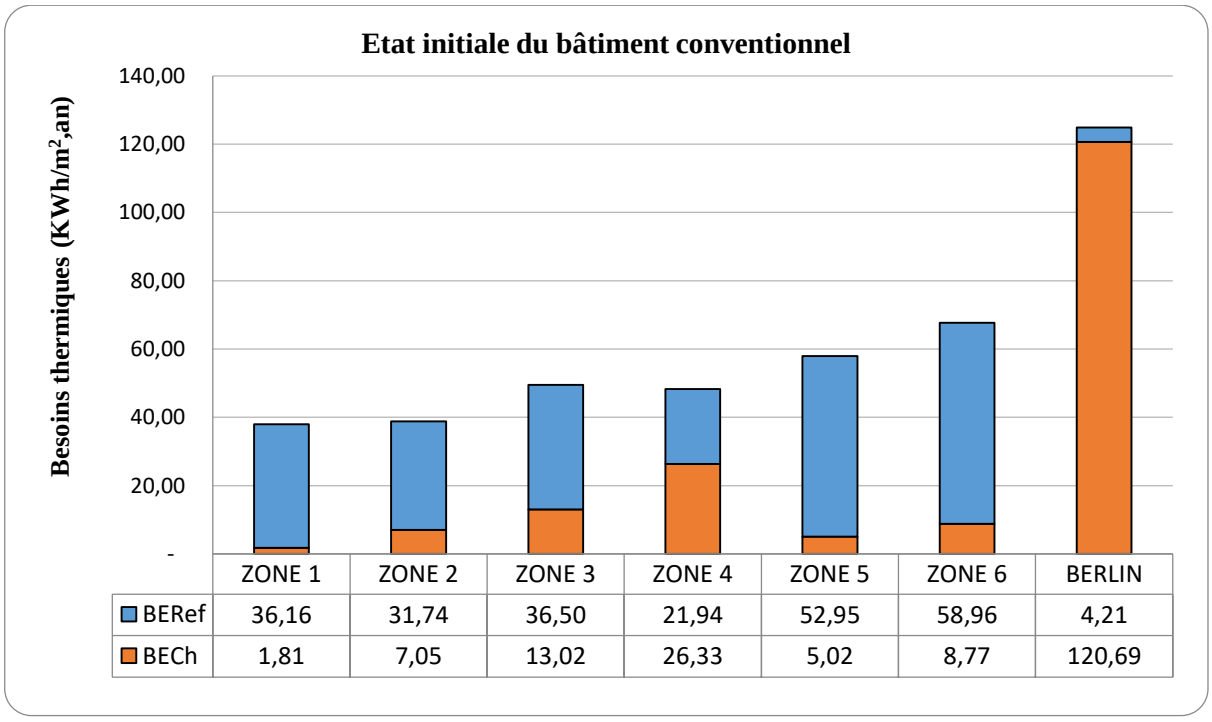
III.4.5.1. Impact énergétique du respect de l'A-Pres

L'objectif est d'évaluer les besoins en chauffage et en refroidissement d'un bâtiment conforme à l'A-Pres du RTCM, en se basant sur les critères de l'A-perf. Les résultats de l'étude dans les 6 zones sont présentés dans le Tableau III.8. L'application de l'A-Pres permet de réaliser des économies d'énergie dans les zones 2, 3, 4, 5 et 6, mais induit une surconsommation dans la zone 1. La zone 4, qui est la région la plus froide du Maroc, est celle qui bénéficie le plus de l'A-Pres. Par conséquent, il a été jugé pertinent d'explorer un climat plus froid afin de mettre en lumière l'impact d'A-Pres sur ces conditions climatiques spécifiques.

Tableau III. 8. Impact de l'A-Pres sur les besoins thermiques

Zone	Besoins avant l'application de l'A-Pres (kWh/ m²/an)			Besoins après l'application de l'A-Pres(kWh/ m²/an)			Limite RTCM (Cas : Écoles) (kWh/ m².an)	Gain énergétique en (KWh/m².an)	Gain en pourcentage
	BECth	BERef	BECh	BECth	BERef	BECh			
1	37,97	36,16	1,81	41,30	40,33	0,97	44	-3,32	-8,75%
2	38,79	31,74	7,05	37,27	33,87	3,41	50	1,52	3,91%
3	49,52	36,50	13,02	40,80	34,85	5,94	61	8,72	17,62%
4	48,27	21,94	26,33	35,50	27,05	8,45	80	12,77	26,45%
5	57,97	52,95	5,02	57,58	55,74	1,84	65	0,39	0,68%
6	67,73	58,96	8,77	65,11	61,79	3,32	67	2,62	3,87%

Les graphiques de la Figure III.11 démontrent que l'efficacité de l'A-Pres est nettement supérieure à Berlin par rapport à toutes les zones du Maroc. L'efficacité de l'A-Pres semble augmenter avec la fraîcheur du climat. En réalité, l'A-Pres impacte significativement le BECh, tandis que son effet sur le BERef est généralement négatif. Cependant, pour la zone 3, bien que l'impact sur le BERef soit positif, il demeure négligeable.



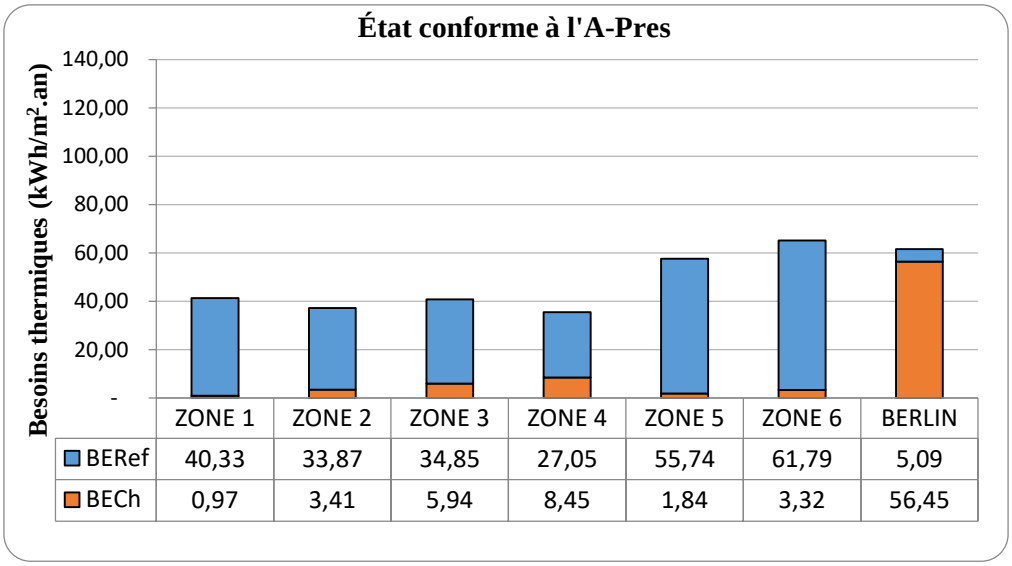


Figure III. 11. Impact de la mise en conformité selon l'A-Pres

III.4.5.2. Impact de la rénovation de chaque élément de l'enveloppe sur la consommation d'énergie pour 3 cas de TGBV

Le TGBV joue un rôle crucial et déterminant dans l'adhésion au RTCM, comme le montre la Figure III.12, où trois TGBV distincts sont pris en compte : TGBV = 15 %, TGBV= 25 % et TGBV = 35 %.

Pour la zone 1 : l'état initial est conforme pour A-Perf. Pour A-Pres : les murs conventionnels sont conformes, les vitrages conventionnels sont conformes pour TGBV = 15% et TGBV = 25%. L'isolation du toit augmente le BERef, réduit légèrement le BECh, mais augmente significativement le BECth. Globalement, pour TGBV = 15 % et TGBV = 25 %, le RTCM augmente le BECth ; pour TGBV = 35 %, le RTCM réduit le BECth, mais seule l'exigence relative au vitrage donne un meilleur résultat. Dans la zone 1, on peut conclure que l'approche A-Pres permet d'éliminer toutes les exigences, à l'exception de celle relative au vitrage.

Pour la zone 2 : l'état initial est conforme à l'A-Perf. Pour A-Pres : le mur conventionnel est conforme, et le vitrage est conforme pour TGBV = 15%. L'isolation du toit augmente le BERef et réduit le BECh ; le résultat est légèrement positif. L'isolation des murs a un léger impact ; le double vitrage contribue positivement à la diminution de BECth. Globalement, pour les 3 cas de TGBV étudiés, le RTCM diminue le BECth, mais seule l'exigence sur le vitrage donne un résultat significatif. Dans la zone 2, on peut conclure que l'approche A-Pres permet d'éliminer toutes les exigences, à l'exception de celle relative au vitrage.

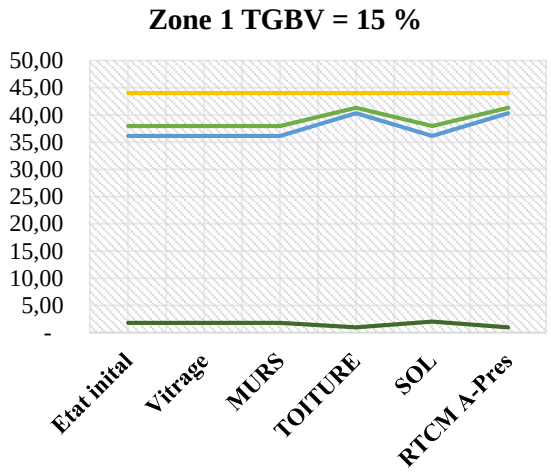
Pour la zone 3 : l'état initial est conforme à l'approche A-Perf. En ce qui concerne l'approche A-Pres, la composition conventionnelle du rez-de-chaussée répond aux exigences de conformité. L'isolation du toit augmente légèrement le BERef et réduit le BECh ; le résultat est positif. L'isolation des murs a un léger impact sur le BECh ; le double vitrage apporte une contribution positive. Globalement, pour les 3 cas de TGBV étudiés, le RTCM diminue le BECth, mais une combinaison des exigences relatives au vitrage et à la toiture donne un résultat similaire. Pour la zone 3, on peut conclure que l'approche A-Pres peut exclure toutes les exigences à l'exception de celles relatives au vitrage et à la toiture.

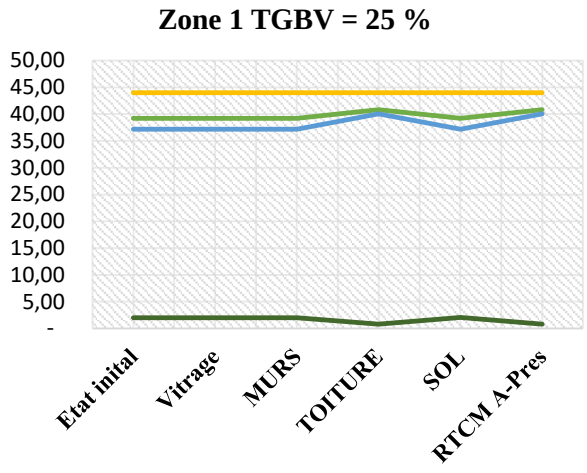
Pour la zone 4 : Bien que l'état initial soit conforme à A-Perf, aucun composant de l'enveloppe conventionnelle n'est conforme à A-Pres. L'isolation du toit augmente légèrement le BERef et réduit le BECh ; le résultat est nettement positif. L'isolation des murs a un léger impact sur le BECh. Le double vitrage a un très léger impact sur le BECh et le BERef. L'isolation du sol sur le sol a un impact légèrement négatif. Globalement, pour les 3 cas de TGBV étudiés, le RTCM diminue le BECh et augmente le BERef. Le BECth résultant diminue, mais seule l'exigence sur le toit donne un résultat proche. Pour la zone 4, on peut conclure que l'approche A-Pres peut exclure toutes les exigences, à l'exception de celle concernant le toit.

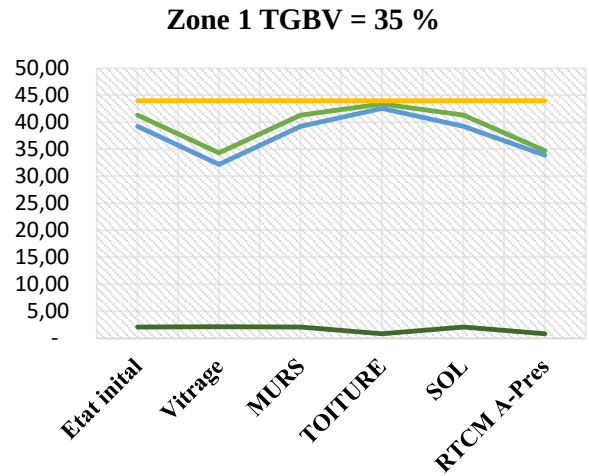
Pour la zone 5 : Même si l'état initial est conforme à A-Perf, aucun composant de l'enveloppe conventionnelle n'est conforme à A-Pres. L'isolation du toit augmente légèrement le BERef et réduit le BECh ; le résultat est nettement positif. L'isolation des murs a un léger impact sur le BECh . Le double vitrage a un impact sur le BECth, en particulier pour le TGBV = 35 %. L'isolation du rez-de-chaussée a un impact très négatif et fait sortir le bâtiment de sa conformité initiale. Dans l'ensemble, pour le cas du TGBV = 15 %, le RTCM diminue le BECh et augmente le BERef. Dans le cas de TGBV = 25 %, on observe une légère diminution du BECth et une augmentation du BERef. Dans le cas de TGBV = 35 %, le BERef et le BECh diminuent en même temps, mais seule l'exigence sur le vitrage, associée à l'exigence sur le toit ou sur le mur, donne le même résultat. Pour la zone 5, l'A-Pres peut exclure toutes les exigences, et maintenir l'exigence sur le vitrage mais écarter absolument l'exigence sur le plancher.

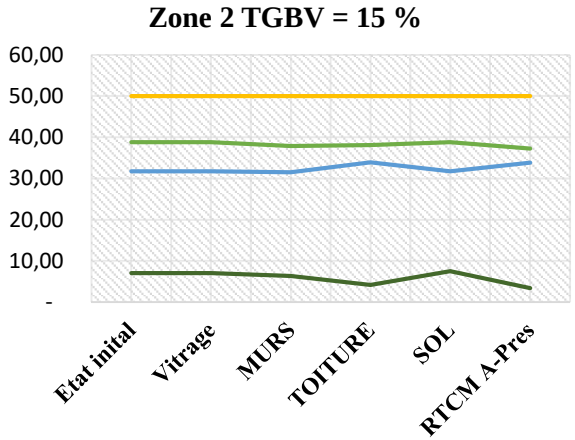
Pour la zone 6 : C'est le seul cas où la condition initiale n'est pas conforme à A-Perf, donc aucun composant de l'enveloppe conventionnelle n'est conforme à A-Pres. L'isolation du toit augmente légèrement le BERef et réduit le BECh. L'isolation des murs a un léger impact sur le BECth. Le double vitrage a un impact positif sur le BECth, qui change avec le TGBV. Le plancher sur plancher a un impact très négatif. Dans l'ensemble, pour les cas TGBV = 15 % et 25 %, le RTCM augmente le BERef et diminue le BECh. Le BECth qui en résulte est positif. Dans le cas du TGBV = 35 %, le BERef et le BECh diminuent tous deux, mais seule l'exigence relative au vitrage, accompagnée de l'exigence relative au toit ou au mur, donne le même résultat. Pour la zone 6, A-Pres peut exclure toutes les exigences et maintenir l'exigence relative au vitrage, mais exclure absolument l'exigence relative au plancher. En termes de conformité dans la zone 6, pour les cas de TGBV = 15 %, l'exigence de vitrage seul, de mur seul ou de toit seul est suffisante ; pour les cas de TGBV = 15 %, l'exigence de plancher est suffisante. TGBV = 25 %, l'exigence relative au vitrage seul ou à la toiture seule est suffisante ; pour TGBV = 35 %, l'exigence relative au vitrage seul est suffisante.

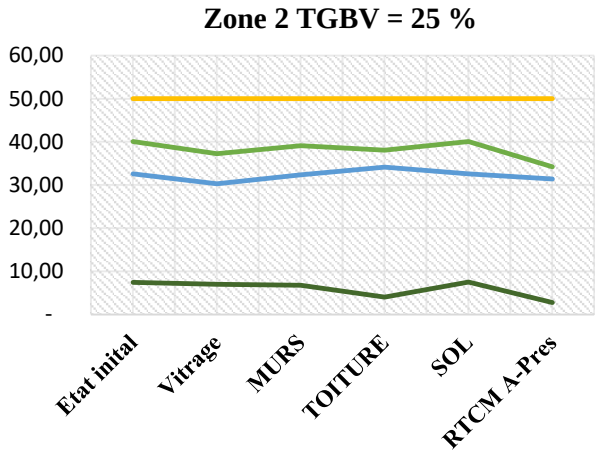
Le Tableau III.9 présente un résumé des résultats de conformité pour chaque zone climatique. La conformité de l'état initial avec l'approche A-Perf et la conformité partielle de l'approche A-Pres sont énumérées. Les exigences importantes pour chaque zone, qui ne peuvent être exclues de l'approche A-Pres, sont également mentionnées.

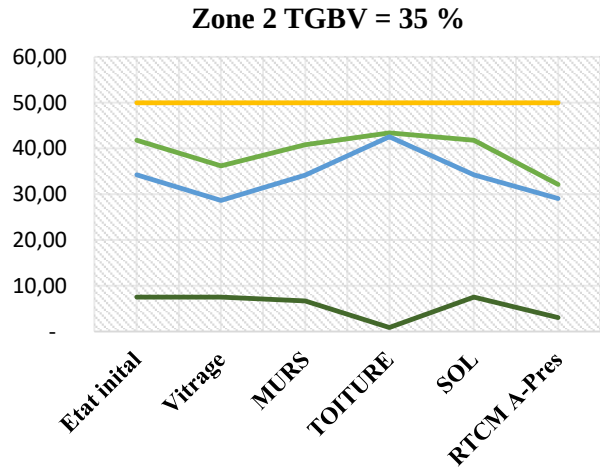

Zone 1 TGBV = 15 %
50,00
45,00
40,00
35,00
30,00
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres

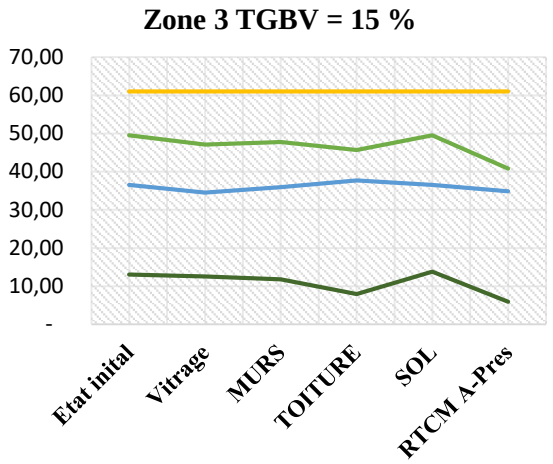

Zone 1 TGBV = 25 %
50,00
45,00
40,00
35,00
30,00
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres

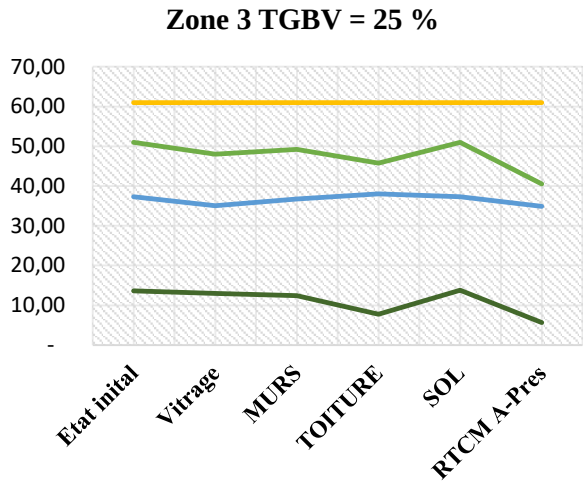

Zone 1 TGBV = 35 %
50,00
45,00
40,00
35,00
30,00
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres

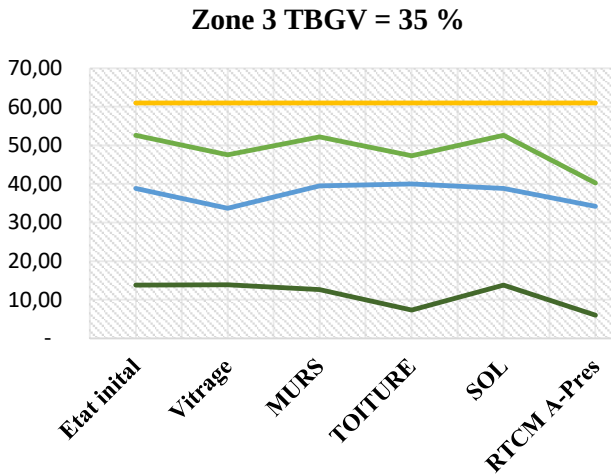

Zone 2 TGBV = 15 %
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres

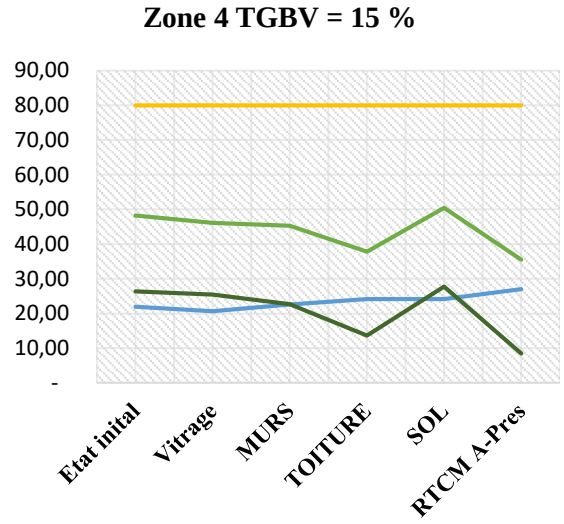

Zone 2 TGBV = 25 %
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres

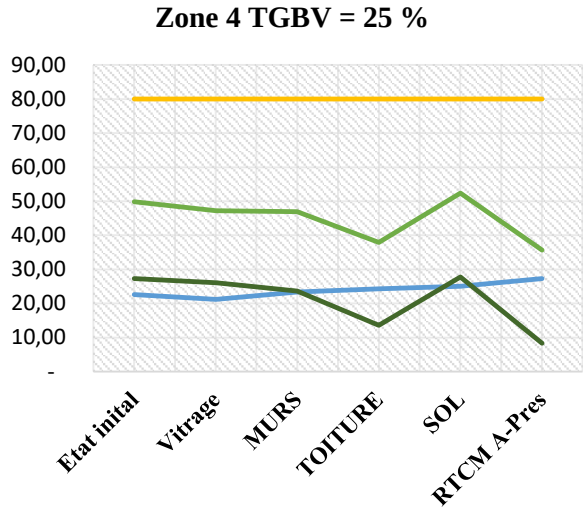

Zone 2 TGBV = 35 %
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres

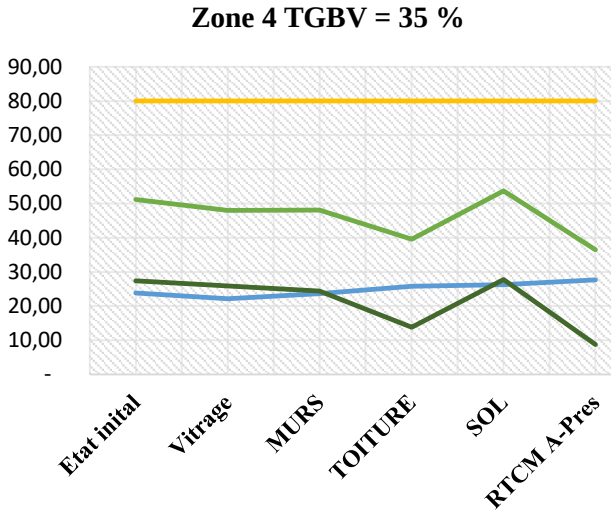

Zone 3 TGBV = 15 %
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres


Zone 3 TGBV = 25 %
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres


Zone 3 TBGV = 35 %
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres


Zone 4 TGBV = 15 %
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres


Zone 4 TGBV = 25 %
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres


Zone 4 TGBV = 35 %
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
-
Etat inital
Vitrage
MURS
TOITURE
SOL
RTCM A-Pres

