



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA -01-

INSTITUT D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME

**Rapport de soutenance**

Master Professionnel en Efficacité Energétique dans les Bâtiments.

**L'utilisation de la méthode plans d'expériences pour l'optimisation  
de la consommation énergétique des bâtiments résidentiels en  
Algérie.**

**Cas d'étude : logement AADL, Alger.**

**Présenté par :**

**Arch. Dalia Dahbia YAICI, M171732023538.**

**Encadré par :**

**Dr. Mahmoudi Abdelhafid. (MCB)**

**Co-encadrement : Dr. Bouttout Abdelouahab. (MRA), CNERIB.**

**Membres du jury :**

**Présidente : Dr. Sayade, B. (MCB).**

**Examineur : Mr. Ouldzemireli, A. (MAA).**

**Soutenu le 03 juillet 2024**



## *Dédicace*

*Ce travail est dédié à mes personnes préférées dans cette vie, à :*

*Ma mère, merci pour la maman que tu es*

*Mon père, merci d'être là pour nous*

*Imene, ma sœur d'amour, merci d'être à mes côtés depuis toujours*

*Amira, car le ciel est toujours bleu en ta présence*

*"My Bracelet Buddy", car la vie est plus amusante avec toi*

*À Dalia, pour la personne qu'elle est aujourd'hui...*

## Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord, Dr. Mahmoudi pour l'encadrement de ce travail, Dr. Kaoula pour son accompagnement durant la formation de master professionnel en efficacité énergétique dans les bâtiments.

Mes remerciements s'adressent aux partenaires du projet AEDA :

- La GIZ Algérie.
- Renewables Academy (RENAC) AG.
- Dr. Saad Baradiy, iproplan mbH.
- M. Laurent Vidal, CETTEG.

Ma profonde gratitude est exprimée envers Dr. Bouttout Abdelouahab, le co-encadrant et maître de stage au CNERIB pour son engagement, son partage de connaissances et ses orientations précieuses, qui ont été d'une influence significative dans l'aboutissement de ce travail. Pour cela, je souhaite lui témoigner toute ma reconnaissance.

Merci à Dr. Soumia Oukaci, pour son suivi, soutien et conscience durant toute cette année.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail.

Ma gratitude ultime s'adresse à mes amis : Mouna, Souhila, Nawel, Sihem, Bochra, Nassima et Islem. Je suis honorée de connaître des personnes si brillantes dans la vie.

## Résumé

Le présent rapport s'intéresse à la problématique de la consommation énergétique des bâtiments collectifs en Algérie, s'intéressant spécifiquement à la maîtrise et l'optimisation des besoins énergétiques en chauffage et en climatisation des logements type AADL.

Pour cela, nous adoptons une démarche d'optimisation des paramètres liés à l'enveloppe du bâtiment à travers l'utilisation de la méthode de plans d'expériences comme méthode de prise de décision. Cette approche statistique propose un cadre de travail pratique qui a prouvé sa pertinence dans le domaine d'efficacité énergétique dans les bâtiments et l'amélioration de la performance énergétique.

Ce travail tente à évaluer la consommation énergétique à travers l'analyse d'effet des différents types de facteurs de l'enveloppe et au confort thermique des occupants pour le cas d'Alger, en s'articulant autour du calcul réglementaire par le DTR C3.2/4, de la simulation thermique dynamique et de la méthode des plans d'expériences associée à sa base de données.

A cet égard, les résultats obtenus à travers ce travail peuvent donner naissance à un outil rapide avec un potentiel important pour l'optimisation opérationnelle de l'enveloppe, contribuant à la conception maîtrisée des besoins énergétiques des logements collectifs en Algérie.

**Mots clés :** Plans d'expériences, optimisation, efficacité énergétique, logement collectif.

## Abstract

This report addresses the issue of energy consumption in collective residential buildings in Algeria, specifically focusing on the management and optimization of heating and cooling energy needs for AADL-type housing.

To do so, we adopt an approach that optimizes parameters related to the building envelope using design of experiments (DOE) method as a decision-making tool. This statistical approach provides a practical framework that has proven its relevance in the field of energy efficiency in building and the improvement of energy performance.