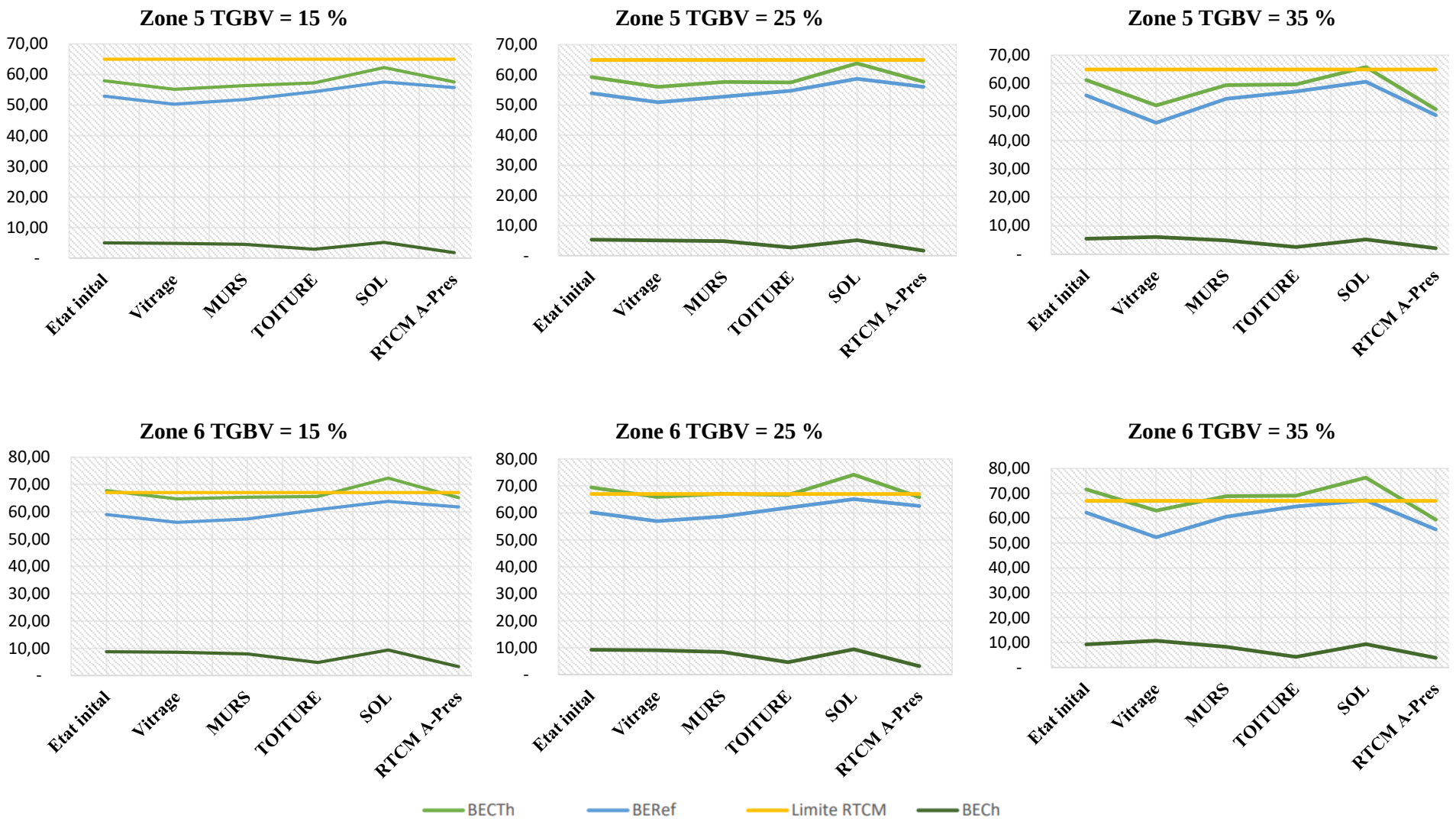


Figure III. 12. Résumé de la variation de l'énergie en fonction du TGBV.

Tableau III. 9. Résumé des résultats de conformité pour différentes zones climatiques.

Zone climatique	Conformité selon A-Perf	Conformité selon A-Pres	Exigence(s) importante(s)
Zone 1	Oui	Partiel	Vitrage
Zone 2	Oui	Partiel	Vitrage
Zone 3	Oui	Partiel	Vitrage, Toiture
Zone 4	Oui	Partiel	Toiture
Zone 5	Oui	Partiel	Vitrage
Zone 6	Non	Partiel	Vitrage

La Figure III.13 illustre les besoins annuels de chauffage et de climatisation pour un TGBV de 15 %. La zone 4 connaît des hivers particulièrement froids et que l'isolation joue un rôle important dans l'atténuation du froid, en particulier l'isolation du toit, car l'air froid a tendance à se déplacer vers le bas. Les simulations démontrent que le bâtiment conventionnel répond largement aux exigences A-Perf dans les zones 1, 2, 3, 4 et 5 pour les trois cas de TGBV examinés. Les exigences A-Pres se sont avérées bénéfiques uniquement pour la zone 6, et le respect de l'exigence relative au vitrage suffit à garantir la conformité du bâtiment. Par conséquent, en appliquant l'approche A-Pres, l'efficacité énergétique du bâtiment s'écarte des exigences A-Perf, ce qui se traduit par une structure surdimensionnée. Ceci met en évidence l'avantage d'adhérer à l'approche A-Perf pour optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments.

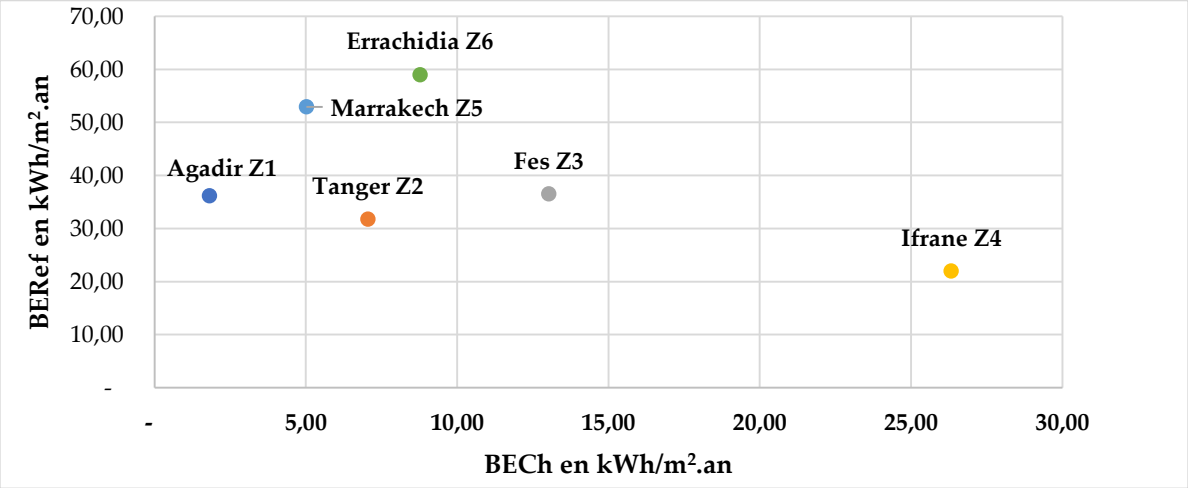


Figure III. 13. BERef et BECh de notre étude de cas, TGBV = 15%.

L'analyse par éléments d'enveloppe individuels est un aspect crucial qui manque à la méthodologie de conception de l'A-Pres. En outre, le guide du RTCM ne décrit pas explicitement le processus d'élaboration des exigences A-Pres. Il indique seulement que les exigences ont été déterminées en tenant compte des coûts d'investissement supplémentaires et des simulations thermiques, et qu'un processus itératif a été utilisé pour établir des niveaux réglementaires raisonnables pour ces exigences. Ce manque de clarté dans la méthodologie souligne la nécessité d'une approche plus transparente et plus complète pour aborder l'efficacité énergétique par le biais de la conception de l'enveloppe du bâtiment.

III.4.6. Comparaison entre les zones

La Figure 14 illustre les divers effets de la conformité de l'enveloppe aux exigences du RTCM A-Pres pour les différents TGBV dans les six zones climatiques :

- Errachidia, correspondant à la zone 6 désertique, présente l'intensité énergétique la plus élevée. Elle est suivie par Marrakech (zone 5 semi-aride), Fès (zone 3 continentale), Ifrane (zone 4 froide), Tanger (zone 2 méditerranéenne 2) et, finalement, Agadir (zone 1 atlantique). Cette tendance pourrait être attribuée aux conditions météorologiques plus extrêmes rencontrées dans la zone 6, entraînant une demande d'énergie plus élevée pour le contrôle du climat intérieur.

- L'impact de l'isolation des toits varie selon les zones. À Agadir (zone 1), elle a des effets négatifs, probablement en raison du climat atlantique doux où une isolation accrue pourrait piéger la chaleur solaire indésirable. L'avantage de l'isolation du toit augmente progressivement, en se déplaçant vers les climats plus froids comme à Ifrane (Zone 4). Cependant, son efficacité diminue légèrement dans les zones 5 et 6, qui connaissent des températures plus extrêmes.

- L'isolation des murs, bien que négligeable dans les zones 1, 2 et 3, offre de légères améliorations dans les zones 4, 5 et 6, plus froides et plus extrêmes. Cela montre à quel point l'efficacité de l'isolation est liée aux conditions climatiques de la région.

- L'isolation des toits est aussi essentielle que l'isolation des murs dans les zones froides de Fès et d'Ifrane (zones 3 et 4) en raison du phénomène de poussée thermique qui aide à conserver la chaleur interne. Cette dynamique change dans la zone désertique d'Errachidia (zone 6), où les déperditions estivales compensent les gains hivernaux par l'isolation.

- L'isolation du rez-de-chaussée augmente systématiquement la consommation d'énergie thermique des bâtiments (BECth) dans toutes les zones, ce qui implique un décalage entre les exigences du RTCM A-Pres et les réalités climatiques, nécessitant une étude plus approfondie.

- La conformité des vitrages améliore considérablement la BECth, en s'intensifiant au fur et à mesure que le TGBV s'étend. Cela montre le rôle crucial d'un vitrage bien conçu et bien installé dans la régulation de la température intérieure et de la lumière dans tous les climats.

Ces observations soulignent la nécessité d'élaborer des lignes directrices spécifiques au climat pour la conception des bâtiments et les stratégies de rénovation afin d'optimiser l'efficacité

énergétique, ce qui démontre le rôle important du climat local dans la détermination de l'empreinte énergétique d'un bâtiment.

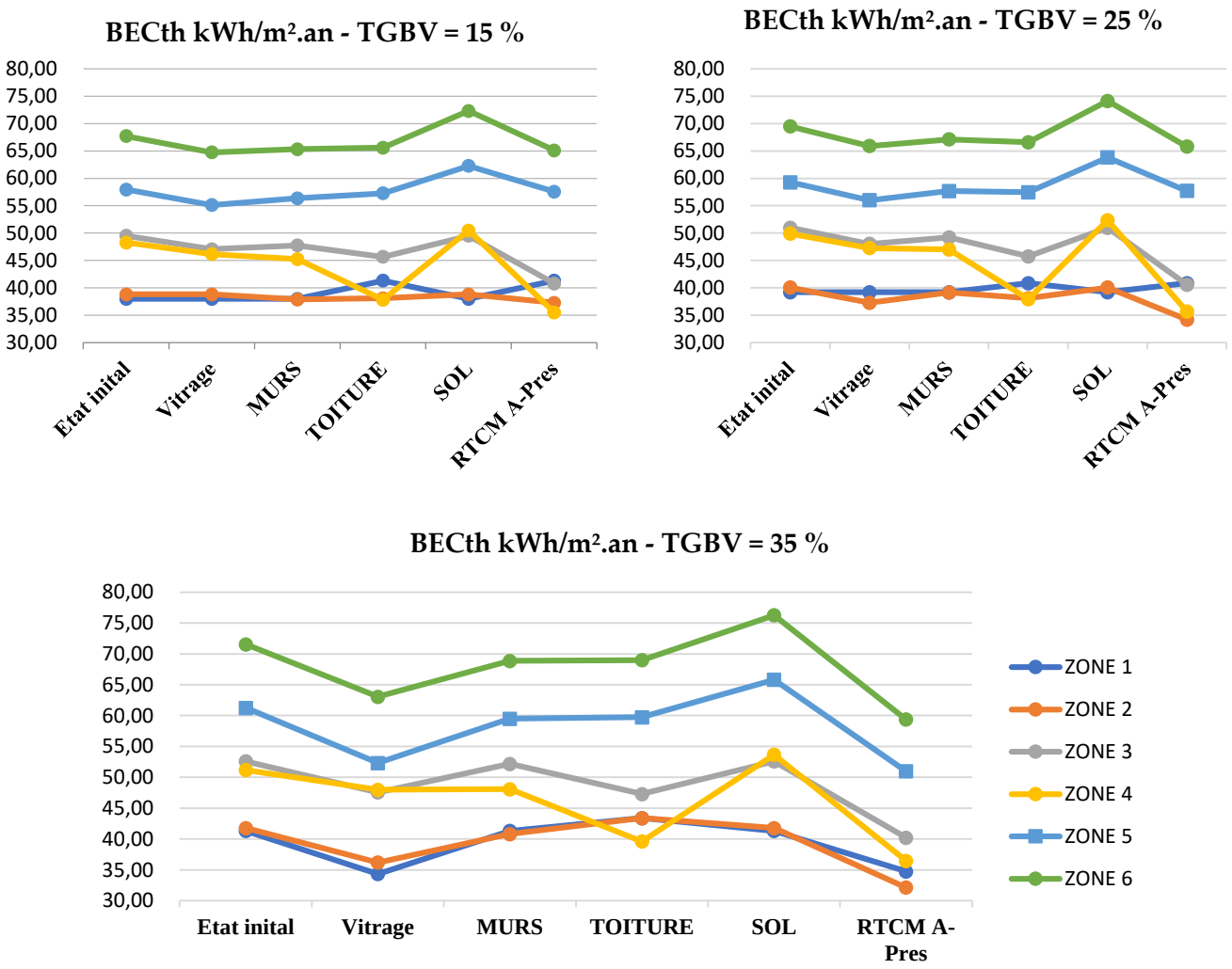
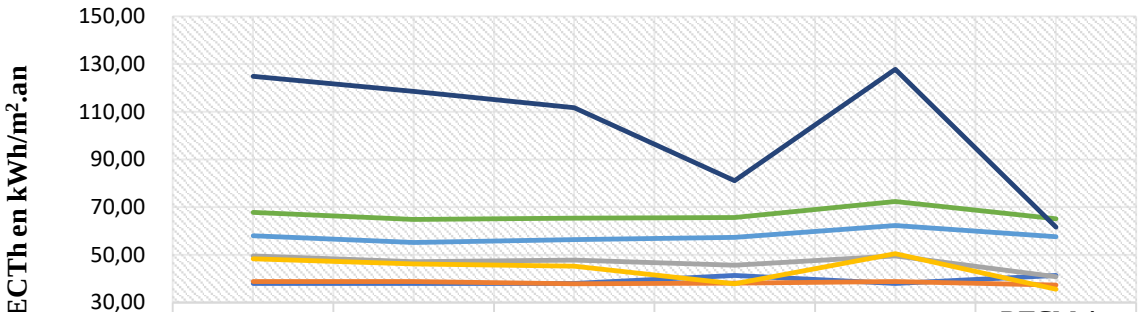


Figure III. 14. Variation comparative de l'énergie entre les zones.

III.4.7. Comparaison avec un climat plus froid

Pour analyser plus en détail l'impact de l'A-Pres dans les climats froids, des simulations supplémentaires ont été effectuées pour la ville de Berlin avec un TGBV de 15 %. La figure III.15 montre que les suggestions de la RTCM sont plus importantes dans les climats froids tels que Berlin que dans les régions marocaines. Il est intéressant de noter que même dans des climats froids comme Berlin, la température du sol reste modérée, comme le montre la figure III.16. L'inertie thermique fournie par le rez-de-chaussée réduit la consommation d'énergie dans le bâtiment. Cette observation suggère que l'isolation du sol n'est pas toujours une mesure d'économie d'énergie efficace, et que d'autres stratégies peuvent être plus appropriées pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments dans les climats froids.



	Etat inital	Vitrage	MURS	TOITURE	SOL	RTCM A-Pres
ZONE 1	37,97	37,97	37,97	41,30	37,97	41,30
ZONE 2	38,79	38,79	37,87	38,08	38,79	37,27
ZONE 3	49,52	47,05	47,76	45,65	49,52	40,80
ZONE 4	48,27	46,14	45,24	37,82	50,46	35,50
ZONE 5	57,97	55,13	56,35	57,28	62,28	57,58
ZONE 6	67,73	64,75	65,34	65,60	72,34	65,11
BERLIN	124,90	118,53	111,65	81,05	127,81	61,55

Figure III. 15. Variations de la BECth en fonction de la composante conforme pour les six zones et à Berlin.

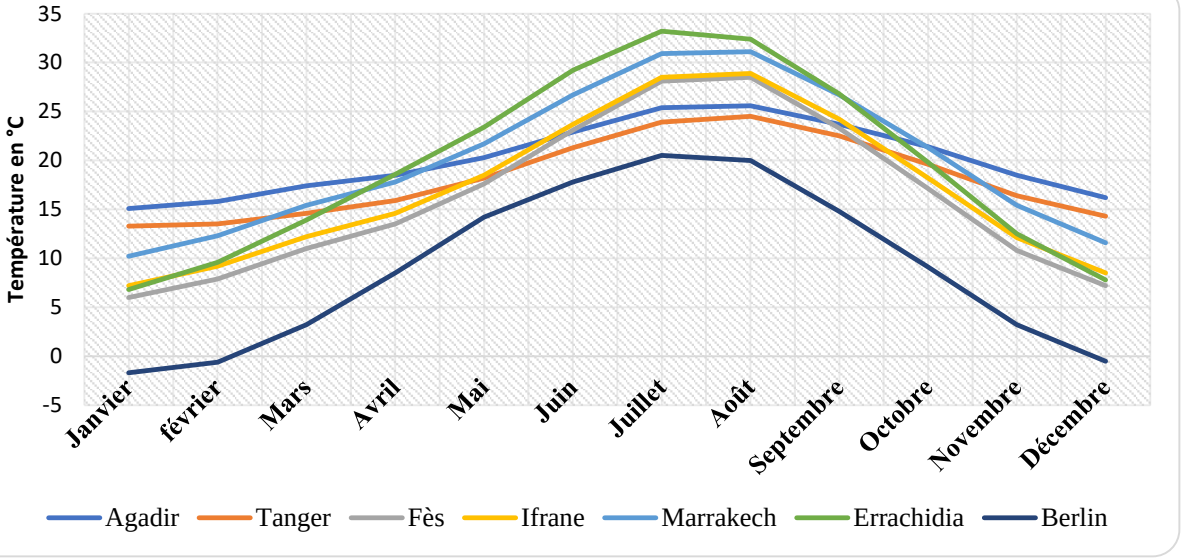


Figure III. 16. Variation annuelle de la température du sol dans les six zones marocaines et à Berlin, Source : RETScreen.

Le RTCM, qui se concentre principalement sur l'isolation, est une approche qui donne la priorité à la réduction de la demande annuelle d'énergie de chauffage (BECh) par rapport à la demande annuelle d'énergie de refroidissement (BERef). Cette tendance est plus évidente dans les climats plus froids. Toutefois, au Maroc, où le climat est plus chaud, l'accent est mis davantage sur la demande d'énergie de chauffage que sur la demande d'énergie de refroidissement. Par conséquent, il est essentiel de tenir compte du climat et des exigences énergétiques spécifiques lors de la conception de bâtiments à haut rendement énergétique dans différentes régions, en veillant à ce que les stratégies appropriées soient utilisées pour optimiser la performance énergétique à la fois pour les demandes de chauffage et de refroidissement.

III.5. Discussion

III.5.1. Comparaison de nos résultats avec la littérature

Pour le plancher, plusieurs études ont mis en évidence l'importance de ne pas isoler le rez-de-chaussée. (**Lafqir et al., 2020**) soulignent que l'isolation du rez-de-chaussée doit être évitée, tandis que (**Hashemi, 2017**) conclut qu'elle détériore les conditions de confort. (**Lebied et al., 2018**) démontrent que dans la zone climatique Z2, l'isolation du rez-de-chaussée n'est pas recommandée car elle entraîne une surchauffe. (**Sobhy et al., 2016**) rapportent que l'inertie thermique du sol a un effet bénéfique sur leur étude de cas à Marrakech et que l'isolation du rez-de-chaussée, telle qu'exigée par le RTCM, augmente la charge thermique annuelle d'au moins 7%. Notre étude soutient ces résultats en confirmant l'impact négatif de l'isolation du sol sur la performance thermique du bâtiment.

En ce qui concerne le toit, (**Hashemi, 2017**) affirme que l'isolation du toit est la stratégie la plus efficace pour améliorer le confort thermique et réduire le risque de surchauffe. (**Lamrani et al., 2018**) concluent que l'isolation du toit réduit de manière significative la demande d'énergie dans la zone 2, tandis que (**Lebied et al., 2018**) affirment qu'un plancher non isolé pourrait réduire la demande de refroidissement en absorbant l'excès de chaleur pendant les mois d'été. (**Sick et al., 2020**) et (**Sobhy et al., 2016**) soutiennent également que l'isolation des toits est une mesure efficace d'économie d'énergie. Notre étude montre que l'isolation du toit est particulièrement bénéfique dans les zones 3 et 4, et que la rénovation du toit seul donne de meilleurs résultats que la rénovation de l'ensemble de l'enveloppe dans certains scénarios.

Pour les murs, (**Hashemi, 2017**) conclut que l'isolation des murs extérieurs est efficace, mais pas autant que l'isolation du toit. Notre étude révèle que l'impact de l'isolation des murs, tel que requis par le RTCM pour toutes les zones, est négligeable. Cependant, les résultats sont plus favorables lorsque l'on rénove l'ensemble de l'enveloppe pour la zone 5 et des résultats similaires pour la zone 6, à l'exception du TGBV = 35 %.

En ce qui concerne le vitrage, (**Sick et al., 2020**) montrent que la demande d'énergie pourrait être réduite d'environ 50 % en introduisant un vitrage à 30 % de FS. (**Lafqir et al., 2020**) recommandent le double vitrage dans la plupart des climats et le triple vitrage dans les climats froids. (**Saidur, 2009**) et (**Lebied et al., 2018**) soutiennent également l'utilisation de vitrages et de dispositifs d'ombrage avancés pour réduire la consommation d'énergie. Notre étude indique que l'impact de la modernisation des vitrages dépend de la zone thermique et du TGBV. La réduction de la BECth suite à la rénovation des vitrages est plus importante pour les TGBV élevés, sauf pour la zone 4, où le vitrage n'est pas l'élément clé de la réduction de la BECth.

III.5.2. Comparaison de nos résultats avec les prévisions du RTCM

Le tableau III.10 présente une comparaison entre les indications du RTCM et les résultats de cette étude de cas. Les coûts d'investissement supplémentaires liés à la mise en conformité dans notre étude sont proches des prévisions du RTCM. Cependant, il y a une différence significative dans les gains énergétiques.

Par ailleurs, le surcoût a été calculé en considérant la différence entre le coût de construction initial du bâtiment et celui du bâtiment rénové, mis en conformité avec la réglementation

RTCM. Cela inclut des dépenses telles que l'isolation, le surcoût lié au remplacement du simple vitrage par du double vitrage et le coût de la mise en œuvre des modifications. Les éléments pris en compte dans notre étude sont les parois verticales, les parois horizontales, la surface et le type de vitrage. Nous avons ensuite établi les coûts pour chaque scénario (spécifique au type d'isolation) nécessaire pour répondre aux exigences de l'A-Pres.

La fourchette des coûts observés s'étend d'un minimum de 51,05 DH/m^2 à un maximum de de 353 DH/m^2 ; comme le montre le tableau III.10, le protocole A-Pres peut manquer d'efficacité en termes de coût d'optimisation. En effet, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) reconnaît que le coût substantiel de la mise en œuvre du RTCM est le principal facteur qui empêche son application à grande échelle.

Tableau III. 10. Comparaison entre les indications du RTCM et les résultats de cette étude de cas.

Indicateur	**Notre étude de cas A-Pres**	**Référence RTCM (*)**
Gain énergétique en kWh/m^2.an	Entre -3.3 et 14.72 kWh/m^2 .an)	Entre 23 et 119 kWh/m^2.an
Coût d'investissement supplémentaire pour la mise en conformité (*)	Entre 1.28% (51.05 DH/m^2) sur la zone 1 et 8.83% (353 DH/m^2) sur la zone 4	Entre 1.93% (77 DH /m^2) sur la zone 1 et 5.23% (209 DH /m^2) sur la zone 4

(*) Nous nous sommes référés au "Guide technique sur l'isolation thermique des bâtiments au Maroc" pour calculer les surcoûts liés à la mise en conformité. Les valeurs de référence sont tirées du guide RTCM.

III.5.3. Comparaison entre les deux approches RTCM

Il existe une lacune importante dans la littérature concernant la comparaison des deux méthodologies RTCM. Ce travail présente une comparaison en termes de conformité avec les bâtiments primaires (BP) conventionnels. Suite aux simulations présentées dans cette étude, le bâtiment conventionnel marocain est conforme à 83% selon l'approche A-Perf mais à 0% selon l'approche A-Pres. Par conséquent, en choisissant l'approche A-Pres, on peut travailler à mettre en conformité des bâtiments qui le sont déjà, ce qui entraîne une perte d'investissement et un retard injustifié dans la construction. De plus, les simulations montrent que certains bâtiments, bien qu'ils répondent aux exigences de l'A-Pres, sont moins performants énergétiquement que les bâtiments conventionnels (en particulier dans la zone 1). Cela entraîne non seulement une perte d'investissement et un retard dans la construction, mais aussi un coût d'exploitation plus élevé ou une diminution du confort en cas d'absence de climatisation. En fait, l'approche A-Pres ne reflète pas exactement la réalité énergétique du bâtiment et ne permet donc pas de prendre des décisions en connaissance de cause. Avec l'approche A-Perf, il est possible d'avoir un bâtiment à faible coût, même sans investissement supplémentaire. Si l'approche A-Pres est plus facile à contrôler et permet d'obtenir rapidement un certificat de conformité, cela ne justifie pas les inconvénients qu'elle engendre.

III.5.4. Amélioration de l'efficacité énergétique dans le RTCM

L'analyse de la littérature révèle que des économies d'énergie et des réductions d'émissions significatives peuvent être réalisées grâce à diverses stratégies telles que le vitrage avancé, les lampes fluorescentes compactes, les systèmes de chauffage et de refroidissement efficaces, l'isolation, l'entretien ménager et le réglage approprié des thermostats (**Saidur, 2009**). Il a également été démontré que l'intégration d'un système de refroidissement passif dans la réglementation améliorait les performances thermiques dans des endroits spécifiques (**Merini et al., 2020**). (**Abdou et al., 2021**) suggèrent que l'orientation du bâtiment, le type de vitrage et le taux d'infiltration devraient également être pris en compte dans la RTCM afin de réaliser des économies d'énergie significatives de plus de 21%.

Plusieurs études proposent diverses modifications de la construction, des principes d'architecture bioclimatique et l'utilisation de matériaux biosourcés pour améliorer l'efficacité énergétique (**Mathews & Van Wyk, 1996 ; El Harrouni et al., 2018 ; Dlimi et al., 2019 ; Echlouchi et al., 2022**). Certains auteurs soulignent la nécessité d'étendre le RTCM actuel aux bâtiments existants et d'améliorer la méthodologie de zonage (**M'lahfi et al., 2020 ; Abdou et al., 2022 ; Abdou et al., 2021**). (**Sobhy et al., 2016**) suggèrent que la maison évaluée présente des performances supérieures à celles d'une configuration conforme aux exigences du RTCM dans les deux zones climatiques étudiées. Notre analyse et la littérature actuelle nous ont permis d'identifier plusieurs stratégies potentielles pour améliorer le RTCM.

Pour le développement du document RTCM, nous suggérons de :

1. Prévoir des vitrages avancés, des lampes fluorescentes compactes, des systèmes de climatisation efficaces, des installations d'éclairage efficaces, une contribution solaire minimale pour l'eau chaude domestique et une contribution photovoltaïque minimale pour l'énergie électrique ;
2. Étudier à l'avance l'orientation et la compacité du bâtiment ;
3. Tenez compte de la conception architecturale, de l'adéquation des matériaux de construction avec un système climatique adapté au climat local, du refroidissement passif ;
4. Limiter le TGBV par zone ;
5. Réviser les exigences en matière d'isolation, en l'ajoutant là où elle est bénéfique (toiture pour la zone 4) et en la supprimant dans les zones où son impact négatif a été démontré (rez-de-chaussée pour toutes les zones, toiture pour la zone 1) ;
6. Ajouter des exigences concernant l'épaisseur de la lame d'air, considérée comme un isolant gratuit, et intégrer des exigences concernant l'inertie thermique des matériaux ;
7. Assurer le contrôle de la ventilation et de l'infiltration (exiger un taux d'infiltration maximal dans les zones froides et ajouter des exigences de ventilation naturelle dans les zones chaudes) ;
8. Indiquer les exigences en matière de couleur des murs extérieurs et des toits ;
9. Intégrer des techniques de gestion de l'énergie ;
10. Revoir les zones de confort en fonction des zones thermiques ;
11. Étendre le RTCM aux bâtiments existants.

Pour le développement de la mise en œuvre de la RTCM, nous suggérons de :

12. Fournir une étude sur les coûts différentiels en différenciant les deux approches ;
13. Améliorer le logiciel de simulation thermique et mettre à disposition des éléments et des matériaux conventionnels ;
14. Produire un guide détaillé couvrant les dispositifs normatifs et réglementaires à prendre en compte dans les phases d'étude et de conception des bâtiments répondant au RTCM ;
15. Développer des mécanismes de suivi et de vérification de l'application de la RTCM dans les contrats et sur les sites (formation des auditeurs, équipement de vérification, procédures)
16. Développer des mécanismes de subventions publiques ;
17. Développer la communication autour du RTCM, ainsi que la formation et la sensibilisation à l'EE.

En outre, pour obtenir une perspective globale et intégrée sur l'avenir du RTCM, il est essentiel d'impliquer les praticiens, tels que les architectes, les ingénieurs, les promoteurs immobiliers, les bureaux d'études, les gestionnaires de projets et les autres parties prenantes de l'industrie du bâtiment. La réalisation d'une enquête auprès de ces professionnels permettra d'obtenir des informations précieuses sur l'applicabilité technique du RTCM et d'identifier les difficultés qui entravent sa mise en œuvre.

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, la conformité d'un bâtiment public dans les six zones climatiques a été étudiée selon la Réglementation Thermique des Bâtiments du Maroc. L'étude a montré un écart important dans la conformité avec l'approche prescriptive la réglementation, malgré une conformité de 83% avec l'approche performancielle. Les avantages de l'approche performancielle par rapport à l'approche prescriptive ont été soulignés, cette dernière conduisant souvent à un surdimensionnement des éléments de construction et à une optimisation insuffisante.

En outre, le rôle important du ratio TGBV dans la conformité avec le RTCM a été discuté. L'analyse a montré que l'approche basée sur la performance (A-Perf) permettait généralement une conformité initiale pour les différentes zones climatiques. Cependant, l'approche prescriptive (A-Pres) a permis une conformité partielle en identifiant certains éléments critiques nécessitant une attention particulière dans chaque zone. L'analyse met en évidence l'influence variable de l'approche A-Pres du RTCM sur l'efficacité énergétique dans les différentes zones climatiques, en soulignant l'impact de la conformité des différents éléments de l'enveloppe. L'isolation de la toiture donne des résultats mitigés selon la zone, tandis que l'isolation des murs n'améliore que légèrement la performance énergétique dans les zones 4, 5 et 6. La conformité des vitrages réduit systématiquement le BECth dans toutes les zones, en particulier lorsque le TGBV augmente.

Enfin, cette étude suggère de poursuivre la recherche et l'exploration des techniques d'économie d'énergie qui pourraient être incorporées dans le RTCM et sa mise en œuvre. Grâce à la révision du RTCM et à son adaptation au contexte marocain, la réglementation thermique des bâtiments au Maroc peut être améliorée de manière significative, ce qui conduira à une plus grande efficacité énergétique et à des économies de coûts à long terme.

Références du chapitre

Abdou, N., El Mghouchi, Y., Jraida, K., Hamdaoui, S., Hajou, A., & Mouqallid, M. (2022). Prediction and Optimization of Heating and Cooling Loads for Low Energy Buildings in Morocco: An Application of Hybrid Machine Learning Methods. Journal of Building Engineering, 61, 105332.

Abdou, N., Mghouchi, Y., Hamdaoui, S., Asri, N., & Mouqallid, M. (2021). Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco. Building and Environment, 204, 1–16.

Alam, M., Zou, P. X., Stewart, R. A., Bertone, E., Sahin, O., Buntine, C., & Marshall, C. (2019). Government Championed Strategies to Overcome the Barriers to Public Building Energy Efficiency Retrofit Projects. Sustainable Cities and Society, 44, 56–69.

Aljawabra, F., & Nikolopoulou, M. (2018). Thermal comfort in urban spaces: A cross-cultural study in the hot arid climate. International Journal of Biometeorology, 62, 1901–1909.

Agence Marocaine de l'Efficacité Énergétique (AMEE). (2022). Consulté le 20 octobre, 2022, https://www.amee.ma/

D'Agostino, D., Cuniberti, B., & Bertoldi, P. (2017). Energy Consumption and Efficiency Technology Measures in European Non-Residential Buildings. Energy and Buildings, 153, 72–86.

Dongmei, S. (2018). Research and Application of Energy Consumption Benchmarking Method for Public Buildings Based on Actual Energy Consumption. Energy Procedia, 152, 475–483.

Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2020). Review of Half a Century of EU Energy Efficiency Policies for Buildings. Energy and Buildings, 225, 110322.

El Asri, N., Nouira, Y., Maaroufi, I., Marfak, A., Saleh, N., & Mharzi, M. (2022). The Policy of Energy Management in Public Buildings Procurements through the Study of the Process of Delegated Project Management-Case of Morocco. Energy Policy, 165, 112944.

El Harrouni, K., Filali, M., Kharmich, H., Mansour, M., Laaroussi, N., & Garoum, M. (2018). Energy efficient houses meeting both bioclimatic architecture principles and Moroccan thermal regulation. In Proceedings of the 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 1-8). Rabat, Morocco.

El Kadiri, S. E., Kaitouni, S. I., Ikken, B., & Otmani, R. E. (2018). Thermal performance of a residential building in Ben Guerir city: A comparative evaluation for an optimized thermal load needs. In Proceedings of the 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 1-6). Rabat, Morocco.

Haddadi, T., Mourabit, T., & Haddadi, A. (2017). Évaluation de la Durabilité Dans les Marchés Publics Marocains. Centre National de Documentation. https://atlas.irit.fr/PIE/VSST/Actes-VSST2018-Toulouse/Mourabit.pdf

Hamza, N., & Greenwood, D. (2009). Impacts of Energy Conservation Regulations on Design and Procurement of Low Energy Buildings. Building and Environment, 44, 929–936.

Hashemi, A. (2017). Effects of thermal insulation on thermal comfort in low-income tropical housing. Energy Procedia, 134, 815-824.

International Energy Agency (IEA). (2019). International Energy Agency Publishes New Review of Morocco's Energy Policies. IEA News. https://www.iea.org/news/international-energy-agency-publishes-new-review-of-moroccos-energy-policies

Jamil, M. N. (2022). Critical analysis of energy consumption and its impact on countries economic growth: An empirical analysis base on countries income level. Journal of Environmental Sciences and Economics, 1, 1–12.

Lafqir, F. E., Sobhy, I., Benhamou, B., Bennouna, A., & Limam, K. (2020). Thermal performance of passive techniques integrated to a house and the concept of passive house in the six climates of Morocco. Science and Technology for the Built Environment, 26(12), 1490-1508.

Lamrani, A., Safar, S., & Rougui, M. (2018). Parametric study of the thermal performance of a typical administrative building in the six thermal zones according to the RTCM, using TRNSYS. MATEC Web of Conferences, 149, 02097.

Lebied, M., Sick, F., Choulli, Z., & El Bouardi, A. (2018). Improving the passive building energy efficiency through numerical simulation–A case study for Tetouan climate in northern of Morocco. Case Studies in Thermal Engineering, 11, 125-134.

Lopez, F., & Santiago, M. (2015). Sensitivity Study of an Opaque Ventilated Façade in the Winter Season in Different Climate Zones in Spain. Renewable Energy, 75, 524–533.

M'lahfi, B., Amegouz, D., & El Qandil, M. (2020). A New Approach for the Mandatory Application of the Thermal Regulation of Construction (RTCM) in the Future Moroccan Buildings. SN Applied Sciences, 2(10), 1-10.

Mastouri, H., Bahi, H., Radoine, H., & Benhamou, B. (2020). Thermal performance and adherence of local materials to the Moroccan Building Code requirements. In Proceedings of the 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries, Marrakech, Morocco (Vol. 5, pp. 14–18).

Mathews, E. H., & Van Wyk, S. L. (1996). Energy efficiency of formal low-cost housing in South Africa's Gauteng region. Energy and Buildings, 24(3), 117-123.

Merini, I., Molina-García, A., García-Cascales, M. S., Mahdaoui, M., & Ahachad, M. (2020). Analysis and comparison of energy efficiency code requirements for buildings: A Morocco–Spain case study. Energies, 13, 5979.

Modi, S., Isyaku, I. S., Kogi, T. M., Danladi, A., Sambo, B. P., & Gado, E. A. (2022). Orientation as a Panacea for Improving the Thermal Performance of a Fully Enclosed Courtyard in a Typical Tropical Climate. Journal of Environmental Sciences and Economics, 1, 51–59.

Ozoadibe, C. J., & Obi, H. E. (2023). Exploring Renewable Energy Facility and Green Building Practices for Improved Archives Preservation in Public Libraries in Rivers State. Journal of Environmental Sciences and Economics, 2, 45–54.

Saidur, R. (2009). Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings. Energy Policy, 37(11), 4104-4113.

Salvalai, G., Masera, G., & Sesana, M. (2015). Italian Local Codes for Energy Efficiency of Buildings: Theoretical Definition and Experimental Application to a Residential Case Study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 1245–1259.

Sick, F., Schade, S., Mourtada, A., Uh, D., & Grausam, M. (2020). Dynamic building simulations for the establishment of a Moroccan thermal regulation for buildings. Journal of Green Building, 9, 145–165.

Sobhy, I., Brakez, A., & Benhamou, B. (2016). Thermal Comfort Analysis of a House Retrofitted According to the Moroccan Building Energy Code. In Proceedings of the 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 849-854). Marrakech, Morocco.

Tolón-Becerra, A., Lastra-Bravo, X. B., Fernández-Membrive, V. J., & Flores-Parra, I. (2013). Opportunities in Spanish Energy Efficiency: Current Situation, Trends, and Potential in the Building Sector. Energy Procedia, 42, 63–72.

Zhao, J., Xin, Y., & Tong, D. (2012). Energy consumption quota of public buildings based on statistical analysis. Energy Policy, 43, 362–370.

Chapitre IV : Prédiction de la Charge Thermique du Bâtiment public en utilisant la Méthode de Régression Polynomiale

Résumé :

Ce chapitre présente une application de la méthode de régression polynomiale pour prévoir les besoins énergétiques du bâtiment. Cinq paramètres de l'enveloppe du bâtiment ont été étudiés. Des modèles polynomiaux ont été élaborés via un plan d'expériences hypercube latin. Le modèle quadratique s'est avéré le plus précis avec des R^2 supérieurs à 0,9. Une analyse de sensibilité a identifié les paramètres les plus influents. Cette étude met en évidence le potentiel de la régression polynomiale comme alternative rapide et précise aux simulations détaillées pour la prédiction des besoins thermiques des bâtiments. Ces méta-modèles pourraient appuyer la conception et l'optimisation de l'enveloppe dans un processus de conception durable.

Introduction du chapitre

La consommation énergétique des bâtiments est fortement influencée par l'architecture et les matériaux de construction employés (**Lee & Jeong, 2017**). Dans le contexte des bâtiments publics au Maroc, comme les bureaux, hôpitaux et établissements d'enseignement, ces besoins en chauffage et climatisation sont accentués, rendant la tâche de réduction de la consommation énergétique encore plus difficile. Bien que les simulations dynamiques détaillées restent la norme pour l'évaluation de la performance énergétique (**Amber et al., 2018**), elles sont souvent chronophages et nécessitent des compétences spécialisées pour une mise en œuvre adéquate. Est-il possible de simplifier cette approche tout en conservant une précision acceptable ? C'est la question à laquelle nous avons cherché à répondre.

En explorant les méta-modèles, et plus particulièrement la régression polynomiale, nous avons tenté d'offrir une alternative aux méthodes traditionnelles (**Amiri, Mottahedi, & Asadi, 2015**). Au lieu de s'appuyer sur une modélisation détaillée et exhaustive, cette approche vise à utiliser des relations mathématiques pour prédire les consommations énergétiques en fonction de variables clés. En d'autres termes, il s'agit de résumer une grande quantité d'informations complexes en des équations plus simples, mais toujours pertinentes. L'intérêt des méta-modèles dans cette étude réside dans leur capacité à reproduire des simulations complexes de manière simplifiée, sans perte de précision. Les méta-modèles permettent de condenser les résultats de simulations détaillées en des modèles approximatifs, mais néanmoins précis. Ils capturent les relations essentielles entre variables d'entrée et de sortie du modèle d'origine. Ainsi, les méta-modèles allient rapidité d'exécution et maintien d'un haut niveau de précision.

Dans le chapitre III, pour évaluer l'approche A-perf, 126 simulations ont été effectuées pour obtenir les charges de chauffage et de refroidissement à partir du logiciel DesignBuilder. Cette méthode traditionnelle s'avère coûteuse en temps. Dans ce chapitre, une nouvelle méthode visant à obtenir rapidement les besoins de climatisation et de refroidissement est présentée. Dans ce chapitre, nous détaillerons la méthodologie utilisée pour développer les méta-modèles. Nous aborderons les cinq paramètres de l'enveloppe du bâtiment qui ont été considérés, ainsi que la méthode de plan d'expériences par hypercube latin. Nous discuterons également de la précision des différents modèles et des facteurs qui influencent le plus les besoins énergétiques du bâtiment.