This work aims to evaluate energy consumption by analyzing the effects of various types of envelope factors and the thermal comfort of occupants related to Algiers climate context. This is done by combining regulatory calculation from DTR C3.2/4, dynamic thermal simulation and the design of experiments method with its associated database.

In this regard, the results obtained from this work can give rise to a fast tool with significant potential for the operational optimization of the envelope, contributing to the controlled design of the energy needs of collective housing in Algeria.

**Key words:** Design of experiments DOE, optimization, energy efficiency, collective housing.

## ملخص

يركز هذا التقرير على مشكلة استهلاك الطاقة في المباني الجماعية في الجزائر، مع التركيز بشكل خاص على التحكم و التحسين في متطلبات الطاقة للتدفئة والتبريد في المساكن من نوع عدل ولتحقيق هذه الغاية، نعتد نهجًا لتحسين العوامل المتعلقة بغلاف المبنى، باستخدام طريقة تصميم التجارب كأداة لاتخاذ القرار. يقدم هذا النهج الإحصائي إطارًا عمليًا أثبت أهميته في مجال كفاءة الطاقة في المباني وتحسين أداء الطاقة.

يهدف هذا العمل الى تقييم استهلاك الطاقة من خلال تحليل تأثير أنواع مختلفة من عوامل الغلاف والراحة الحرارية للشاغلين في مدينة الجوائر العاصمة, استنادا الى الحساب التنظيمي بواسطة DTR C 3.2/4 والمحاكاة الحرارية الديناميكية وطريقة تصميم التجارب المرتبطة بقاعدة بياناتها في هذا الصدد، يمكن للنتائج التي تم الحصول عليها من خلال هذا العمل أن تؤدي إلى تصميم أداة سريعة ذات إمكانات كبيرة للتحسين الأمثل لغلاف المبنى، مما يساهم في التصميم المتحكم فيه لاحتياجات الطاقة للمساكن الجماعية في الجزائر.

**الكلمات الرئيسية:** التصميم التجريبي، التحسين الأمثل، كفاءة الطاقة، المساكن الجماعية

## Table des matières

<b>I. Chapitre 01 : introductif.....</b>	<b>17</b>
<b>I.1 Introduction générale :.....</b>	<b>17</b>
<b>I.2 Contexte de la thématique : .....</b>	<b>19</b>
<b>I.3 Problématiques :.....</b>	<b>22</b>
<b>I.4 Hypothèses : .....</b>	<b>23</b>
<b>I.5 Objectives :.....</b>	<b>24</b>
<b>I.6 Structure méthodologique :.....</b>	<b>24</b>
<b>II. Chapitre 02 : description du projet, méthode utilisée et cas d'étude .....</b>	<b>27</b>
<b>II.1 Présentation de la méthode : Plans d'expériences .....</b>	<b>27</b>
<b>II.1.1 Origines.....</b>	<b>27</b>
<b>II.1.2 Présentation de la méthode des plans d'expériences (PEX).....</b>	<b>29</b>
<b>II.1.3 Formulation mathématique et terminologie des plans d'expériences (PEX).....</b>	<b>30</b>
<b>II.1.4 Types de plans d'expériences (PEX).....</b>	<b>32</b>
<b>II.1.5 Objectifs d'utilisation des plans d'expériences (PEX).....</b>	<b>32</b>
<b>II.2 Récapitulatif du cadre de référence théorique :.....</b>	<b>33</b>
<b>II.2.1 Lecture critique :.....</b>	<b>35</b>
<b>II.3 Description de méthodologie appliquée :.....</b>	<b>36</b>
<b>II.4 Présentation Cas d'étude : Logement AADL.....</b>	<b>37</b>
<b>II.4.1 Description du bâtiment :.....</b>	<b>37</b>
<b>II.4.2 Structure de la vérification réglementaire sous logiciel LogRT : ....</b>	<b>40</b>
<b>II.4.3 Application de la méthode plans d'expériences :.....</b>	<b>42</b>
<b>II.5 Conclusion :.....</b>	<b>44</b>
<b>III. Chapitre 03 : Résultats et Discussions.....</b>	<b>46</b>
<b>III.1 Les résultats de la vérification réglementaire :.....</b>	<b>47</b>
<b>III.2 Les résultats de la simulation thermique dynamique initiale : .....</b>	<b>48</b>