IV.1. Méthodologie

L'obtention des modèles de prédiction nécessite une méthodologie rigoureuse pour garantir leur fiabilité et leur efficacité. Cette démarche s'articule en plusieurs étapes, commençant par la définition des paramètres et de leurs intervalles de variations. Une fois ces éléments établis, il est essentiel de réaliser des simulations pour obtenir les données nécessaires à l'entraînement des modèles. Il faut procéder ensuite à la définition et à l'entraînement des modèles eux-mêmes. Une étape cruciale consiste à comparer les charges prédites par les modèles avec les charges simulées afin d'évaluer leur précision. Enfin, après ces vérifications, les modèles peuvent être validés et utilisés pour des applications concrètes. La figure IV.1 montre les différentes étapes.

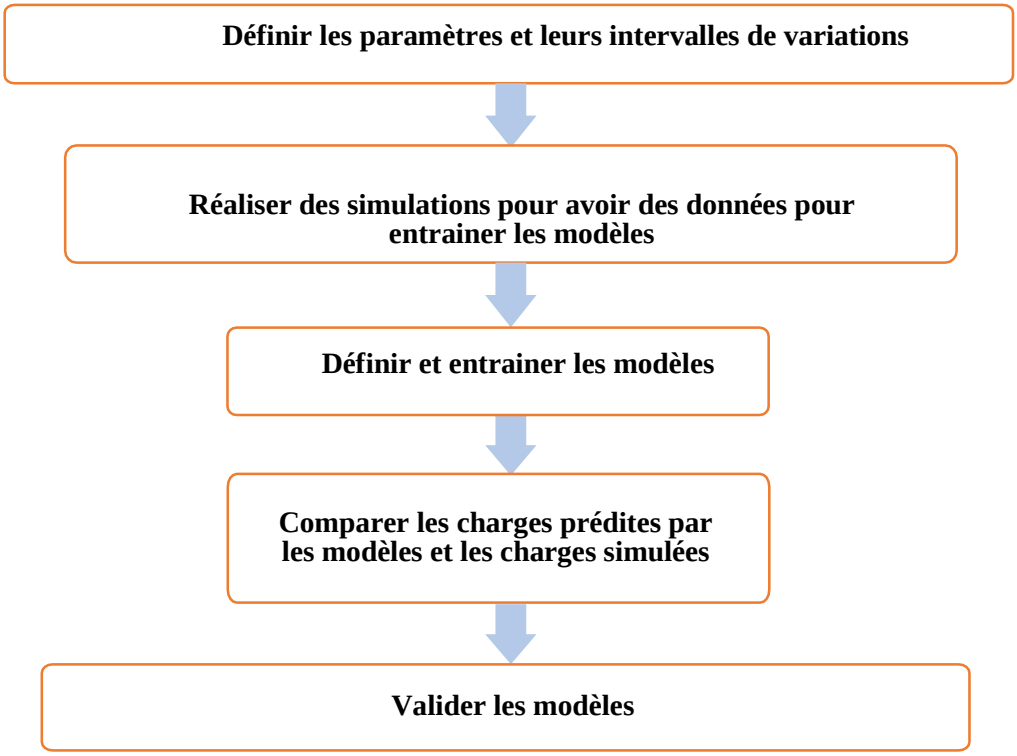


Figure IV. 1. Méthodologie pour obtenir les métamodèles, detaillée dans l'annexe n°5

IV.1.1. Définition des paramètres et leurs intervalles de variations

L'enveloppe du bâtiment joue un rôle crucial dans la performance énergétique globale d'un bâtiment. En effet, elle constitue l'interface entre l'intérieur du bâtiment et les conditions climatiques extérieures. Une enveloppe performante limite les déperditions thermiques en hiver et les apports de chaleur en été, réduisant ainsi les besoins énergétiques pour le chauffage et la climatisation. Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons spécifiquement à cinq paramètres clés relatifs à l'enveloppe du bâtiment public analysé. Ces variables, décrites ci-après, seront utilisées comme données d'entrée dans les modèles de régression polynomiale développés.

Le premier paramètre considéré est l'épaisseur de l'isolation des murs extérieurs, noté X1. Il s'agit d'un facteur déterminant pour limiter les déperditions thermiques à travers les parois opaques qui représentent une part importante des surfaces d'échange avec l'extérieur. Une isolation thermique efficace permet de réduire les besoins énergétiques pour le chauffage en hiver. Dans notre étude, l'épaisseur de l'isolant des murs extérieurs varie entre 1 et 12 cm. Ces bornes ont été définies en se basant sur les pratiques courantes de construction au Maroc.

Le deuxième paramètre est l'épaisseur de l'isolation du toit, notée X2. Tout comme pour les murs, l'isolation thermique de la toiture limite les déperditions par le haut du bâtiment. Elle contribue également à améliorer le confort d'été en réduisant les apports solaires. Nous ferons varier ce paramètre entre 1 et 12 cm également.

Le troisième paramètre X3 correspond à l'épaisseur de l'isolant sous le plancher au contact du sol. Bien que sa contribution soit moindre comparée aux parois verticales, cette isolation limite

les déperditions vers le bas et améliore le confort interne. Nous utiliserons la même plage de variation entre 1 et 12 cm.

Les deux derniers paramètres concernent les propriétés radiatives de l'enveloppe, à savoir le coefficient d'absorption solaire du toit (X4) et des murs extérieurs (X5). Ces coefficients influencent les apports solaires à travers l'enveloppe. Des matériaux sombres avec un fort coefficient d'absorption augmenteront les apports et donc potentiellement les besoins de climatisation. À l'inverse, des revêtements clairs réfléchissant le rayonnement solaire permettront de limiter les surchauffes. Nous ferons varier ces coefficients entre 0,2 pour des matériaux très réfléchissants et 0,8 pour des matériaux très absorbants. Le Tableau IV.1 montre les variables.

Tableau IV.1. Paramètres du bâtiment retenu pour l'étude (**Romani et al., 2015**)

Nom du paramètre	Libellé du paramètre	Plage de variation du paramètre
Épaisseur de l'isolation des murs extérieurs	X1	[1-12]
Épaisseur de l'isolation du toit	X2	[1-12]
Épaisseur de l'isolation du plancher sur le sol	X3	[1-12]
Coefficient d'absorption du toit	X4	[0,2-0,8]
Coefficient d'absorption des murs extérieurs	X5	[0,2-0,8]

IV.1.2. Réalisation des simulations pour avoir des données pour entrainer les modèles.

Nous avons utilisé la méthode LHS pour varier les paramètres et le logiciel TRNSYS pour avoir les charges de chauffage QH et climatisation QC.

IV.1.2.1. Échantillonnage hypercube latin (LHS)

L'échantillonnage hypercube latin, ou Latin Hypercube Sampling (LHS), est une méthode d'échantillonnage stratifié utilisée pour générer un échantillon d'un ensemble de variables aléatoires. Cette technique est particulièrement utile pour estimer les distributions de probabilité de variables aléatoires multivariées sans avoir à échantillonner la totalité de l'espace de recherche (**Abdou et al., 2022**).

A. Concept de base

L'idée derrière le LHS est de diviser la plage de chaque variable d'entrée en intervalles égaux, assurant ainsi que l'échantillon couvre bien l'ensemble de l'espace de la variable. Pour chaque variable, une valeur est ensuite choisie au hasard dans chaque intervalle. Les combinaisons de ces valeurs d'intervalles pour toutes les variables d'entrée forment l'échantillon final.

Mathématiquement, si nous avons m variables et souhaitons n échantillons, chaque variable est divisée en n intervalles égaux. Si X_i est la $i^{ème}$ variable, un échantillon x_{ij} est choisi au hasard dans le $j^{ème}$ intervalle de X_i.

B. Avantages du LHS

- **Uniformité** : LHS garantit une couverture uniforme de l'espace d'entrée, car chaque intervalle est échantillonné une fois et une seule fois.
- **Efficacité** : LHS est souvent plus efficace que l'échantillonnage aléatoire simple, car il réduit la variabilité associée à l'échantillonnage.
- **Flexibilité** : LHS peut être utilisé avec n'importe quel type de distribution de probabilité pour chaque variable, tant que vous pouvez générer un échantillon aléatoire de cette distribution.

Supposons que nous voulons échantillonner deux variables, X_1 et X_2, chacune devant être échantillonnée trois fois. Pour le LHS :

1. Divisez chaque variable en trois intervalles égaux.
2. Sélectionnez au hasard un point dans chaque intervalle pour chaque variable.
3. Associez les points échantillonnés des deux variables pour former l'échantillon final.

Sur la F**igure IV.2**, les axes représentent les deux variables unitaires X_1 et X_2. Chaque variable est divisée en trois intervalles égaux, comme indiqué par les lignes de grille. Les points bleus montrent les échantillons générés par l'échantillonnage hypercube latin. On peut observer que chaque intervalle contient exactement un point, garantissant ainsi une couverture uniforme de l'espace. Pour mieux comprendre les avantages du LHS, comparons-le à l'échantillonnage aléatoire simple. Dans l'échantillonnage aléatoire simple, chaque point est choisi indépendamment des autres points, sans tenir compte de sa position relative dans l'espace. Cela peut conduire à des zones suréchantillonnées et à d'autres sous-échantillonnées. Par exemple, supposons que nous échantillonnions également X_1 et X_2 trois fois en utilisant l'échantillonnage aléatoire simple.

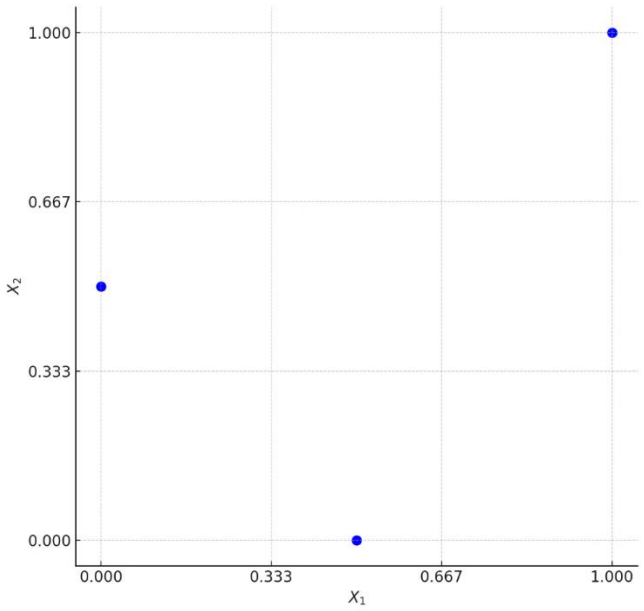


Figure IV. 2. LHS méthode

Sur la **Figure IV.4**, les points rouges représentent les échantillons générés par l'échantillonnage aléatoire simple. Contrairement à l'échantillonnage hypercube latin, il n'y a aucune garantie que chaque intervalle contienne un échantillon. En effet, nous observons des zones qui sont suréchantillonnées (plus d'un point dans un intervalle) et des zones qui sont sous-échantillonnées (pas de point dans un intervalle).

Pour notre étude, la **Figure IV.3** montre l'échantillonnage des variables Xi où (i varie de 1 ... 5) sur leurs intervalles respectifs de variation. La méthode LHS a permis d'obtenir un échantillon représentatif de l'ensemble de l'espace des paramètres. Chaque point sur la figure IV.3 représente une simulation.

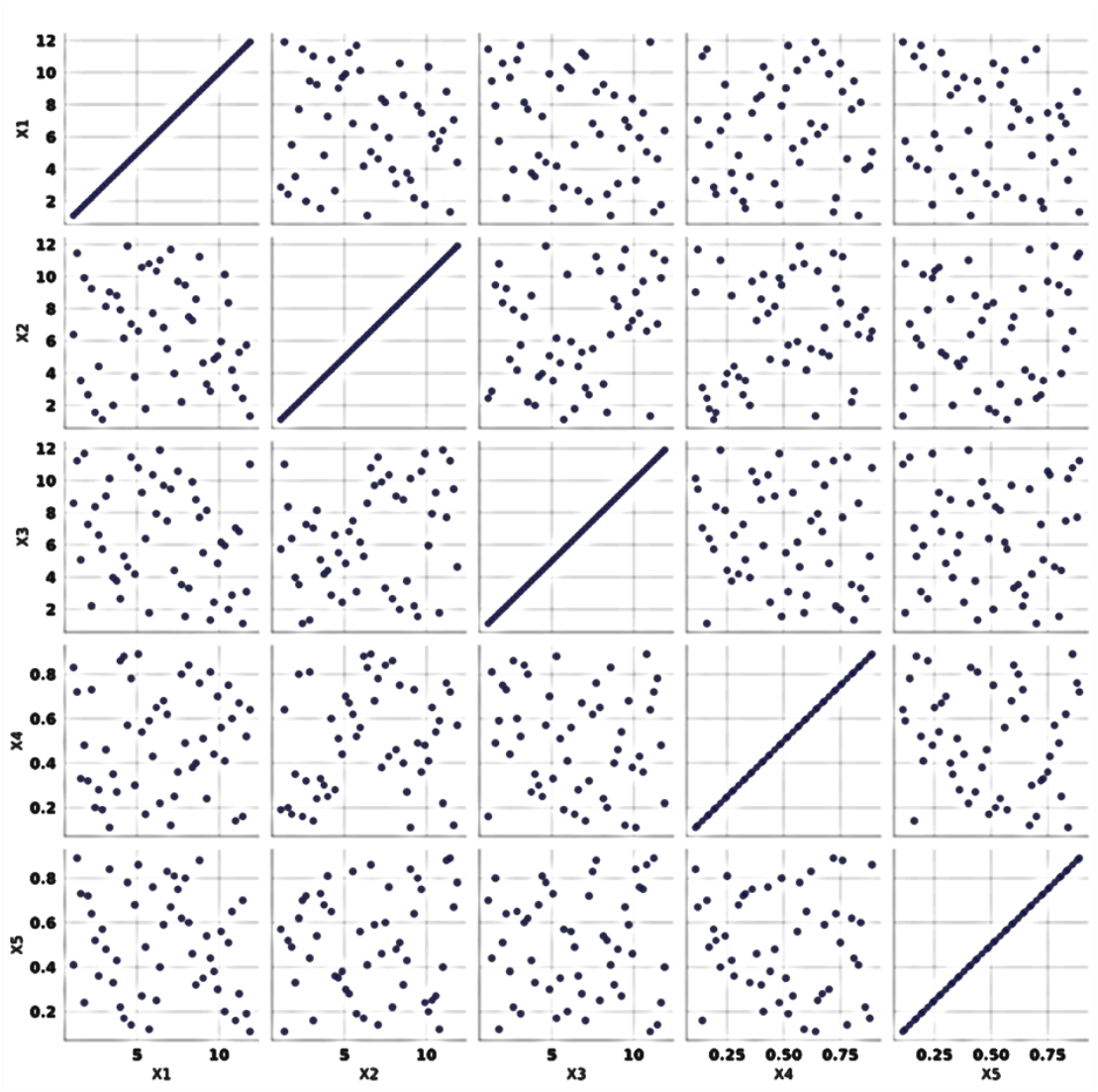


Figure IV. 3. Échantillonnage LHS des Xi pour notre étude

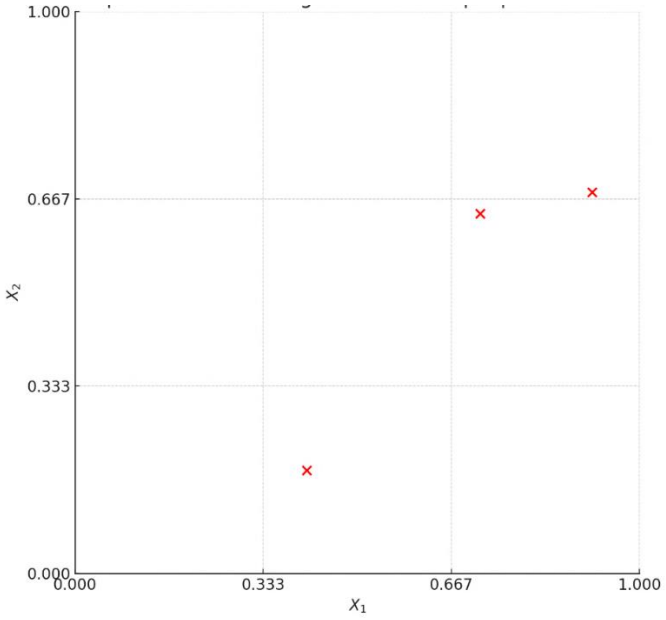


Figure IV. 4. Exemple d'échantillonnage aléatoire simple

Pour mesurer la dépendance entre les variables, nous allons calculer la corrélation de Spearman (**Ying et al., 2023**) et la corrélation de Kendall (**Puth, Neuhäuser, & Ruxton, 2015**).

a. Corrélation de Spearman

La corrélation de Spearman, ρ, est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)}$$

où d_i est la différence entre les rangs des paires de données, et n est le nombre d'observations (simulations). Les valeurs de ρ varient entre -1 et 1, où -1 indique une corrélation négative parfaite, 1 indique une corrélation positive parfaite, et 0 indique l'absence de corrélation.

b. Corrélation de Kendall

La corrélation de Kendall, τ, est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\tau = \frac{n_c - n_d}{n(n-1)/2}$$

où n_c est le nombre de paires concordantes, n_d est le nombre de paires discordantes, et n est le nombre d'observations. Comme pour la corrélation de Spearman, les valeurs de τ varient entre -1 et 1.

c. Exemple de calcul des corrélations

Prenons les données suivantes comme exemple :

Observation	Variable X	Variable Y
1	10	5
2	20	20
3	30	15
4	40	35
5	50	50

Il faut d'abord classer les données pour les deux variables, X et Y, puis utiliser les rangs pour calculer les coefficients de corrélation de Spearman et de Kendall.

- Pour **la corrélation de Spearman**, l'attribution des rangs est essentielle. Pour chaque variable, on commence par trier les données par ordre croissant. La valeur la plus petite se voit attribuer le rang 1. Ensuite, on continue à attribuer les rangs de manière successive pour chaque valeur, en suivant l'ordre croissant des données.

On obtient les rangs et les d_i suivant :

Observation	X	Y	Rang X	Rang Y	d_i	d_i^2
1	10	5	1	1	0	0
2	20	20	2	3	-1	1
3	30	15	3	2	1	1
4	40	35	4	4	0	0
5	50	50	5	5	0	0

La corrélation de Spearman, ρ, pour ces données est de 0.9.

- Pour **la corrélation de Kendall**, il faut d'abord identifier le nombre de paires concordantes n_c et discordantes n_d. Pour déterminer n_c (nombre de paires concordantes) et n_d (nombre de paires discordantes) pour les données fournies, nous devons suivre les étapes suivantes :

1. Parcourir chaque paire de points (X_i, Y_i) et (X_j, Y_j) où i et j sont des indices distincts (et $i < j$ pour éviter de comparer une paire à elle-même ou de compter deux fois la même paire).
2. Pour chaque paire :
    - Si $X_i < X_j$ et $Y_i < Y_j$ ou $X_i > X_j$ et $Y_i > Y_j$, alors la paire est concordante (augmenter n_c).
    - Sinon, la paire est discordante (augmenter n_d).

On obtient donc les résultats suivants :

Type de Paire	Paire 1 (Xi, Yi)	Paire 2 (Xj, Yj)
Concordant	(10,5)	(20,20)
Concordant	(10,5)	(30,15)
Concordant	(10,5)	(40,35)
Concordant	(10,5)	(50,50)
Concordant	(20,20)	(40,35)
Concordant	(20,20)	(50,50)
Concordant	(30,15)	(40,35)
Concordant	(30,15)	(50,50)
Concordant	(40,35)	(50,50)
Discordant	(20,20)	(30,15)

Donc :

- Nombre de paires concordantes n_c : 9
- Nombre de paires discordantes n_d : 1

La corrélation de Kendall, τ, est de 0.8.

d. Différence entre Spearman et Kendall

- **Méthode de Calcul** :
  - La corrélation de Spearman est basée sur la différence entre les rangs des paires de données.
  - La corrélation de Kendall est basée sur le nombre de paires concordantes et discordantes.
- **Sensibilité** :
  - La corrélation de Spearman est généralement plus sensible aux valeurs aberrantes que la corrélation de Kendall.
- **Complexité Computationnelle** :
  - Le calcul de la corrélation de Kendall peut être plus complexe et prendre plus de temps, surtout pour les grands échantillons, par rapport à la corrélation de Spearman.
- **Interprétation** :
  - Bien que les deux mesures soient des mesures de corrélation de rang et varient entre -1 et 1, l'interprétation de leurs valeurs peut différer, en particulier pour les ensembles de données de petite taille.

e. Matrices de corrélation :

Les Figures IV.5 et IV.6 montrent les matrices de corrélations de Spearman et Kendall. Ces matrices montrent que, que ce soit avec la méthode de Spearman ou de Kendall, les variables n'ont pas de fortes corrélations entre elles, la plupart des valeurs de corrélation étant proches de zéro. L'absence de corrélations fortes entre les variables suggère que les variables sont relativement indépendantes les unes des autres dans cet échantillon. Cela est conforme aux

attentes pour un échantillon issu de l'échantillonnage Latin Hypercube, qui vise à générer des échantillons uniformément répartis dans l'espace d'entrée.