<b>III.3 Les résultats des expériences selon PEX :.....</b>	<b>49</b>
<b>III.3.1 Analyse de variance et sélection des paramètres influents :.....</b>	<b>51</b>
<b>III.3.2 Détermination des modèles polynomiaux :.....</b>	<b>55</b>
<b>III.4 Identification des solutions optimales pour les besoins en chauffage et en climatisation :.....</b>	<b>66</b>
<b>III.5 Recommandations pour l'amélioration des modèles : .....</b>	<b>69</b>
<b>IV. Conclusion générale : .....</b>	<b>73</b>
<b>Annexes :.....</b>	<b>81</b>

## Liste des abréviations

**AADL** : Agence Nationale de l'Amélioration et du Développement du Logement

**APRUE** : Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie

**CCNUCC** : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

**CDER** : Centre de Développement des Energies Renouvelables.

**CDN** : Contributions Déterminées au niveau National.

**CNERIB** : Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment.

**COP** : Conférence des Parties

**DB** : DesignBuilder.

**DOE** : Design of experiments.

**DTR C3.2/4** : Document Thermique Réglementaire chauffage et climatisation.

**GES** : Gaz à Effets de Serre.

**IEA** : International Energy Agency.

**MHUV** : Ministère de l'habitat, de l'Urbanisme et de la Ville.

**MTCO2** : Million de tonnes CO2.

**ODD** : Objectifs de développement durable.

**PEX** : plans d'expériences.

**PNME** : Programme National de Maitrise d'Energie.

**RTB+** : Réglementation Thermique Bâtiment, projet Taka Nadifa.

**STD** : Simulation Thermique Dynamique.

**TEP** : Tonne d'équivalent Pétrole

## Liste des équations

Équation 1 : Equation de valeur codée.....	31
Équation 2: Equation de la valeur naturelle.....	31
- Modèle linéaire : $Y = a_0 + i = 1n_{ai} \cdot X_i$	Équation 3 ..... 31
- Modèle purement quadratique : $Y = a_0 + i = 1n_{aii} \cdot X_i^2$	Équation 4 ..... 31
- $Y = a_0 + i = 1n_{ai} \cdot X_i + i = 1n - 1j = i + 1n_{aij} \cdot X_i \cdot X_j$	Équation 5
31	
$Y = a_0 + i = 1n_{ai} \cdot X_i + i = 1n - 1j = i + 1n_{aij} \cdot X_i \cdot X_j + i = 1n_{aii} \cdot X_i^2$	
Équation 6.....	32