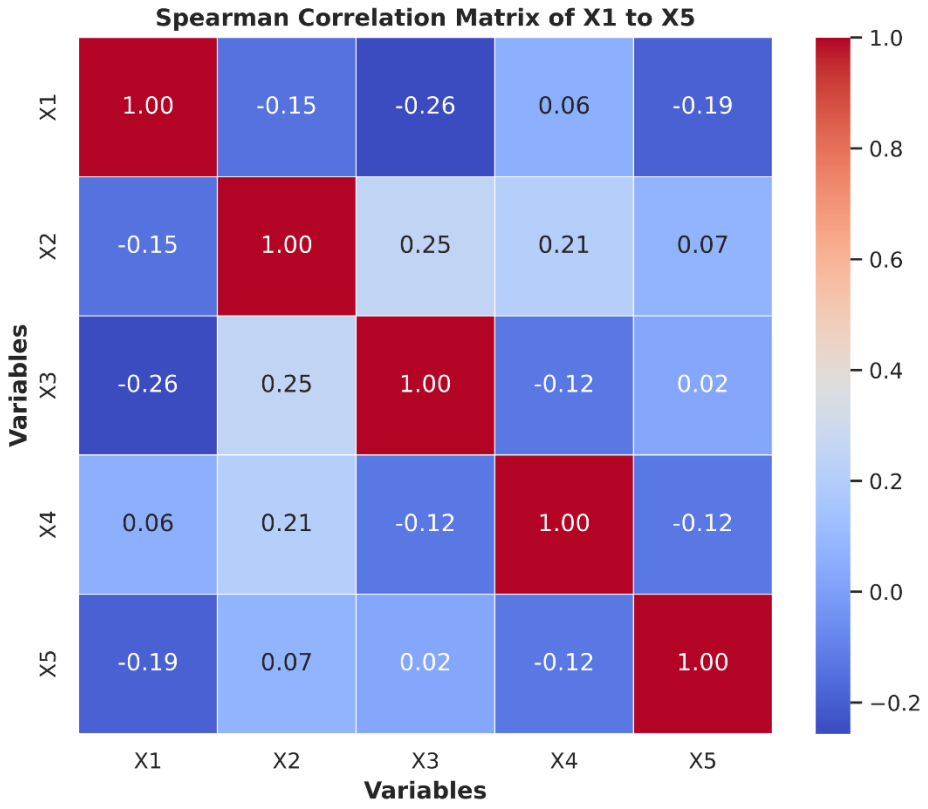


Figure IV. 5. Matrice de Corrélation de Spearman

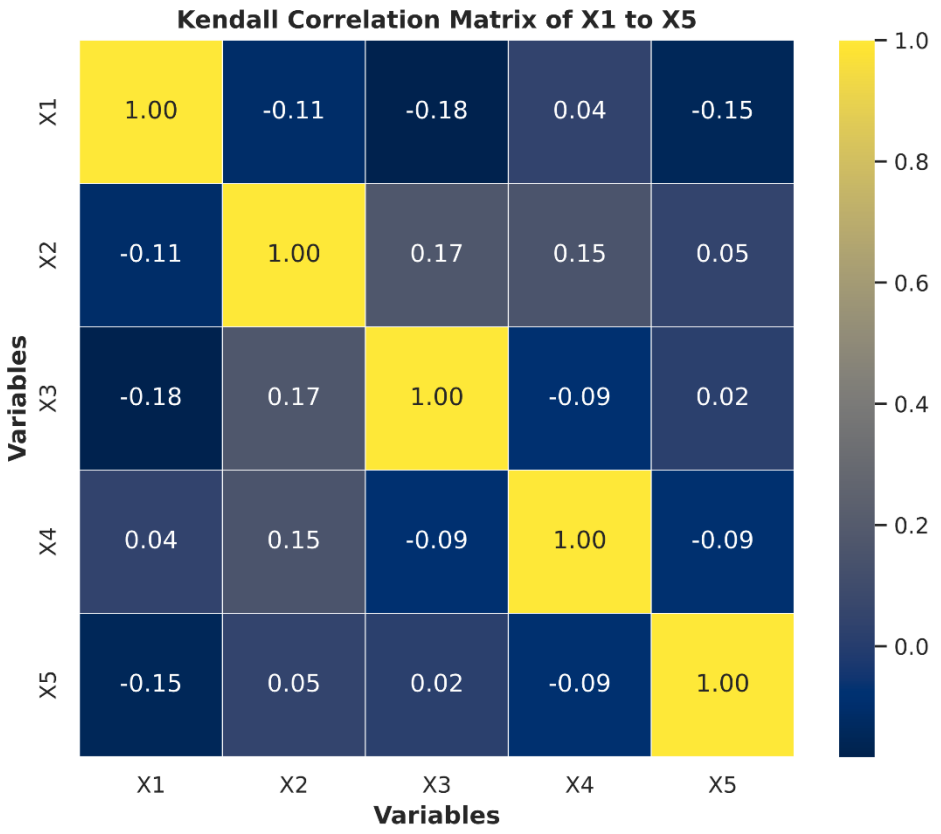


Figure IV. 6. Matrice de corrélation de Kendall

IV.1.2.2. Outil de Modélisation 3D : SketchUp

La modélisation géométrique détaillée de la géométrie du bâtiment étudié constitue une étape clef dans le processus de simulation. Dans cette étude, le modèle 3D a été réalisé avec le logiciel SketchUp qui est un outil de dessin en 3D. SketchUp offre une interface intuitive pour construire des volumes simples puis les assembler afin de représenter l'architecture du bâtiment (**Sghiouri et al., 2020**). Une bibliothèque de composants permet également d'insérer rapidement des éléments de construction standards tels que des portes, fenêtres, murs ou toitures. La **Figure IV.7** présente le modèle 3D du bâtiment, identique à celui décrit dans le chapitre 3 avec les mêmes caractéristiques. Une fois la géométrie 3D finalisée sur SketchUp, celle-ci a été importée dans le logiciel TRNSYS via un plugin dédié nommé TRNSYS3D. Ce plugin permet un transfert automatisé du modèle 3D vers la simulation thermique dynamique.

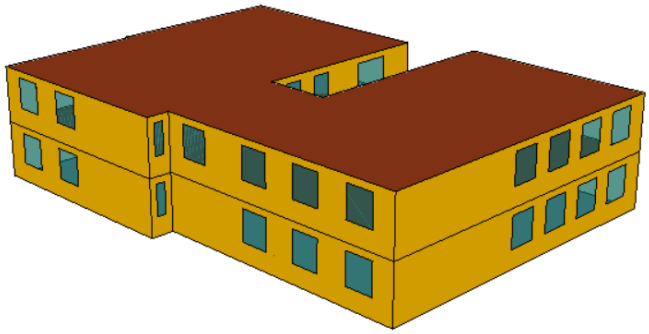


Figure IV. 7. Modèle 3D pour la simulation.

L'association du logiciel SketchUp pour la géométrie et de BINAYATE pour les données des matériaux constituent une approche efficace pour modéliser précisément le bâtiment à simuler. Le transfert vers TRNSYS3D assure ensuite l'interopérabilité avec le moteur de calcul thermique dynamique TRNSYS. Cette méthodologie permet à la fois de représenter finement la géométrie complexe du bâtiment et d'intégrer des propriétés thermophysiques réalistes pour les parois selon les pratiques constructives locales. Le niveau de détail du modèle 3D est un paramètre important pour assurer la précision globale de la simulation.

IV.1.2.3. Outil de simulation : TRNSYS

Dans ce chapitre nous avons utilisé l'outil de simulation TRNSYS. Le logiciel TRNSYS est conçu pour la simulation thermique dynamique des bâtiments et a été développé au Solar Energy Laboratory de l'Université de Madison, USA en 1975. Le logiciel est principalement utilisé par les ingénieurs et chercheurs dans le monde entier pour évaluer et étudier de nouveaux concepts énergétiques pour les bâtiments, en fonction de leur emplacement, méthode de construction ou architecture. L'approche modulaire du logiciel TRNSYS emploie une méthodologie de diagramme de blocs, qui facilite la décomposition de problèmes complexes en problèmes plus simples, tout en fournissant un environnement ouvert qui permet d'ajouter de nouveaux concepts et composants. Le logiciel est compatible avec tous les langages de programmation courants et peut être intégré à divers autres programmes, tels que Excel, MATLAB et COMIS, pour le pré-traitement et le post-traitement ou les appels interactifs pendant la simulation.

Un modèle de simulation nécessite divers types de modèles sur TRNSYS. **La figure IV.8** montre le modèle de simulation que nous avons construit sur TRNSYS et utilisé pour les simulations. Le modèle TRNSYS : Type 15 est utilisé pour obtenir les données météorologiques, où le type 15 lit les données à intervalles réguliers à partir d'un fichier de données météorologiques externe, interpole les données et les met à disposition d'autres composants TRNSYS. Les données comprennent le rayonnement solaire pour les surfaces inclinées, et le modèle calcule plusieurs termes utiles, tels que la température effective du ciel, les fonctions de forçage pour les saisons de chauffage et de refroidissement. De plus, le modèle TRNSYS : Type 77 est utilisé pour modéliser la distribution verticale de la température du sol. Le modèle prend en compte plusieurs facteurs tels que la température moyenne de la surface du sol pour l'année, l'amplitude de la température de surface du sol pour l'année, la différence

de temps entre le début de l'année civile et l'occurrence de la température minimale de surface pour l'année, la différence de temps entre le début de l'année civile et l'occurrence de la température maximale de surface.

Le modèle Type 56 modélise le comportement thermique d'un bâtiment divisé en différentes zones de température, en utilisant des fichiers externes générés par le programme de pré-traitement appelé TRNBuild. Le Type 9 est utilisé pour contrôler les protections solaires externes, tandis que le Type 24 intègre une série de quantités sur une période de temps, avec jusqu'à 500 entrées. Le Type 25 est utilisé pour imprimer des variables systèmes sélectionnés à des intervalles de temps spécifiés, et le Type 25c exclut les descripteurs d'unités dans le fichier de sortie. Enfin, les calculateurs permettent des opérations simples sur les variables, y compris des additions, des multiplications et une sélection maximale.Une description détaillée de chaque modèle de composant TRNSYS est fournie dans le manuel TRNSYS (**Klein, 2010**).

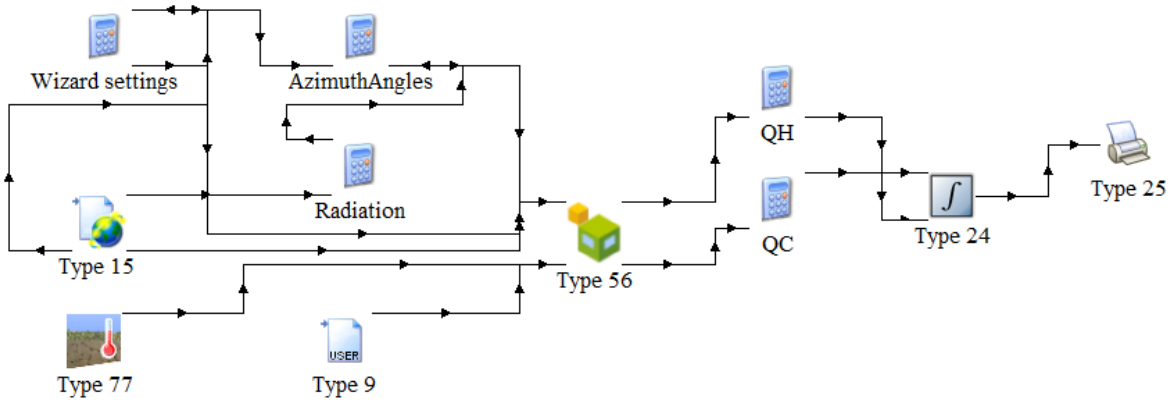


Figure IV. 8. Modèle de simulation sur TRNSYS

IV.1.2.4. Charges de chauffage (QH) et climatisation (QC)

Pour obtenir les charges de chauffages et de refroidissements, nous avons effectué 50 simulations en utilisant l'échantillonnage LHS. **Le tableau IV.2**, la **Figure VI.9 et la figure VI.10** montrent les résultats obtenus pour les charges de chauffage et de climatisation pour chaque simulation. La Figure IV.10 montre les histogrammes de de QH et QC. Les besoins de chauffage QH et de climatisation QC simulés présentent certaines différences statistiques.

Concernant la variable QH représentant les consommations de chauffage, on observe une variabilité plus élevée avec un écart-type de 3,24 kWh/m^2. Cette dispersion plus importante des valeurs autour de la moyenne peut suggérer une plus grande sensibilité de QH sur les variations des Xi.

En ce qui concerne la variable QC de climatisation, la distribution statistique des résultats de simulation est plus resserrée avec un écart-type de 2,73 kWh/m^2. Cette moindre dispersion traduit une variabilité plus faible dans les estimations de QC. De plus, la distribution est quasiment symétrique. Cette distribution plus uniforme suggère que QC est moins affectée par des valeurs des Xi extrêmes ($X_{i\,min}$ ou $X_{i\,max}$) contrairement à QH.

Tableau IV. 2. Résultats des simulations obtenus sur TRNSYS : QH et QC

Simulation	X1	X2	X3	X4	X5	QH	QC
1	4.4	11.9	4.6	0.6	0.8	8.6	32.9
2	8.6	8.6	8.8	0.4	0.3	7.4	32.7
3	7.9	9.5	1.6	0.5	0.8	11.9	27.0
4	11.0	3.1	7.1	0.2	0.2	12.1	27.3
5	4.2	6.2	5.3	0.8	0.2	10.3	30.5
…	…	…	…	…	…	…	…
46	4.9	3.8	4.2	0.3	0.7	11.9	32.2
47	7.1	11.7	9.5	0.2	0.7	7.0	33.8
48	5.3	10.6	9.3	0.5	0.3	7.7	32.7
49	1.1	6.4	8.6	0.8	0.4	11.0	34.4
50	11.7	5.7	3.1	0.5	0.2	11.0	26.6

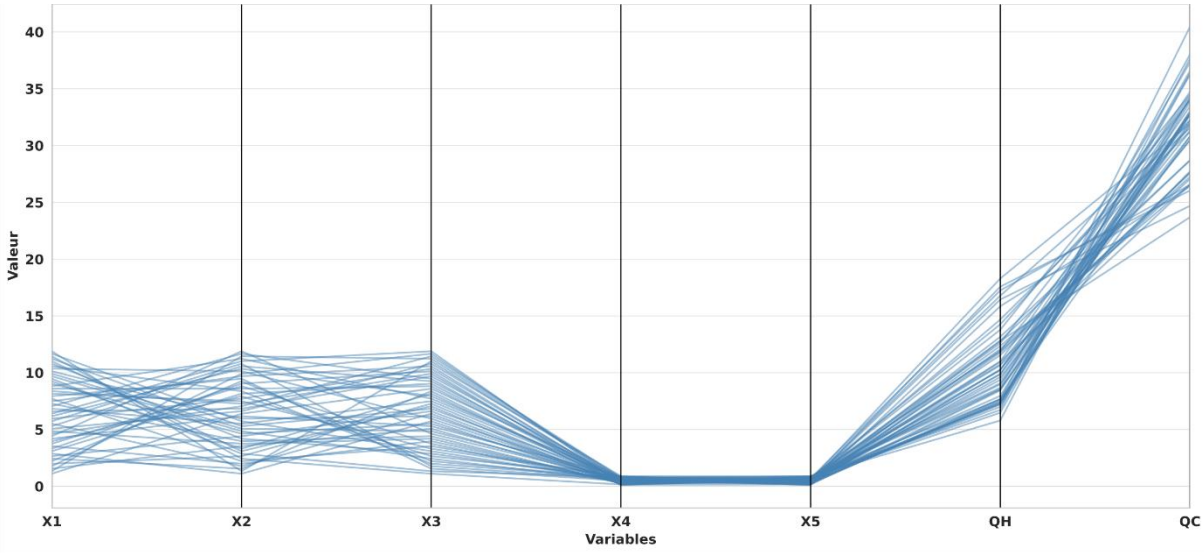


Figure IV. 9. Charge de Chauffage (QH) et charge de climatisation (QC)

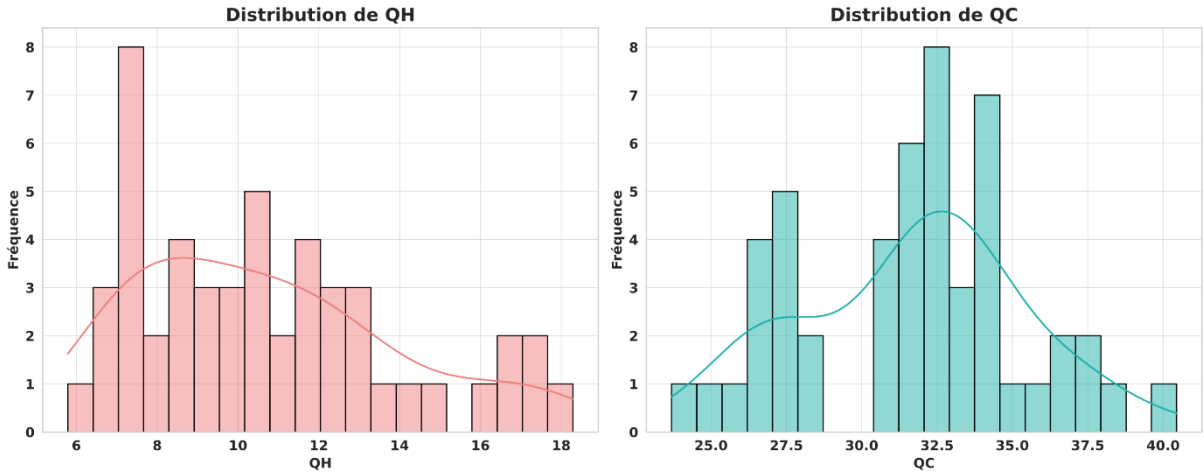


Figure IV. 10. Histogrammes de QH et QC

IV.1.3. Définition et entrainement des modèles

La prédiction des besoins énergétiques de chauffage et de climatisation du bâtiment constitue un enjeu central de ce travail de recherche. Il s'agit de pouvoir prédire de manière fiable les consommations nécessaires pour assurer le confort thermique intérieur, en fonction de paramètres clefs liés à l'enveloppe du bâtiment. Diverses méthodes mathématiques permettent d'approcher une variable de sortie, dans notre cas les besoins thermiques, à partir d'un certain nombre de variables d'entrée. Les techniques de régression constituent une approche répandue dans ce domaine. Le principe est d'ajuster une fonction mathématique reliant les variables d'entrée et la variable de sortie de façon à minimiser l'écart entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs simulées.

Dans notre étude, deux types de modèles de régression polynomiale ont été testés : un modèle linéaire (L1) et un modèle quadratique (L2). Le modèle linéaire (L1) suppose une relation linéaire entre la variable de sortie Y (les besoins thermiques) et les différentes variables d'entrée xi (les paramètres de l'enveloppe). Les coefficients βi sont déterminés par régression linéaire et permettent d'exprimer la contribution relative de chaque variable dans le modèle. Bien que simpliste, cette approche linéaire peut fournir une première approximation acceptable dans certains cas. Néanmoins, les interactions entre variables ainsi que les effets non-linéaires ne sont pas pris en compte. C'est pourquoi le modèle quadratique (2) a également été testé. Celui-ci intègre des termes croisés ($\beta_{ij}\, x_i\, x_j$) pour représenter les interactions entre variables ainsi que des termes quadratiques ($\beta_{ii}\, {x_i}^2$) pour capturer d'éventuelles non-linéarités (**Chlela et al., 2009**).

Modèle linéaire (L1) :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i . x_i$$

Modèle quadratique (L2) :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i . x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \beta_{ij} . x_i . x_j + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} . {x_i}^2$$

Les deux modèles ont été développés sur la base de 5 paramètres liés à l'enveloppe du bâtiment (n = 5) : épaisseurs d'isolation des murs, toiture et plancher ainsi que coefficients d'absorption solaire de la toiture et des murs. Les coefficients β_i, β_{ij} et β_{ii} ont été déterminés par régression polynomiale à partir des données générées par échantillonnage hypercube latin (cf. Tableau IV.2). L'objectif de ce méta-modèle polynomial est double : d'une part prédire de façon fiable les besoins thermiques en fonction des variables d'entrée x_i et d'autre part fournir une information sur les variables les plus influentes via l'analyse des coefficients de régression. En effet, plus le coefficient associé à une variable sera élevé, plus celle-ci impactera les consommations énergétiques.

Afin de déterminer le modèle le plus performant entre L1 et L2, diverses métriques statistiques ont été calculées (**Zuan et al., 2019**). Le coefficient de détermination R^2 permet d'évaluer la qualité de l'ajustement. Un R^2 proche de 1 indique que la majorité de la variance des besoins thermiques est expliquée par le modèle. L'erreur quadratique moyenne (MSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE) donnent une indication sur l'écart entre les valeurs prédites et observées. On cherchera à minimiser ces erreurs pour obtenir une bonne précision du modèle.

Les formules suivantes ont été utilisées, où y_i et y'_i représentent respectivement la valeur observée et la valeur prédite.

Coefficient de détermination (R^2) :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y'_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}$$

Erreur quadratique moyenne (MSE) :

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - y'_i)^2$$

Erreur absolue moyenne (MAE) :

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - y'_i|$$

- **Calcul des coefficients des polynômes**

Pour obtenir les coefficients des modèles de régression polynomiale, une matrice est souvent construite à partir des données, et la solution est obtenue en résolvant un système d'équations linéaires. La matrice de conception X est construite où chaque ligne représente une observation (simulation) et chaque colonne représente une variable d'entrée. Une colonne supplémentaire de 1 est ajoutée pour le terme d'interception (β_0). Ainsi, pour m observations (simulations) et n variables, la matrice X sera de dimension $m \times (n+1)$.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Le vecteur y des valeurs observées est :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}$$

L'équation peut s'écrire : $y = X\beta + \epsilon$. Les coefficients β sont obtenus en résolvant l'équation suivante :

$$(X^T X)\beta = X^T y$$

où X^T est la transposée de X. Les coefficients β sont alors donnés par :

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y$$

Les coefficients β_i, β_{ij}, et β_{ii} sont calculés pour minimiser l'erreur entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs simulées obtenues à partir des données. Les coefficients β_i sont généralement obtenus en utilisant la méthode des moindres carrés, qui consiste à minimiser la somme des carrés des résidus (la différence entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle). Mathématiquement, cela est souvent écrit comme (**Ciulla & D'Amico, 2019**) :

$$\min \sum_{k=1}^{m} \left(y_k - \left(\beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_{i,k} \right) \right)^2$$

Pour le modèle quadratique, l'expression à minimiser est similaire à celle du modèle linéaire, mais avec l'ajout des termes quadratiques et des termes croisés :

$$\min \sum_{k=1}^{m} \left(Y_k - \left(\beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_{i,k} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \beta_{ij} x_{i,k} x_{j,k} + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} x_{i,k}^2 \right) \right)^2$$

La résolution de ce système d'équation peut être effectuée à l'aide de logiciels de calcul numérique tels que MATLAB ou Python. Nous avons utilisé Python.

IV.2. Résultats et discussion

IV.2.1. Modèles linéaires

IV.2.1.1. Polynômes et sensibilité des paramètres

Le Tableau IV.3 liste les coefficients des polynômes des modèles linéaires. La formule pour calculer QH est :

$$QH = 23.3297 - 33.7342 \cdot x_1 - 67.0524 \cdot x_2 - 47.9806 \cdot x_3 - 2.3462 \cdot x_4 - 3.8045 \cdot x_5$$

Pour QC :

$$QC = 19.4238 + 1.1691 \cdot x_1 + 1.9657 \cdot x_2 + 78.8764 \cdot x_3 + 3.6425 \cdot x_4 + 10.3980 \cdot x_5$$

- **Pour la charge de chauffage QH**

L'analyse des coefficients de régression indique que l'isolation thermique du bâtiment ainsi que les propriétés d'absorption des matériaux de construction ont un impact significatif sur la charge de chauffage. Tous les coefficients sont négatifs, ce qui suggère que l'augmentation des valeurs des paramètres d'isolation et des coefficients d'absorption est généralement associée à une

réduction de la charge de chauffage. Les coefficients associés à l'épaisseur de l'isolation ont un impact plus important sur la charge de chauffage que les coefficients d'absorption, suggérant que l'isolation est un facteur plus critique pour la conservation de la chaleur. La Figure IV.11 montre l'importance de chaque paramètre en fonction du coefficient.

- **Pour la charge de climatisation QC**

L'analyse des coefficients de régression (voir figure IV.12) révèle que l'isolation du plancher sur le sol (*X3*) a l'impact le plus significatif sur la charge de climatisation, avec un coefficient de 78,8764. Une augmentation de l'épaisseur d'isolation du plancher entraîne donc une hausse substantielle de la climatisation requise. Cela s'explique par le fait qu'une meilleure isolation du sol empêche l'évacuation de la chaleur accumulée à l'intérieur vers l'extérieur, nécessitant plus de climatisation. Dans une moindre mesure, on observe le même effet pour l'isolation des murs (*X1*) et du toit (*X2*). Les propriétés d'absorption influent aussi sur la climatisation, en particulier l'absorption des murs (*X5*) qui a un impact notable.

❖ **Analyse critique :**

- Concernant la magnitude des coefficients, les signes sont cohérents pour QH (négatifs) et QC (positifs), montrant des relations inverses ou directes logiques.
- On constate des différences dans les impacts relatifs des variables selon le modèle QH ou QC. Cela peut s'expliquer par les mécanismes différents du chauffage et de la climatisation, mais demande une analyse approfondie.
- L'interprétation des coefficients positifs pour QC mérite réflexion. Dans certains climats, une meilleure isolation devrait réduire la climatisation requise. Le contexte climatique précis est important.
- D'autres variables non incluses comme la température, l'humidité, les propriétés des fenêtres, etc. peuvent aussi affecter les charges QH et QC. Les modèles sont limités aux variables considérées.

Tableau IV. 3. Coefficients des modèles linéaires pour le chauffage et climatisation

Coefficients	**Modèle linéaire**	
	Chauffage : QH éq. L1	**Climatisation : QC éq. L1**
$\boldsymbol{\beta_0}$	23.3297	19.4238
$\boldsymbol{\beta_1}$	-33.7342	1.1691
$\boldsymbol{\beta_2}$	-67.0524	1.9657

$\boldsymbol{\beta_3}$	-47.9806	78.8764
$\boldsymbol{\beta_4}$	-2.3462	3.6425
$\boldsymbol{\beta_5}$	-3.8045	10.3980

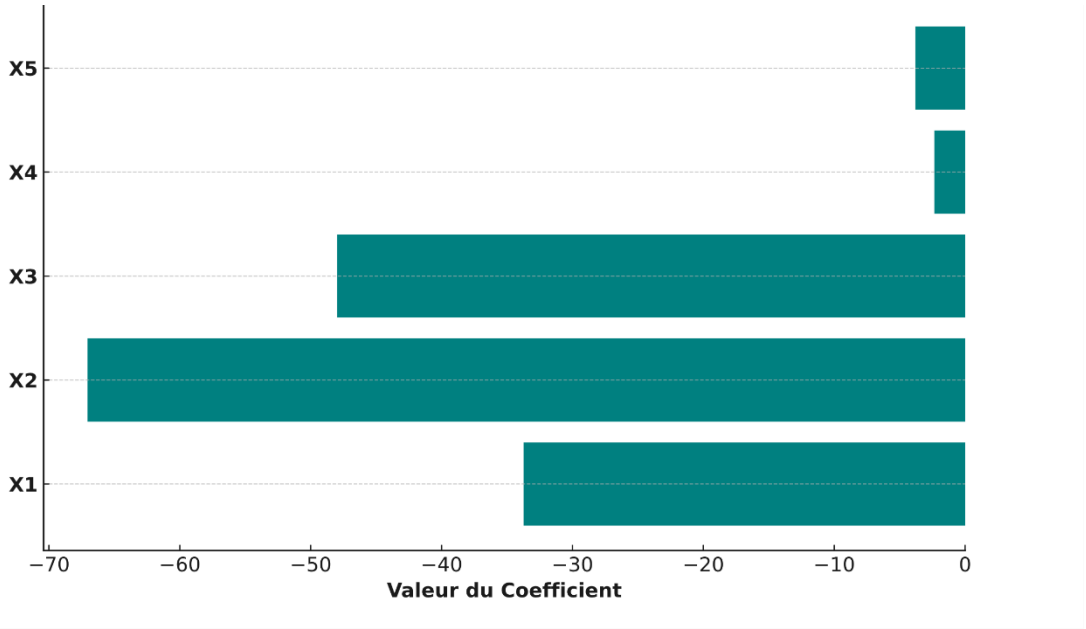


Figure IV. 11. Sensibilité des paramètres du modèle de chauffage (L1 QH)

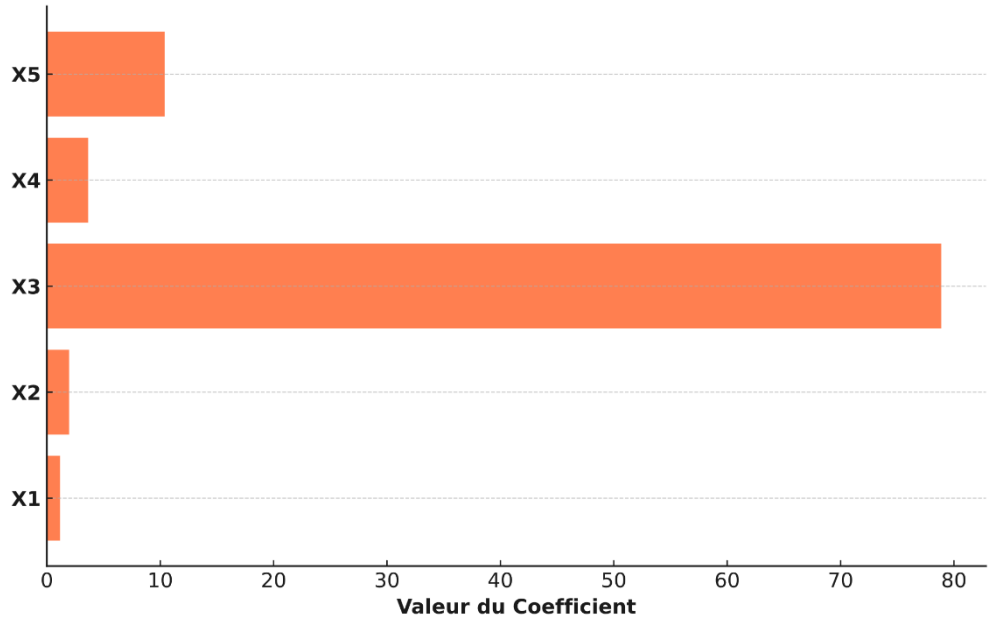


Figure IV. 12. Sensibilité des paramètres du modèle linéaire (L1QC)

IV.2.1.2. Prédiction de la charge de chauffage et climatisation : Modèle linéaire

Les **Figures IV. 13, IV. 14, IV. 15 et IV. 16** montrent une comparaison visuelle entre les valeurs prédites par le modèle (MODEL) et les valeurs simulées (TRNSYS) dans les phases d'entraînement (37 simulations, 75%) et de test (13 simulations, 25%). Dans chaque graphique, la droite rouge $y = x$ sert de référence pour une prédiction parfaite.

Dans les deux phases, on observe une corrélation générale entre les valeurs prédites et simulées, avec le nombre de points proches de la droite de référence. Ceci indique que le modèle parvient à faire des prédictions relativement justes. Cependant, on constate aussi des écarts importants entre prédictions et valeurs simulées, montrant les limites et imprécisions du modèle. Ces écarts sont présents à la fois en entraînement et en test. Les performances semblent similaires entre les deux phases. Le modèle ne se dégrade pas en généralisant à de nouvelles données de test. Mais les erreurs persistent.

La Table IV.4 montre les valeurs des métriques. En phase d'entraînement, les valeurs de R^2 sont similaires et relativement élevées (environ 0,79) pour les charges QH et QC. Ceci indique une bonne corrélation entre les valeurs prédites et simulées durant cette phase. Cependant, les valeurs de MSE et MAE non négligeables montrent que des erreurs subsistent dans les prédictions du modèle en entraînement. En phase de test, on constate une baisse du R^2 pour QH (0,56 vs 0,79), signe d'une dégradation des performances en généralisation. Le R^2 reste stable

pour QC. Les MSE et MAE augmentent en test pour QH, traduisant des erreurs plus grandes par rapport à la phase d'entraînement.

Globalement, le modèle semble mieux prédire QC que QH sur les données de test. Mais dans les deux cas, les métriques montrent des limites en termes de précision.

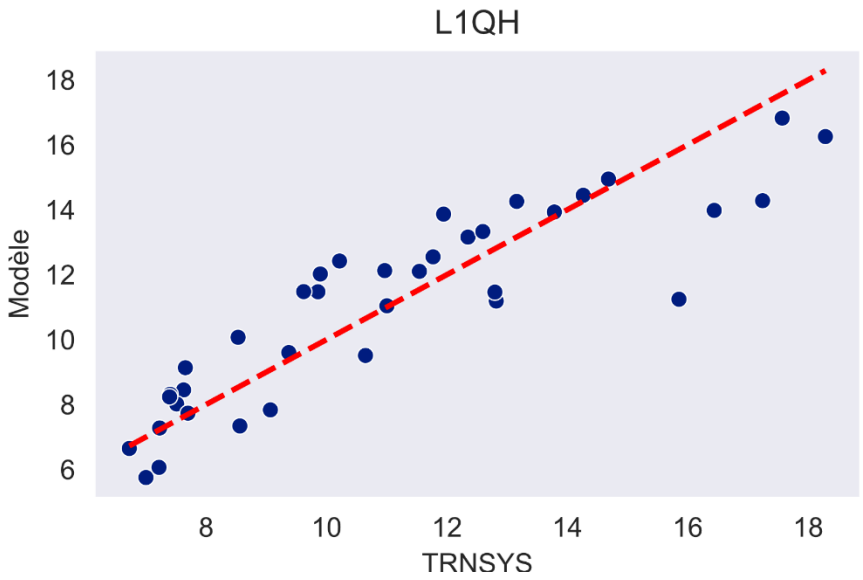


Figure IV. 13. Phase d'entrainement du model L1QH

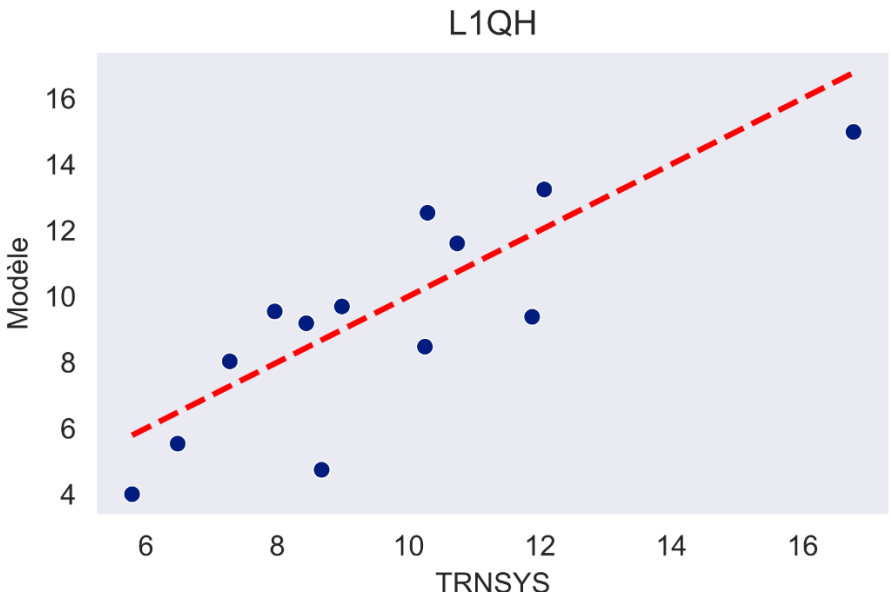


Figure IV. 14. Phase du test du model L1QH

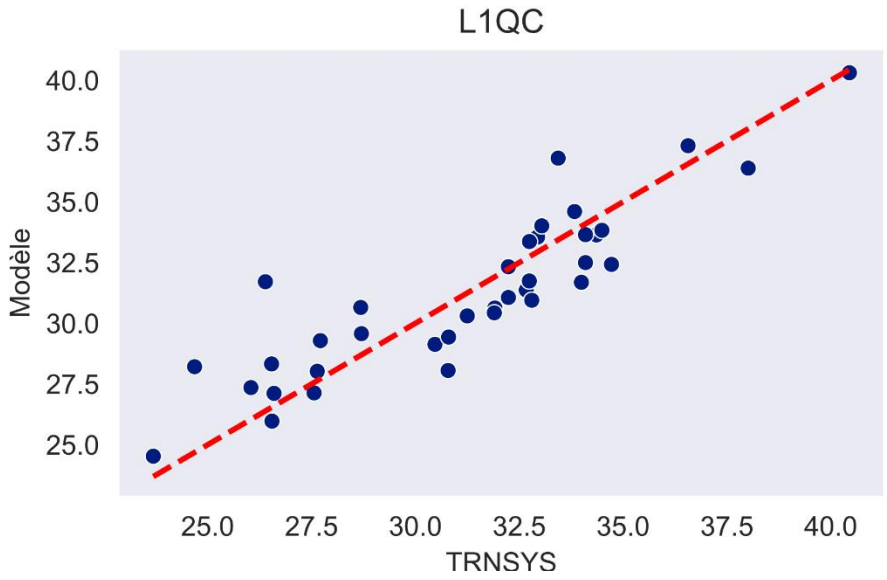


Figure IV. 15. Phase d'entrainement du model L1QC

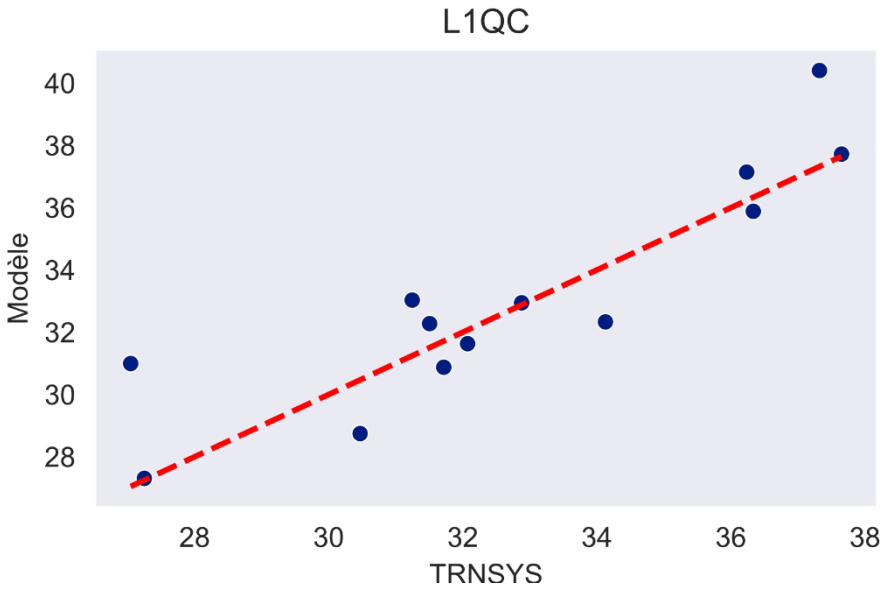


Figure IV. 16. Phase de test du model L1QC

Tableau IV. 4. Évaluation de la précision des modèles linéaires

		Phase d'entrainement			Phase de test		
Charge	Model	R^2	MSE	MAE	R^2	MSE	MAE
QH	L1QH	0.789	2.255	1.182	0.564	3.344	1.600
QC	L1QC	0.788	2.942	1.366	0.745	2.847	1.226

IV.2.2. Modèles quadratiques

Les Tableaux IV.5 et IV.6 listent les coefficients des polynômes des modèles quadratiques. La formule pour calculer QH est :

$$\begin{aligned}\boldsymbol{QH} = \mathbf{35.16} \\ &\mathbf{-173.28x_1 - 212.67x_2 - 198.54x_3 - 5.32x_4 - 5.67x_5} \\ &\mathbf{+715.10x_1^2 + 1043.55x_2^2 + 1118.43x_3^2 + 0.01x_4^2 - 1.11x_5^2} \\ &\mathbf{+7.12x_1x_2 + 69.12x_1x_3 + 42.36x_1x_4 + 37.62x_1x_5} \\ &\mathbf{-91.26x_2x_3 + 15.68x_2x_4 + 27.36x_2x_5} \\ &\mathbf{+19.32x_3x_4 + 11.88x_3x_5} \\ &\mathbf{-2.19x_4x_5}\end{aligned}$$

La formule pour calculer QC est :

$$\begin{aligned}\boldsymbol{QC} = \mathbf{6.34} \\ &\mathbf{+120.68x_1 + 40.19x_2 + 249.00x_3 + 4.87x_4 + 23.00x_5} \\ &\mathbf{-465.40x_1^2 - 79.35x_2^2 - 1483.05x_3^2 + 3.02x_4^2 - 3.61x_5^2} \\ &\mathbf{+165.40x_1x_2 + 67.42x_1x_3 - 69.88x_1x_4 - 46.66x_1x_5} \\ &\mathbf{+192.05x_2x_3 + 7.74x_2x_4 - 109.00x_2x_5} \\ &\mathbf{+0.76x_3x_4 + 7.42x_3x_5} \\ &\mathbf{+1.83x_4x_5}\end{aligned}$$

Les Figures IV.17, IV.18, IV.19 et IV.20 montrent une comparaison entre les valeurs simulées (TRNSYS) et les valeurs prédites (Modèle) pour chaque phase et chaque modèle. Les graphiques incluent également une ligne rouge représentant la relation idéale $y = x$, où les valeurs prédites correspondent exactement aux valeurs simulées. Le Tableau IV.7 montre l'évaluation de la précision des modèles quadratiques.

Globalement, les modèles quadratiques donnent des meilleures prédictions avec une bonne correspondance entre valeurs prédites (Modèle) et simulées (TRNSYS). Les points sont proches de la ligne $y = x$. Les coefficients R^2 élevés confirment les bonnes performances des modèles quadratiques. Les valeurs de MSE et MAE sont assez basses, indiquant de petites erreurs entre les valeurs prédites et les valeurs simulées.

Les performances sont bonnes sur les phases d'entraînement et de test des modèles à la fois pour le chauffage (QH) et la climatisation (QC). Sur la phase du teste quelques points sont un peu éloignés de $y = x$ mais la majorité montre une très bonne prédiction.