## Liste des illustrations

Figure 1: Consommation en énergie finale de secteur bâtiment à l'échelle mondiale. Source : International energy agency IEA, 2022. ....	18
Figure 2: Structure de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité. Source : bilan energetique 2021, MEER. ....	18
Figure 3: Evolution de la population en fonction de nombre des logements. Source : CNERIB/MHUV. ....	19
Figure 4: Consommation d'énergie annuelles d'un logement. Source : CNERIB. ....	20
Figure 5: Evolution nombre de logements et émission CO2. Source : CNERIB. ....	20
Figure 6: Historique et projections GES horizon 2030 selon les différents scénarios pour secteur d'habitat. 2023. ....	21
Figure 7: Evolution nombre de logements en Algérie. Source : CNERIB/MHUV. ....	22
Figure 8: Organigramme méthodologique. Source : Auteur, 2024. ....	25
Figure 9: Interface logiciel LogRT. Source : auteur, 2024. ....	27
Figure 10: Interface logiciel Minitab. Source : auteur, 2024. ....	27
Figure 11: Interface DesignBuilder. Source : auteur, 2024. ....	27
Figure 12: La structure de la méthode PEX. Source :(Le plan d'expérience, 2017). ....	30
Figure 13: Récapitulatif du cadre de référence théorique. Source : Auteur, 2024. ....	34
Figure 14: Organigramme descriptif de la méthodologie appliquée. Source : Auteur, 2024. ....	37
Figure 15: Plan de masse, cité 1520 AADL Ouled Fayet. Source : Google Earth, 2024. ....	38
Figure 16: Façade principale. Source : locataire Serghine, 2024. ....	38
Figure 17: Plan courant de l'appartement F3. Source : CNERIB, 2024. ....	38
Figure 18: Modélisation de l'immeuble et le logement interface DesignBuider. Source : Auteur : 2024. ....	40
Figure 19: Organigramme des étapes de calcul réglementaire chauffage. Source : CNERIB. ...	41
Figure 20: Organigramme général des étapes de calcul des apports calorifiques. Source : CNERIB. ....	42
Figure 21: Enchaînement des expériences. Source : auteur, 2024. ....	44
Figure 22: Structure du chapitre 03. Source : Auteur, 2024. ....	46
Figure 23: Bilan énergétique du logement F3. Source : DesignBuilder. ....	48
Figure 24: (a) : Analyse de variance, (b) : graphe des effets standardisés et (c) graphe de front de Pareto. Source : Auteur, 2024. ....	52
Figure 25: (a) Analyse de variance, (b) graphe des effets standardisés et (c) graphe de front de Pareto. Source : Auteur, 2024. ....	53
Figure 26 : Graphe des effets principaux pour besoins en chauffage. Source : Auteur, 2024. ...	56
Figure 27 : Graphe des interactions entre facteurs. Source : Auteur, 2024. ....	56

Figure 28 : Les graphes de Front de Pareto des effets standardisés pour : besoin en chauffage et Puissance de chauffage.....	59
Figure 29 : Diagramme des contours des besoins en chauffage à T=22. Source : Auteur, 2024. ....	60
Figure 30: Diagrammes des contours pour : besoins en chauffage et Puissance à T=21°C. Source : Auteur, 2024.....	60
Figure 31 : Graphe des effets principaux des facteurs : FS, U toit, U mur et température. Source : Auteur, 2024. ....	61
Figure 32 : Graphe des interactions entre les facteurs. Source : Auteur, 2024.....	62
Figure 33 : Les graphes de Front de Pareto pour : besoin en climatisation, et puissance de climatisation. Source : Auteur, 2024.....	65
Figure 34: Diagrammes de contours besoin en climatisation, et puissance de climatisation. Source : Auteur, 2024.....	65
Figure 35 : Schéma des recommandations pour l'amélioration des modèles mathématiques développés. Source : Auteur, 2024. ....	70
Figure 36 : Graphe de la ligne ajustée de la régression linéaire. Source : Auteur, 2024. ....	71
Figure 37 : Graphe de probabilité normale des résidus pour besoins en chauffage. Source : Auteur, 2024. ....	71
Figure 38 : Schéma synoptique des recommandations d'optimisation des besoins en chauffage et climatisation par la méthode développée. Source : Bouttout et YAici, 2024. ....	75
Figure 39: Classification des méthodes d'optimisation multicritère (adapté de Collette et al., 2003 ; Talbi, 2001) in Rivallain, (2013, p.102.).....	81
Figure 40: Une classification des actions pour l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, adaptée de (Kolokotsa et al, 2009) (Marszal et al, 2011) (Diakaki, 2008). In (Rivallain, 2013, p.33).....	83
Figure 41: Les paramètres d'études sélectionnées pour l'optimisation énergétique du bâtiment. Source : Romani, 2015 p.69.....	84
Tableau 1: Typologies des plans d'expériences. ....	32
Tableau 2: Objectifs des plans d'expériences.....	33
Tableau 3: Résumé des travaux relatifs à la thématique PEX. Source: Auteur, 2024.....	34
Tableau 4 : Programme surfacique du logement F3.....	39
Tableau 5 : Propriétés thermiques des éléments de l'enveloppe. ....	39
Tableau 6 : Paramètres d'entrée pour la simulation thermique dynamique.....	39
Tableau 7 : les intervalles de variation minimales et maximales des facteurs. ....	43
Tableau 8: Résultats de la vérification réglementaire d'hiver et d'été par logiciel LogRT.....	47

Tableau 9: Résultats de la simulation thermique dynamique du logement F3.....	49
<i>Tableau 10: Résultats de 64 simulations selon le plan élaboré. Source : Auteur, 2024.</i> .....	50
Tableau 11: Résultat de la matrice plan factoriel complet. Source: Auteur, 2024.....	55
Tableau 12: Résultats de la matrice pour les besoins en chauffage. Source : Auteur, 2024.....	57
Tableau 13: Les modèles polynomiaux pour la réponse besoins en chauffage. Source: Auteur, 2024.....	58
Tableau 14: Les modèles polynomiaux pour la réponse puissance chauffage. Source: Auteur, 2024.....	58
Tableau 15: Résultats du plan factoriel complet. Source: Auteur, 2024.....	61
Tableau 16: Résultats de plan de surface de réponse, besoins en climatisation. Source : Auteur, 2024.....	63
Tableau 17: Les modèles polynomiaux pour la réponse besoin en climatisation. Source: Auteur, 2024.....	63
Tableau 18: Les modèles polynomiaux de la réponse Design capacity cooling. Source: Auteur, 2024.....	64
Tableau 19 : Scénarios proposés avec leurs comparaisons entre : DTR, STD et modèles PEX. Source : Auteur, 2024.....	66
Tableau 20 : Solutions optimales choisies avec leur comparaison entre DTR et modèles PEX. Source : Auteur, 2024.....	67
Tableau 21 : Propriétés thermiques des valeurs des systèmes de l’enveloppe proposées dans les solutions. Source : Auteur, 2024.....	68
Tableau 22 : Propositions des solutions pour les scénarios de la CDN pour atténuation des émissions CO2. Source : Auteur, 2024 .....	73

## PRÉAMBULE

Le taux de chômage en Algérie ne cesse d'augmenter depuis des décennies dû principalement à un manque de compétences transversales (Soft Skills) des jeunes diplômés mais également à une formation répondant de moins au moins aux besoins du marché de l'emploi, un marché qui s'oriente désormais vers une transition énergétique et environnementale visant d'alléger la pression sur l'environnement et la protection de ses ressources.

C'est dans ce contexte que la formation du master professionnalisant « *efficacité énergétique dans le bâtiment* » s'inscrit et plus particulièrement dans le cadre de la mise en œuvre du projet AEDA « amélioration de l'employabilité des diplômés des formations professionnels et universitaires en Algérie » qui est financé par le ministère fédéral de la coopération économique et du développement allemand (BMZ-Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung).

L'objectif principal de la formation est d'améliorer l'employabilité des jeunes diplômés dans les domaines professionnels ayant un lien avec l'efficacité énergétique du bâtiment et la gestion de l'énergie. La formation est axée principalement sur la pratique et le renforcement des compétences transversales (Soft-skills).

La formation a été mise en place en vue de mettre à la disposition du marché local, régional et national des spécialistes pouvant intervenir dans le domaine de la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Plus particulièrement, l'apprenant au terme de cette formation est en mesure de participer à l'élaboration de diagnostics énergétiques en rapport à la « performance énergétique et environnementale du bâtiment » et participer pleinement à l'élaboration des projets au sein des équipes pluridisciplinaires. L'apprenant a été également formé pour pouvoir mener des travaux de recherche et de développement en entreprise en adoptant des actions à entreprendre avec plus de professionnalisme et efficacité dans la gestion des problèmes environnementaux.

La formation élaborée est orientée pour préparer un cadre possédant les compétences requises pour prendre en charge une multitude de missions et des tâches diverses telle que :

- Une conception environnementale : en incluant, notamment, les obligations réglementaires liées aux multiples certifications nationales (DTR et autres) ou internationales (HQE, BBC, Passivhaus...) ainsi que l'incorporation des énergies renouvelables.
- Une optimisation énergétique du bâti : en incorporant des solutions pragmatiques basées sur des approches unifiées de la faisabilité du projet (la construction) et de son efficacité énergétique ainsi que du choix avisé des matériaux.
- Un management efficient des projets : en associant les dispositifs de gestion technique de projets à des notions portant sur les transactions et droit de l'édifice, le montage financier et la conduite opérationnelle des projets.
- Une administration intelligente des équipements techniques : en insérant des solutions adéquates, fondées sur les nouveaux procédés de communication, de

régulation et de contrôle pour améliorer le fonctionnement de ces équipements ainsi que leurs interdépendances avec l'occupant.