Tableau IV. 5. Coefficients du modèle quadratique pour le chauffage

Coefficients	Modèle L2QH		
β_0	35.16	β_{22}	1043.55
β_1	-173.28		
β_2	-212.67	β_{23}	-91.26
β_3	-198.54	β_{24}	15.68
β_4	-5.32	β_{25}	27.36
β_5	-5.67	β_{33}	1118.43
β_{11}	715.10	β_{34}	19.32
β_{12}	7.12	β_{35}	11.88
β_{13}	69.12	β_{44}	0.01
β_{14}	42.36	β_{45}	-2.19
β_{15}	37.62	β_{55}	-1.11

Tableau IV. 6. Coefficients du modèle quadratique pour la climatisation

Coefficients	Modèle L2QC		
β_0	6.34	β_{22}	-79.35
β_1	120.68		
β_2	40.19	β_{23}	192.05
β_3	249.00	β_{24}	7.74
β_4	4.87	β_{25}	-109.00
β_5	23.00	β_{33}	-1483.05
β_{11}	-465.40	β_{34}	0.76
β_{12}	165.40	β_{35}	7.42
β_{13}	67.42	β_{44}	3.02
β_{14}	-69.88	β_{45}	1.83
β_{15}	-46.66	β_{55}	-3.61

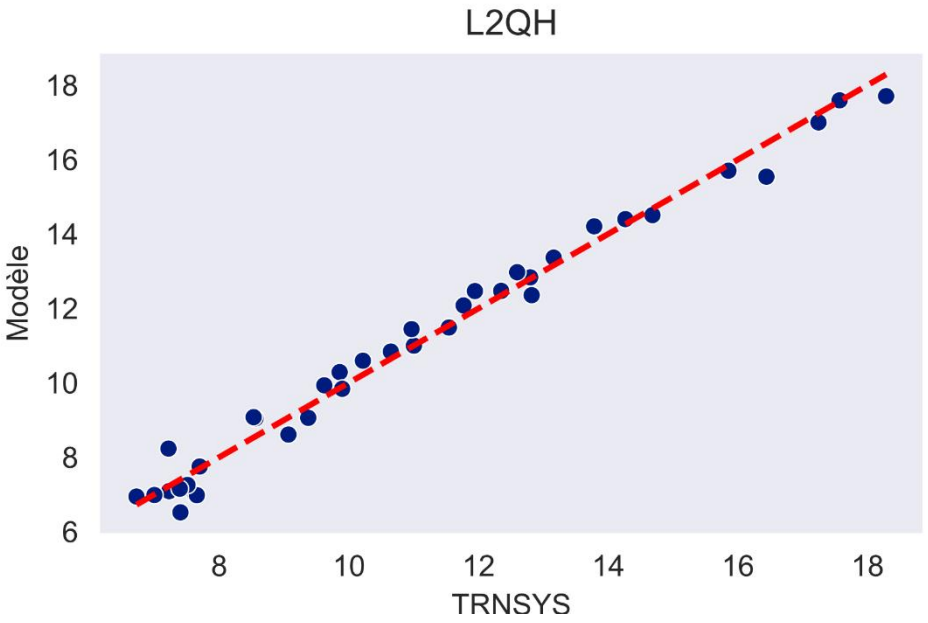


Figure IV. 17. Phase d'entrainement du model L2QH

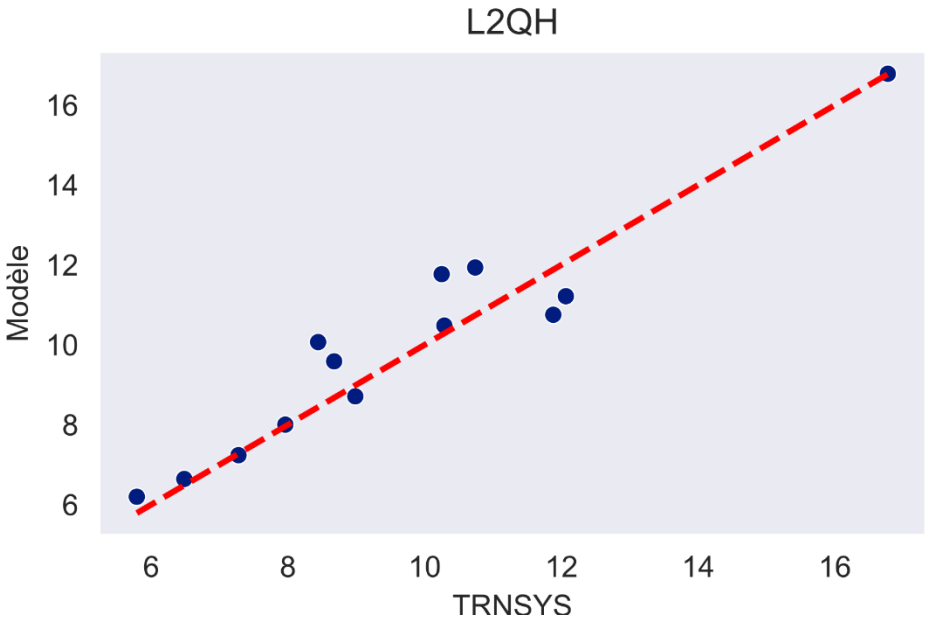


Figure IV. 18. Phase de test du model L2QH

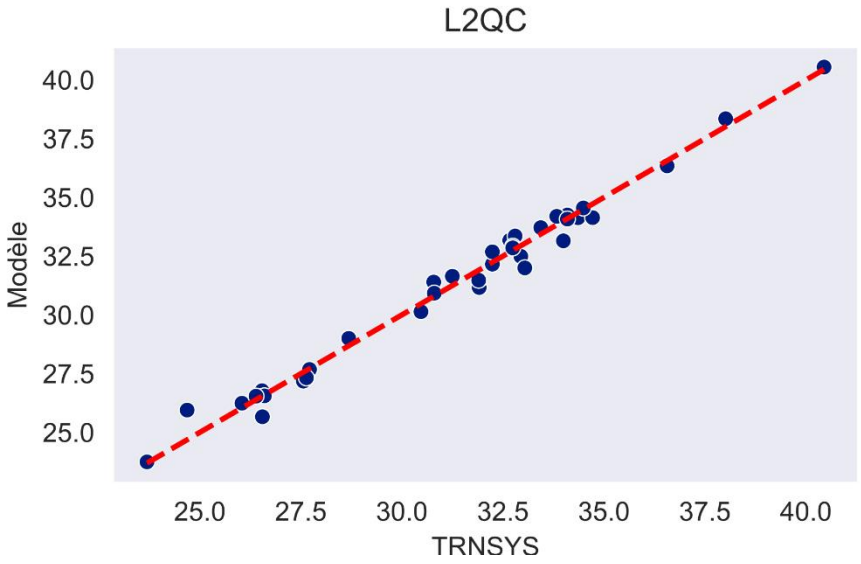


Figure IV. 19. Phase d'entrainement du model L2QC

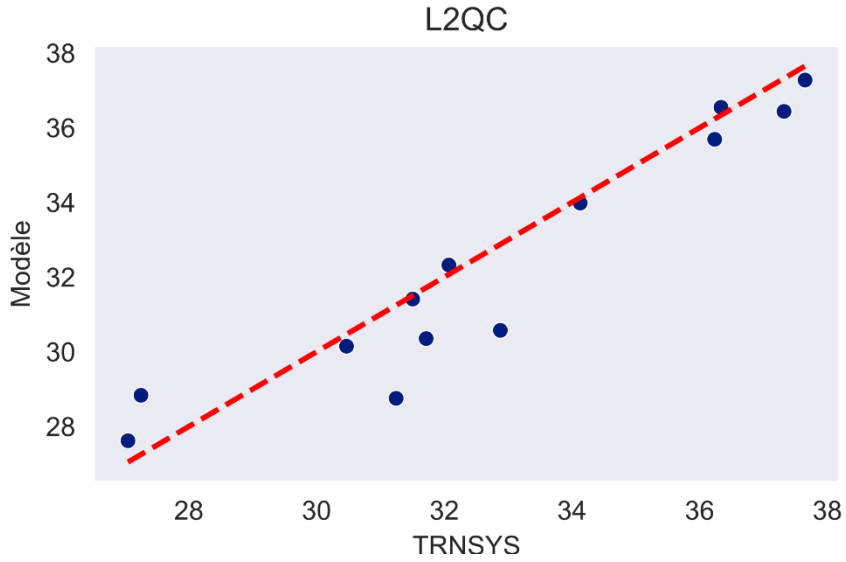


Figure IV. 20. Phase de test du model L2QC

Tableau IV. 7. Évaluation de la précision des modèles quadratiques

		Phase d'entrainement			Phase de test		
Charge	Model	R^2	MSE	MAE	R^2	MSE	MAE
QH	L2QH	0.983	0.179	0.338	0.905	0.732	0.642
QC	L2QC	0.985	0.214	0.359	0.878	1.36	0.858

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté l'application de la régression polynomiale pour la prédiction des besoins énergétiques de chauffage et de climatisation d'un bâtiment public au Maroc. Les modèles développés ont permis d'établir des relations mathématiques entre cinq paramètres clefs de l'enveloppe et les consommations thermiques simulées. L'approche par échantillonnage hypercube latin a généré un ensemble de données représentatif pour entraîner et tester les modèles. Les résultats ont montré la supériorité du modèle quadratique par rapport au modèle linéaire, avec des coefficients de détermination R^2 supérieurs à 0,9 et de faibles erreurs de prédiction.

La régression polynomiale permet de visualiser de manière plus intuitive la relation entre les variables et les besoins énergétiques. Ainsi elle permet au gestionnaire de projet de savoir sur quel point agir et sur quel point ne pas agir, afin d'orienter et d'optimiser ses simulations. L'analyse des coefficients a mis en évidence l'influence prépondérante de l'isolation thermique sur les besoins de chauffage et de climatisation.

Cette étude valide le potentiel des méta-modèles polynomiaux pour approcher rapidement et avec précision le comportement énergétique des bâtiments. Leur intégration dans un processus d'optimisation pourrait permettre d'identifier des solutions optimales pour l'enveloppe. Des développements futurs pourraient enrichir les modèles avec davantage de paramètres tels que le vitrage, l'orientation et les systèmes de ventilation.

La rapidité de ce modèle se révèle particulièrement pertinente dans le contexte marocain, en tant que pays en voie de développement engagé dans des projets de construction ambitieux en parallèle. La capacité de ce modèle à traiter rapidement d'importantes quantités de données permet non seulement d'optimiser l'allocation des ressources humaines, mais aussi de remédier à des problèmes critiques souvent liés à des contraintes temporelles strictes. En facilitant des analyses et des recommandations quasi-instantanées, ce modèle représente une solution précieuse pour accélérer les processus décisionnels. Ainsi, il constitue un atout considérable pour les organismes impliqués dans la mise en œuvre des projets de construction publics.

Références du chapitre

Abdou, N., El Mghouchi, Y., Jraida, K., Hamdaoui, S., Hajou, A., & Mouqallid, M. (2022). Prediction and optimization of heating and cooling loads for low energy buildings in Morocco: An application of hybrid machine learning methods. Journal of Building Engineering, 61, 105332. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105332

Amiri, S., Mottahedi, M., & Asadi, S. (2015). Using multiple regression analysis to develop energy consumption indicators for commercial buildings in the U.S. Energy and Buildings, 109, 209–216.

Amber, K., Ahmad, R., Aslam, M., Kousar, A., Usman, M., & Khan, M. (2018). Intelligent techniques for forecasting electricity consumption of buildings. Energy.

Chlela, F., Husaunndee, A., Inard, C., & Riederer, P. (2009). A new methodology for the design of low energy buildings. Energy and Buildings, 41(9), 982–990.

Ciulla, G., & D'Amico, A. (2019). Building energy performance forecasting: A multiple linear regression approach. Applied Energy, 253, 113500.

Klein, S. A. (2010). TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA, 1, 1–5.

Lee, G., & Jeong, Y. (2017). Impact of Urban and Building Form and Microclimate on the Energy Consumption of Buildings - Based on Statistical Analysis-. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 16, 565–572. https://doi.org/10.3130/jaabe.16.565

8. Puth, M., Neuhäuser, M., & Ruxton, G. D. (2015). Effective use of Spearman's and Kendall's correlation coefficients for association between two measured traits. Animal Behaviour, 102, 77–84.

Romani, Z., Draoui, A., & Allard, F. (2015). Metamodeling the heating and cooling energy needs and simultaneous building envelope optimization for low energy building design in Morocco. Energy and Buildings, 102, 139–148.

Sghiouri, H., Charai, M., Mezrhab, A., & Karkri, M. (2020). Comparison of passive cooling techniques in reducing overheating of clay-straw building in semi-arid climate. Building Simulation, 13, 65–88.

Ying, X., Huangfu, F., & Tao, C. (2023). Low energy consumption form of the U-shaped plan office building in the Yangtze River Delta. Scientific Reports, 13, 11250.

Zuan, X., Xuehui, Z., Liequan, L., Zubing, F., Junwei, Y., & Dongmei, P. (2019). Forecasting performance comparison of two hybrid machine learning models for cooling load of a large-scale commercial building. Journal of Building Engineering, 21, 64–73. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.006

Conclusion Générale

Cette thèse se situe dans un contexte où l'efficacité énergétique des bâtiments publics au Maroc représente un enjeu crucial. À travers les différents chapitres, notre objectif était de concevoir des méthodes novatrices pour améliorer cette efficacité.

Le deuxième chapitre a mis l'accent sur une approche managériale visant à renforcer l'efficacité énergétique des bâtiments publics marocains, en se concentrant sur le processus de la maîtrise d'ouvrage déléguée. L'analyse détaillée de ce processus, appuyée par des entretiens avec des experts, a permis d'identifier des actions concrètes pour améliorer l'efficacité énergétique à différentes étapes.

Le troisième chapitre a abordé la performance et la conformité des bâtiments publics à la réglementation thermique du Maroc. Il a mis en lumière l'écart entre l'approche prescriptive et l'approche performancielle, soulignant les avantages de cette dernière. L'analyse a également souligné l'importance du ratio TGBV dans la conception énergétique des bâtiments, appelant à une révision de la réglementation avec plusieurs pistes d'améliorations.

Le quatrième chapitre a introduit l'application de la régression polynomiale pour la prédiction des besoins énergétiques de chauffage et de climatisation des bâtiments publics au Maroc. Les résultats ont démontré l'efficacité de cette approche et a annoncé son utilité dans l'optimisation des calculs.

En synthèse, cette thèse offre une vision holistique pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments publics au Maroc. En combinant des approches managériales, réglementaires et techniques, elle ouvre la voie à des solutions pratiques et efficaces. La recherche propose une perspective novatrice sur l'efficacité énergétique en explorant des approches non conventionnelles et en cherchant des moyens plus directs pour atteindre les objectifs fixés.

Les applications potentielles de ces résultats sont significatives. Cette étude peut être considérée comme un outil d'aide à la décision pour les parties prenantes impliquées dans le développement de l'efficacité énergétique du mécanisme de la maîtrise d'ouvrage déléguée, la révision de la réglementation, ainsi que la réévaluation des méthodes de calcul énergétique au sein des bureaux d'études techniques ou dans le processus de contrôle et d'optimisation de ces études.

De plus, ce travail constitue une étude documentaire enrichissante pour la compréhension du mécanisme de la maîtrise d'ouvrage, un domaine qui demeure largement méconnu et complexe pour les chercheurs, et qui est éclairé par la modélisation proposée dans cette recherche.

Les perspectives évoquées à travers chaque chapitre soulignent l'impératif de persévérer dans la recherche et les initiatives visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments publics au Maroc. Cela implique l'exploration de méthodes de gestion innovantes, l'amélioration de la réglementation thermique, et l'avancement de modèles plus sophistiqués pour une conception énergétique optimale de ces édifices.

Plus spécifiquement, il est recommandé de considérer des recherches futures qui envisagent une révision plus poussée du processus de maîtrise d'ouvrage déléguée, en mettant l'accent sur l'intégration de l'efficacité énergétique. Cette démarche pourrait impliquer une extension de

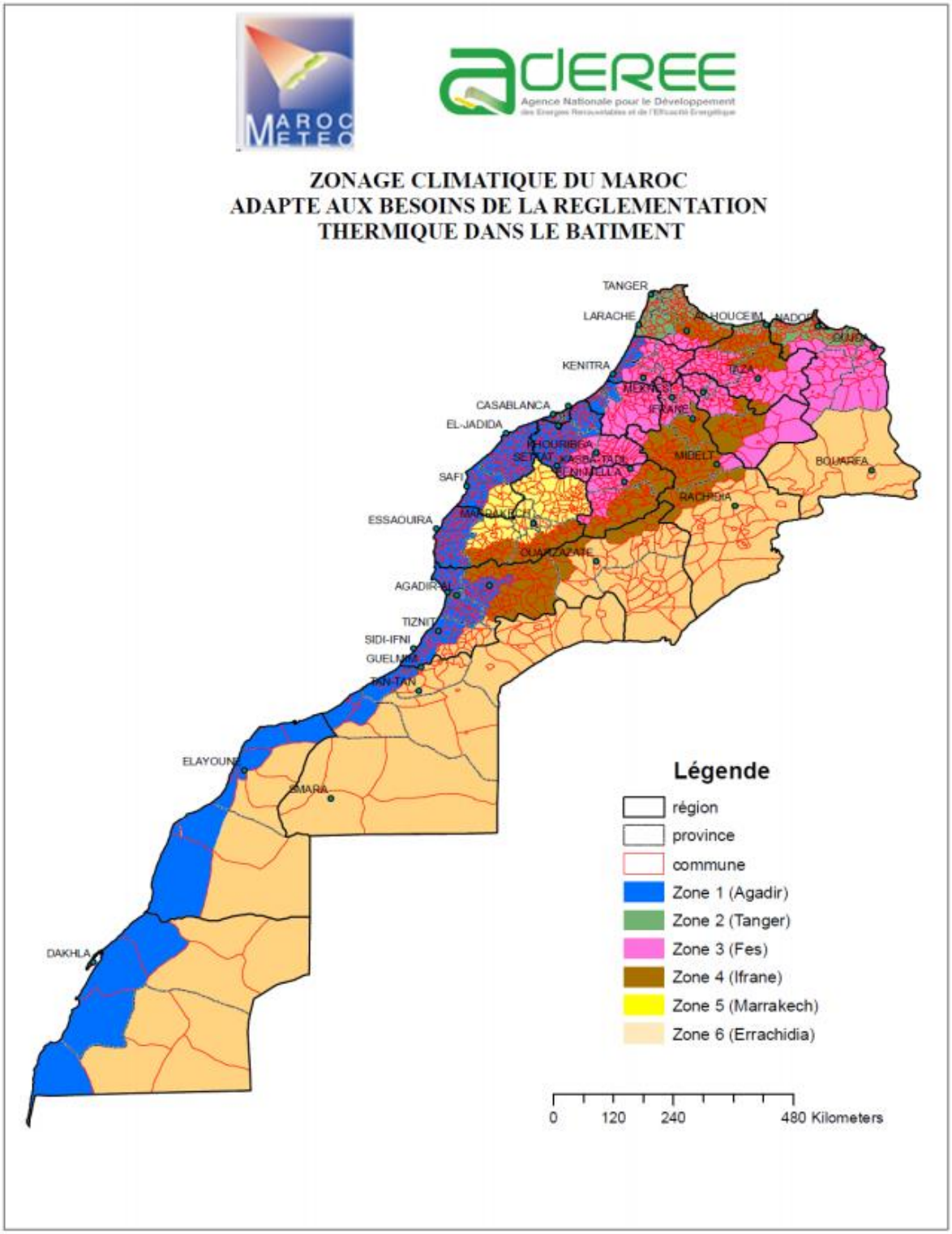
l'échantillon des experts consultés, en intégrant des spécialistes externes au processus ou en procédant à une restructuration du processus lui-même. Ce faisant, l'efficacité énergétique serait alors reconnue à sa juste valeur dans la satisfaction du maître d'ouvrage et de l'utilisateur, ainsi que dans le respect de l'environnement et des politiques publiques marocaines.

Il est également crucial de poursuivre la recherche en vue d'enrichir la réglementation thermique en intégrant un plus grand nombre de paramètres influents, favorisant ainsi une meilleure conception énergétique des bâtiments. Cela devrait s'accompagner d'une réflexion sur l'adaptation de la réglementation thermique des bâtiments au Maroc, afin d'obtenir une amélioration significative de l'efficacité énergétique.

Enfin, l'approfondissement des modèles de régression polynomiale en intégrant davantage de paramètres influents est recommandé. Cela permettra d'obtenir des prédictions encore plus précises des besoins énergétiques des bâtiments, renforçant ainsi l'efficacité des solutions proposées.

Annexes

Annexe n° 1 : Carte du zonage thermique du Maroc



Annexe n° 2 : Besoins spécifiques annuels de chauffage et de climatisation, en kWh/m^2/an- Secteur tertiaire.

Besoins spécifiques thermiques annuels maximaux de chauffage et de climatisation dans le secteur tertiaire en kWh/m^2/an				
	Écoles	Administrations	Hôpitaux	Hôtels
Agadir Z1	44	45	72	48
Tanger Z2	50	49	73	52
Fès Z3	61	49	68	66
Ifrane Z4	80	35	47	34
Marrakech Z5	65	56	92	88
Errachidia Z6	67	58	93	88

Annexe n° 3 : Coefficients maximaux de transmission thermique (U en W/m^2.K) - Secteur tertiaire.

Les exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques de l'enveloppe des bâtiments à usage de bureaux						
	Taux des baies vitrées TGBV	**U des toitures exposées (W/m².K)**	**U des murs extérieurs (W/m².K)**	**U des vitrages (W/m².K)**	**R minimale des planchers sur sol (m².K/W)**	**Facteur Solaire FS* des vitrages**
Zone climatique réglementaire Z1 (Réf. Agadir)	≤ 15 %	≤ 0,75	≤ 1,20	≤ 5,80	NE	NE
	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
Zone climatique réglementaire Z2 (Réf. Tanger)	≤ 15 %	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 5,80	NE	NE
	16-25 %	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,7
	26-35 %	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 3,30	NE	Nord : NE Autres : ≤ 0,5
	36-45 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 2,60	NE	Nord : ≤ 0,7 Autres : ≤ 0,3
Zone climatique réglementaire 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 %	≤ 0,55	≤ 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
Zone climatique réglementaire Z4 (Réf. Ifrane)	≤ 15 %	≤ 0,55	≤ 0,60	≤ 3,30	≥ 1,25	NR
	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
Zone climatique réglementaire Z5 (Réf. Marrakech)	≤ 15 %	≤ 0,65	≤ 0,80	≤ 3,30	≥ 1,00	NR
	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
Zone climatique réglementaire 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 n° 4 : Guide d'entretien

Interview – groupe A : les EXPERTS

Objectifs et éthique :

Dans le cadre d'une étude doctorale, une étude qualitative sur l'efficacité énergétique dans les bâtiments publics est menée à travers ce questionnaire. Il est adressé aux acteurs de la MO, MOD et MOE pour évaluer la présence de l'aspect Efficacité Énergétique dans les procédures d'élaboration des marchés publics.

Il s'agit d'explorer le processus de construction des bâtiments publics, partant de l'idée à la réalisation ; l'objectif est d'évaluer l'intégration de l'efficacité énergétique dans le bâtiment public en cours d'élaboration et de comprendre les obstacles et de proposer des solutions.

Ce n'est que grâce à votre participation que cette étude peut être menée.

Je porte à votre connaissance que vos réponses resteront anonymes et ne seront utiliser que pour la fin de recherche scientifique, aussi vos informations personnelles resteront confidentielles.

Votre accord est nécessaire pour la validité des réponses : ☐Accord ☐Désaccord

Nous vous remercions d'avance pour votre participation, nous vous prions de remplir ce questionnaire individuellement et spontanément !

Merci de répondre avec une couleur différente !

Fiche d'identité : (Critères sociodémographiques)

Nom et prénom : sexe : Acteur interne/externe :

Catégorie d'âge : ☐25à30 ☐30à35 ☐35à40 ☐40à50 ☐plus de 50

Qualification : Spécialité :

Fonction/poste : Service :

Ancienneté dans le poste : Ancienneté dans le secteur du BP (combien années) :

Autant qu'a acteur dans l'acte de bâtir

1. **Processus général :**
   - Quels sont les étapes par lesquelles passent un projet de bâtiment public par ordre chronologique ?
   - L'aspect EE est-il bien pris en compte dans le processus de construction des BP ?
   - Quelles sont les mesures de l'efficacité énergétique prévus ? à quelles étapes s'appliquent-elles ? Qui en est le responsable ?

MESURES	ETAPES	RESPONSABLES

- Quelles sont les mesures manquantes ? à quelles étapes ?

MESURES	ETAPES	Motifs

- Y a –t-il des points critiques dans le processus qui doivent impérativement prendre en compte l'EE (CAD si on la ratte à ces niveaux on ne pas se rattraper) ?
- Quel est le mode constructif standard dans la construction des bâtiments publics au Maroc ?

ELEMENTS	MODE

- Y a-t-il des spécifications par région pour les matériaux de construction, les équipements, les précautions à prendre en compte lors de l'exécution, des recommandations ou autres dans l'instruction des dossiers ?
- Y a t-il des freins à la prise en compte de l'EE ? lesquels ?
  ☐Financiers ☐Comportementaux ☐Règlementaires ☐Techniques autres :……
- Classer les freins de 1(important) à n(moins important) .