- Application transversale des connaissances interdisciplinaires acquises lors de la formation.
- Appui à la gestion de projets : prise en compte des impératifs techniques et de l'environnement industriel avec une vision globale du projet.
- Soutien au Chef de Projet : mécanismes de management, la délégation des tâches, la formulation des messages.
- Travail en équipe : entrevue, échange, organisation et complémentarité au sein de l'équipe.
- Aptitudes : rectitude, autogestion, efficacité, jugement, esprit de synthèse.
- Capacité à travailler avec des groupes multidisciplinaires pour créer des solutions

Au cours de ces deux années universitaires 2022/2023 et 2023/2024, les apprenants ont reçu une formation aussi diverse qu'enrichissante par des experts nationaux et internationaux notamment allemands tout en effectuant des stages dans des centres de recherche et des bureaux spécialisés, ce qui leur a permis de développer différentes thématiques pour leur projets de soutenances traitant la réhabilitation énergétique, la diversité climatique et son impact sur l'efficacité énergétique, les matériaux et systèmes modulaires innovants, les systèmes CVC, les systèmes passifs de refroidissement, le mur solaire, la façade vitrée, l'optimisation de la consommation énergétique des bâtiments et la conversion des bâtiments abandonnés en bâtiments plus durables et écologiques.

Le défi à relever était difficile mais capital pour préserver notre environnement, réduire les impacts générés par nos bâtiments, optimiser leurs comportements thermique et énergétique pour une préservation optimale de nos ressources environnementales et surtout pour contribuer à la transition énergétique et environnementale qui est au cœur de la politique nationale.

Les objectifs ont été finalement atteints et le défi a été relevé avec succès !

Dr.KAOULA Dalel

Responsable du master professionnalisant

« Efficacité énergétique dans le bâtiment »



# **CHAPITRE 01 :**

# **INTRODUCTIF**

## **I. Chapitre 01 : introductif**

### **I.1 Introduction générale :**

La problématique énergétique en Algérie constitue un sujet d'actualité dans l'ensemble des secteurs. Cela relève d'une prise de conscience, d'abord à l'échelle mondiale, se manifeste sous forme de politiques, stratégies et actions dans un cadre global de lutte contre l'épuisement des ressources d'énergies non renouvelables ainsi que le réchauffement climatique, causé principalement par les émissions des gaz à effets de serre.

Le secteur de bâtiment participe activement à cette problématique. Etant un grand consommateur d'énergie dans le monde, il représente environ 40% de la consommation d'énergie finale par rapport à d'autres secteurs (Fig. 01). Ces données représentent 31% des émissions totales dont les émissions CO<sub>2</sub> des bâtiments résidentiels sont de 26MT CO<sub>2</sub> par rapport aux émissions mondiales de 1936 MT CO<sub>2</sub>, ce qui représente 1.34% de la part de résidentiel dans le monde (IEA, 2020).

Par conséquent, plusieurs pays ont élaboré des politiques et stratégies visant à maîtriser cette demande croissante en tenant compte du développement économique et démographique, tout en créant de l'équilibre entre ça et son impact sur l'environnement. Cette recherche d'équilibre se traduit par la promotion de différentes actions de transition énergétique dans le secteur du bâtiment, en réponse à la demande cruciale de changement des pratiques actuelles. Cela permettra l'atteinte des objectifs de développement durables notamment le l'objectif n° 7 : énergie propre et d'un coût abordable, l'ODD n° 9 : industrie, innovation et infrastructure et l'ODD n° 11 : villes et communautés durables.