2. **<u>Etape dans laquelle intervient l'interviewé :</u>**
   - Dans quelle étape vous intervenez ? quel est le service responsable de cette étape ?
   - Quelles sont les étapes prédécesseurs et successeurs à l'étape vous concernant ?
   - Quelles sont les mesures de l'efficacité énergétique prévues dans l'instruction des dossiers dans l'étape qui vous concerne ?
   - Quelles sont les autres mesures qu'on peut prévoir dans cette étape ?
   - Quelles sont les mesures nécessaires dans les autres étapes nécessaires pour que vous puissiez assurer l'EE à votre niveau ?
   - Y a –t-il des points critiques dans votre étape qui doivent impérativement prendre en compte l'EE (CAD si on la ratte à ces niveaux on ne pas se rattraper)?
   - Possédez-vous les connaissances techniques nécessaires pour intégrer l'EE dans l'instruction de vos dossiers ?
   - Avez-vous bénéficiez d'une formation sur la thématique de l'EE ?
   - Avez-vous bénéficiez d'une formation en EE spécifique aux taches que vous effectuez ?
   - Y a- t-il des indicateurs de performance relatifs à l'EE dans l'étape que vous assurez ? proposez-vous un indicateur ?
   - Y A-t-il un indicateur du cout de l'EE par projet ?
   - A votre avis comment peut-on se décider sur les mesures prioritaires ?
   - Quels sont les familles de critères d'évaluation qu'on peut adopter pour le choix des mesures par ordre d'importance ?

☐Techniques ; ☐Financières ; ☐Environnementales ; ☐Comportementale ;
Autres à préciser : ……

- Quels sont les Critère d'évaluation qu'on peut adopter pour le choix des actions par ordre d'importance ?
  ☐Cout ☐durée ☐complexité ☐effet sur le bâtiments ☐effet sur le processus
  ☐exigence de la réglementation ☐impact environnemental
- Autres critères, lesquels :
  ……
  ……

3. Le **RGCPE**
   - Connaissez-vous le RGCPE ? comment évaluez-vous de ce règlement ?
   - Appliquez-vous ce règlement dans l'instruction de vos dossiers ? si oui comment ?
   - Prévoyez-vous une mission à part pour le respect du RGCPE ?
   - Avez-vous déjà bénéficié d'une formation à propos de ce sujet ?
   - Possédez-vous des outils qui permettent de faire la vérification suivant le RGCPE ?
   - Est-ce qu'un responsable de l'application du RGCPE est désigné ?
   - Y a-t-il un organisme qui exige ou contrôle l'application du RGCPE ?
   - En cas de non application quels sont les conséquences pour l'avancement du projet ?
   - Y a-t-il un point de blocage administratif en cas de non application de la réglementation ?
   - Quels sont les obstacles qui gênent à l'application du RGCPE à votre avis ?

4. **Engagement de l'état et du personnel :**
   - Y a-t-il un engagement envers le MO sur l'efficacité énergétique des bâtiments publics que vous en assurez le MOD ?
   - Communiquez-vous à propos de l'EE au MO et à la MOE ? comment ?
   - Existe-il un mode de sensibilisation dans votre entité ? lequel ?
   - Est-ce que votre entité programme-t-elle des formations continue en rapport avec la thématique ?
   - Y a-t-il des gens qui sont sensibilisés, engagés et motivés pour cette thématique ?
   - Comment peut-on engager ou améliorer l'engagement des gens ?
5. **Organisation ;**
   - Y a-t-il une entité responsable sur l'Efficacité énergétique dans votre organisme ?
   - Y a-t-il des projet pilotes dans lesquels vous avez travaillé sur ce volet ? Capitalisez-vous ces expériences ? généraliser-vous les acquis sur d'autres projets ?
   - Avez-vous des stagiaires qui ont travaillé sur cette thématique ? Capitalisez-vous leurs expériences ?
   - Quelle position a le thermicien ou l'énergéticien dans l'acte de bâtir des bâtiments publics ?
   - Faites-vous recours à des BET spécialisés en énergétique dans vos études ?

6. **Outils :**
   - Possédez-vous des logiciels de l'efficacité énergétique ? lesquels ? les avez-vous déjà utilisés ? quel niveau de maitrise ?

Partie spécifique :

Cette partie est à renseigner selon votre affectation (architecte, ingénieur, suivi du chantier).

Architecte :

- Le programiste définit-il le besoin techniques du projet et intègre-t-il l'efficacité énergétique dans son besoin ?
- Intégrez-vous des critères de sélection en matière l'EE dans les concours architecturaux ? Comment ?
- Avez-vous une idée claire sur la méthode d'évaluation de cette aspect ?
- Demandez-vous aux prestataires des projets de références durables ?
- Veillez-vous au respect des déclarations de l'EE figurant dans la soumission de l'architecte lors de l'examen des plans architecturaux ?
- Veillez-vous au respect du RGCPE dès la conception des plans architecturaux ?
- Avez-vous une idée sur le surcout engendré par l'EE sur les projets, Prévoyez- vous les mesures de l'EE dans l'estimation du projet ?
- Coordonnez-vous avec les autres services de l'administration ou des experts externes pour assurer cet aspect (RGCPE ou EE) ?
- Les MO sont bien sensibilisés sur l'EE et le RGCPE ? assurez-vous leur sensibilisation ?
- Lors de l'enquête sur le terrain des informations utiles pour l'EE sont-ils collectés ?
- La note de renseignement donne assez d'informations utiles pour l'EE du bâtiment, genre : bâtiments mitoyens, ombrage actuel et futur, recommandations sur l'orientation du bâtiment ?

Ingénieur et prescripteurs

- Intégrez-vous l'EE dans l'évaluation des études techniques ?
- Si oui, Quels sont les notions de l'EE que vous prenez en compte ?
  ☐Séparation des circuits éclairage/climatisation
  ☐Eclairage économe
  ☐Equipement économes
  ☐Respect du RGCPE : enveloppe
  ☐Autres à préciser :……
- Prévoyez vous
  ☐Une étude énergétique
  ☐Une étude d'Eclairagisme,
  ☐Etude des énergies renouvelables
  ☐Etude sur le choix du système d'isolation ?
  ☐Autres à préciser :……
- Intégrez-vous l'EE dans les descriptifs de travaux :
  ☐Classe énergétique
  ☐Analyseur électrique
  ☐Compteur divisionnaire
  ☐Respect du RGCPE
  ☐Autres à préciser :……

- Intégrer vous l'EE, le RGCPE au niveau des CPS et RC des intervenants d'étude, de suivi et de contrôle ? lesquels ? et comment ?
- Y a-t-il un document d'examen du dossier de désignation pour chaque prestataire ? intègre-t-il l'EE dans les critères de choix?
- Ces dossiers de désignation intègre les lois en relation avec la thématique ?
- Prévoyez-vous dans les CPS des études ou de travaux une prestation à part pour cet aspect ?
- Exigez-vous des projets de références durables et des profils compétents en EE ?
- Analysez-vous le cout des prestations relatif à l'EE ?

Acteur du Suivi du chantier :

- y a-t-il une fiche d'instruction à suivre dans le contrôle en chantier ?intègre-t-elle l'EE ?

- Effectuez-vous une vérification de la conformité au RGCPE dans les chantiers que vous suiviez ? Comment ?
- Effectuez-vous une vérification ou une mesure des paramètres énergétiques autre que ceux du RGCPE ?
- Existe-il un organisme qui contrôle la conformité au RGCPE ou un autre paramètre énergétique ?
- Pensez-vous des précautions particulières dans l'exécution de l'isolation, de la double cloison… pour assurer l'EE? lesquelles ?
- Avez-vous besoin d'outils spécifiques pour mener à bien la mission énergétique dans le chantier ? lesquels ?
- Avez-vous bénéficié d'une formation sur les méthodes d'exécution des prestations en relations avec l'EE ?

Autres commentaires :

NB : Une grille d'évaluation ainsi que la liste des améliorations collectées lors de cette enquête vous sera distribuée pour la suite de cette étude.

Annexe n° 5 : Détails des données utilisées pour entrainer et évaluer les modèles

Première étape : définir les variables (paramètres) et leurs intervalles de variations :

Nom du paramètre	Libellé du paramètre	Plage de variation du paramètre
Épaisseur de l'isolation des murs extérieurs	X1	[1-12]
Épaisseur de l'isolation du toit	X2	[1-12]
Épaisseur de l'isolation du plancher sur le sol	X3	[1-12]
Coefficient d'absorption du toit	X4	[0,2-0,8]
Coefficient d'absorption des murs extérieurs	X5	[0,2-0,8]

Deuxième étape : Réaliser des simulations pour avoir des données pour entrainer les modèles. Il faut varier les paramètres dans chaque simulation. Nous avons utilisé la méthode LHS pour varier les paramètres et le logiciel TRNSYS pour avoir les charges de chauffage QH et climatisation QC.

Simulation N°	**Paramètres : valeurs obtenues par la méthode LHS**					**RESULTAT généré par TRNSYS**	
	X1	X2	X3	X4	X5	QH	QC
1	4.41	11.89	4.63	0.57	0.78	8.56	32.94
2	8.59	8.59	8.81	0.40	0.32	7.40	32.67
3	7.93	9.47	1.55	0.49	0.80	11.88	27.05
4	11.01	3.09	7.05	0.14	0.16	12.07	27.25
5	4.19	6.17	5.29	0.88	0.17	10.29	30.47
6	11.45	2.43	1.11	0.16	0.70	17.24	26.54
7	8.81	11.23	7.71	0.76	0.88	5.79	37.65
8	11.23	5.29	6.83	0.67	0.28	8.53	31.90
9	6.17	10.35	7.93	0.65	0.25	7.51	32.80
10	8.37	7.27	9.91	0.38	0.46	7.39	34.10
11	6.39	11.01	11.89	0.22	0.40	7.22	33.04
12	5.51	1.77	6.39	0.17	0.49	14.68	31.25
13	11.89	1.33	11.01	0.64	0.11	15.85	26.39
14	5.95	7.71	10.35	0.43	0.76	7.23	36.57
15	1.99	2.65	7.27	0.32	0.72	13.78	34.49
16	9.47	2.87	1.33	0.81	0.44	16.44	24.69
17	9.03	4.63	5.51	0.51	0.35	9.90	30.80
18	10.13	5.95	6.17	0.56	0.56	7.96	34.13
19	9.91	5.07	4.85	0.70	0.30	9.62	30.47
20	8.15	7.49	3.31	0.84	0.60	8.98	32.07
21	5.07	6.61	10.79	0.89	0.86	6.72	40.45
22	1.77	9.91	11.67	0.48	0.24	10.25	31.25
23	9.69	4.85	2.43	0.44	0.38	12.35	26.60
24	3.97	7.93	2.65	0.86	0.22	11.77	27.56
25	9.25	3.31	8.15	0.24	0.54	9.86	34.10
26	7.27	3.97	4.41	0.25	0.81	10.22	34.72

27	2.65	4.41	6.61	0.28	0.36	13.16	28.70
28	5.73	10.79	1.77	0.59	0.12	12.80	23.69
29	4.63	7.05	11.45	0.78	0.14	8.44	32.88
30	2.43	1.55	8.37	0.20	0.52	16.78	31.51
31	1.55	3.53	5.07	0.33	0.73	14.26	32.24
32	10.79	4.19	2.87	0.60	0.65	10.74	31.72
33	6.61	6.83	9.69	0.68	0.59	7.28	36.33
34	3.53	1.99	3.97	0.35	0.33	17.57	26.04
35	2.87	1.11	5.73	0.19	0.57	18.29	31.91
36	3.75	8.81	3.75	0.27	0.43	11.54	27.64
37	7.71	2.21	3.53	0.80	0.62	12.60	34.00
38	10.57	8.37	1.99	0.75	0.51	10.65	27.72
39	3.09	8.15	9.03	0.46	0.48	9.37	32.75
40	3.31	9.03	10.13	0.11	0.84	9.07	33.44
41	6.83	5.51	7.49	0.62	0.83	7.66	38.01
42	10.35	10.13	5.95	0.41	0.20	7.63	30.79
43	7.49	9.69	10.57	0.36	0.75	6.48	36.24
44	1.33	11.45	11.23	0.72	0.89	8.68	37.32
45	2.21	9.25	2.21	0.73	0.64	12.82	28.69
46	4.85	3.75	4.19	0.30	0.68	11.94	32.24
47	7.05	11.67	9.47	0.12	0.67	7.00	33.83
48	5.29	10.57	9.25	0.54	0.27	7.70	32.74
49	1.11	6.39	8.59	0.83	0.41	11.00	34.36
50	11.67	5.73	3.09	0.52	0.19	10.97	26.55

Troisième étape : Diviser les 50 simulations en deux groupes d'une façon aléatoire. Un groupe pour entrainer (37 simulations) et un groupe pour tester (13 simulations).

4ème étape : training phase : Entrainer les modèles et comparer

Pour entrainer les modèles on calcule les coefficients de chaque modèle à partir des données du 1er groupe (37 simulations). Il y a **6** coefficients pour **L1, et 21** coefficients pour **L2.** Et puis on compare les charges (QH et QC) données par TRNSYS et les charges (QH et QC) données par les modèles.

	Paramètres					**Charge: QH**		
1er groupe	X1	X2	X3	X4	X5	TRNSYS	MODEL (L1)	MODEL (L2)
1	4.41	11.89	4.63	0.57	0.78	8.56	7.34	9.04
2	8.59	8.59	8.81	0.40	0.32	7.40	8.31	6.52
6	11.45	2.43	1.11	0.16	0.70	17.24	14.28	17.00
8	11.23	5.29	6.83	0.67	0.28	8.53	10.07	9.08
9	6.17	10.35	7.93	0.65	0.25	7.51	8.01	7.25
10	8.37	7.27	9.91	0.38	0.46	7.39	8.23	7.15
11	6.39	11.01	11.89	0.22	0.40	7.22	6.06	8.23
12	5.51	1.77	6.39	0.17	0.49	14.68	14.94	14.51
13	11.89	1.33	11.01	0.64	0.11	15.85	11.24	15.70
14	5.95	7.71	10.35	0.43	0.76	7.23	7.28	7.09

15	1.99	2.65	7.27	0.32	0.72	13.78	13.93	14.20
16	9.47	2.87	1.33	0.81	0.44	16.44	13.98	15.54
17	9.03	4.63	5.51	0.51	0.35	9.90	12.02	9.84
19	9.91	5.07	4.85	0.70	0.30	9.62	11.48	9.93
21	5.07	6.61	10.79	0.89	0.86	6.72	6.65	6.94
23	9.69	4.85	2.43	0.44	0.38	12.35	13.16	12.47
24	3.97	7.93	2.65	0.86	0.22	11.77	12.55	12.08
25	9.25	3.31	8.15	0.24	0.54	9.86	11.47	10.29
26	7.27	3.97	4.41	0.25	0.81	10.22	12.42	10.59
27	2.65	4.41	6.61	0.28	0.36	13.16	14.26	13.36
28	5.73	10.79	1.77	0.59	0.12	12.80	11.46	12.83
31	1.55	3.53	5.07	0.33	0.73	14.26	14.44	14.40
34	3.53	1.99	3.97	0.35	0.33	17.57	16.82	17.59
35	2.87	1.11	5.73	0.19	0.57	18.29	16.25	17.70
36	3.75	8.81	3.75	0.27	0.43	11.54	12.10	11.49
37	7.71	2.21	3.53	0.80	0.62	12.60	13.33	12.97
38	10.57	8.37	1.99	0.75	0.51	10.65	9.51	10.84
39	3.09	8.15	9.03	0.46	0.48	9.37	9.60	9.06
40	3.31	9.03	10.13	0.11	0.84	9.07	7.83	8.61
41	6.83	5.51	7.49	0.62	0.83	7.66	9.13	6.98
42	10.35	10.13	5.95	0.41	0.20	7.63	8.45	7.01
45	2.21	9.25	2.21	0.73	0.64	12.82	11.18	12.35
46	4.85	3.75	4.19	0.30	0.68	11.94	13.86	12.47
47	7.05	11.67	9.47	0.12	0.67	7.00	5.75	6.98
48	5.29	10.57	9.25	0.54	0.27	7.70	7.73	7.75
49	1.11	6.39	8.59	0.83	0.41	11.00	11.04	11.00
50	11.67	5.73	3.09	0.52	0.19	10.97	12.12	11.44
						R^2	**0.789**	**0.983**
						MSE	**2.255**	**0.179**
						MAE	**1.182**	**0.338**

	Paramètres					**Charge: QC**		
1er groupe	X1	X2	X3	X4	X5	TRNSYS	MODEL (L1)	MODEL (L2)
1	4.41	11.89	4.63	0.57	0.78	32.94	33.56	32.49
2	8.59	8.59	8.81	0.40	0.32	27.56	27.14	27.18
6	11.45	2.43	1.11	0.16	0.70	26.54	28.33	26.77
8	11.23	5.29	6.83	0.67	0.28	34.36	33.64	34.13
9	6.17	10.35	7.93	0.65	0.25	31.91	30.63	31.16
10	8.37	7.27	9.91	0.38	0.46	27.72	29.29	27.68
11	6.39	11.01	11.89	0.22	0.40	28.70	29.57	28.95
12	5.51	1.77	6.39	0.17	0.49	30.79	28.06	31.40
13	11.89	1.33	11.01	0.64	0.11	26.04	27.36	26.24
14	5.95	7.71	10.35	0.43	0.76	34.10	32.50	34.25
15	1.99	2.65	7.27	0.32	0.72	33.04	34.01	32.00
16	9.47	2.87	1.33	0.81	0.44	28.69	30.65	29.00

17	9.03	4.63	5.51	0.51	0.35	34.72	32.43	34.14
19	9.91	5.07	4.85	0.70	0.30	30.47	29.13	30.14
21	5.07	6.61	10.79	0.89	0.86	26.60	27.12	26.55
23	9.69	4.85	2.43	0.44	0.38	40.45	40.32	40.55
24	3.97	7.93	2.65	0.86	0.22	26.55	25.97	25.66
25	9.25	3.31	8.15	0.24	0.54	32.67	31.37	33.18
26	7.27	3.97	4.41	0.25	0.81	31.25	30.31	31.64
27	2.65	4.41	6.61	0.28	0.36	36.57	37.31	36.34
28	5.73	10.79	1.77	0.59	0.12	38.01	36.39	38.35
31	1.55	3.53	5.07	0.33	0.73	33.83	34.60	34.20
34	3.53	1.99	3.97	0.35	0.33	24.69	28.21	25.95
35	2.87	1.11	5.73	0.19	0.57	26.39	31.71	26.54
36	3.75	8.81	3.75	0.27	0.43	31.90	30.43	31.48
37	7.71	2.21	3.53	0.80	0.62	32.24	31.06	32.16
38	10.57	8.37	1.99	0.75	0.51	32.24	32.33	32.68
39	3.09	8.15	9.03	0.46	0.48	23.69	24.53	23.74
40	3.31	9.03	10.13	0.11	0.84	33.44	36.80	33.71
41	6.83	5.51	7.49	0.62	0.83	34.00	31.69	33.15
42	10.35	10.13	5.95	0.41	0.20	32.80	30.95	33.36
45	2.21	9.25	2.21	0.73	0.64	34.10	33.65	34.08
46	4.85	3.75	4.19	0.30	0.68	30.80	29.44	30.92
47	7.05	11.67	9.47	0.12	0.67	32.75	33.37	32.92
48	5.29	10.57	9.25	0.54	0.27	32.74	31.74	32.85
49	1.11	6.39	8.59	0.83	0.41	34.49	33.83	34.55
50	11.67	5.73	3.09	0.52	0.19	27.64	28.03	27.32
						R^2	**0.788**	**0.985**
						MSE	**2.942**	**0.214**
						MAE	**1.366**	**0.359**

5 ème étape : testing phase : Comparer le 2eme groupe

Dans cette étape on ne calcule pas les coefficients, on les a déjà calculés dans le training phase. Ici on compare seulement.

	Paramètres					**Charge: QH**		
2 ème groupe	X1	X2	X3	X4	X5	TRNSYS	MODEL (L1)	MODEL (L2)
3	7.93	9.47	1.55	0.492	0.796	11.88	9.38	10.75
4	11.01	3.09	7.05	0.14	0.156	12.07	13.24	11.22
5	4.19	6.17	5.29	0.876	0.172	10.29	12.53	10.48
7	8.81	11.23	7.71	0.764	0.876	5.79	4.00	6.20
18	10.13	5.95	6.17	0.556	0.556	7.96	9.54	8.00
20	8.15	7.49	3.31	0.844	0.604	8.98	9.69	8.71
22	1.77	9.91	11.67	0.476	0.236	10.25	8.47	11.77
29	4.63	7.05	11.45	0.78	0.14	8.44	9.18	10.07
30	2.43	1.55	8.37	0.204	0.524	16.78	14.98	16.78
32	10.79	4.19	2.87	0.604	0.652	10.74	11.61	11.93

33	6.61	6.83	9.69	0.684	0.588	7.28	8.03	7.24
43	7.49	9.69	10.57	0.364	0.748	6.48	5.53	6.64
44	1.33	11.45	11.23	0.716	0.892	8.68	4.74	9.59
						R^2	**0.564**	**0.905**
						MSE	**3.344**	**0.732**
						MAE	**1.6**	**0.642**

	Paramètres					**Charge: QC**		
2 ème groupe	X1	X2	X3	X4	X5	TRNSYS	MODEL (L1)	MODEL (L2)
3	7.93	9.47	1.55	0.492	0.796	36.24	37.14	35.69
4	11.01	3.09	7.05	0.14	0.156	31.51	32.28	31.41
5	4.19	6.17	5.29	0.876	0.172	37.65	37.72	37.28
7	8.81	11.23	7.71	0.764	0.876	32.07	31.63	32.32
18	10.13	5.95	6.17	0.556	0.556	32.88	32.94	30.57
20	8.15	7.49	3.31	0.844	0.604	34.13	32.33	33.98
22	1.77	9.91	11.67	0.476	0.236	27.05	30.99	27.62
29	4.63	7.05	11.45	0.78	0.14	37.32	40.41	36.44
30	2.43	1.55	8.37	0.204	0.524	27.25	27.31	28.83
32	10.79	4.19	2.87	0.604	0.652	31.25	33.03	28.75
33	6.61	6.83	9.69	0.684	0.588	31.72	30.88	30.35
43	7.49	9.69	10.57	0.364	0.748	30.47	28.75	30.15
44	1.33	11.45	11.23	0.716	0.892	36.33	35.88	36.55
						R^2	**0.745**	**0.878**
						MSE	**2.847**	**1.36**
						MAE	**1.226**	**0.858**