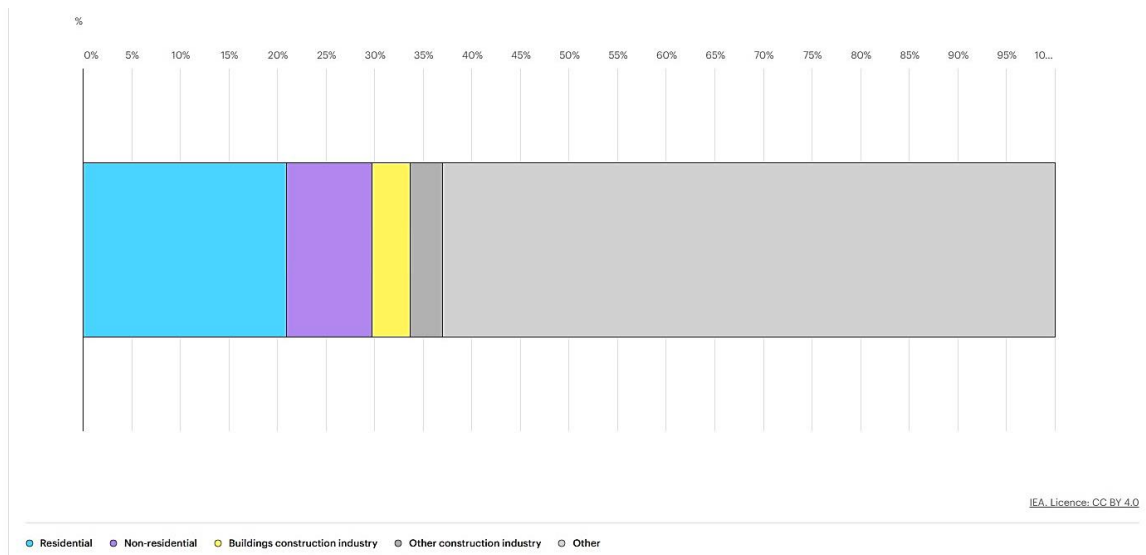


Figure 1: Consommation en énergie finale de secteur bâtiment à l'échelle mondiale. Source : International energy agency IEA, 2022.

Au niveau local, le bilan énergétique national de 2021 du ministère de l'énergie et des mines (édition 2022) présente la consommation finale des par secteur, ou le secteur résidentiel et tertiaire (ménages et autres) en Algérie représente 47% de la consommation finale et 36% (34 MT CO<sub>2</sub>) d'émissions de GES. Cette valeur 47% (Fig.02) est dominante, suivie par le secteur de transport et industrie avec 29% et 24% respectivement. Cette donnée partagée marque une hausse de la demande du secteur « ménages et autres<sup>1</sup> » de 6.20% (de 22.1 M TEP en 2020 à 23.4 M TEP en 2021) dont l'évolution du sous-secteur résidentiel est de 4.4%. Une telle demande met en péril les ressources énergétiques non renouvelables face à la croissance économique, démographique et au rythme des constructions de logements (Belahya, 2018).

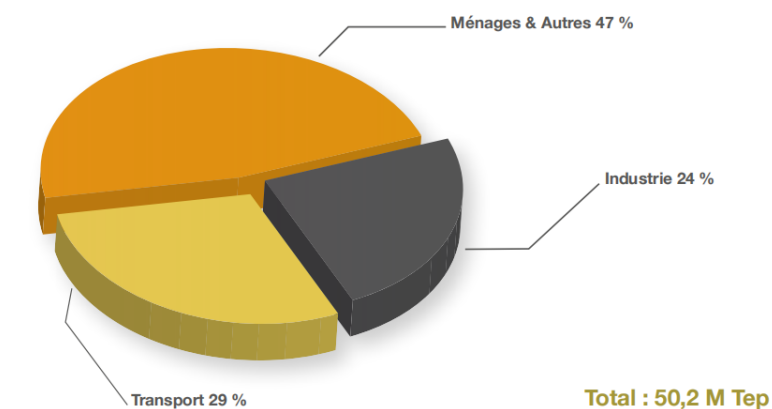


Figure 2: Structure de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité. Source : bilan energetique 2021, MEER.

<sup>1</sup> Ce secteur regroupe le résidentiel, l'agriculture, le tertiaires e autres.

Face à ces défis, une politique nationale de la maîtrise de l'énergie a été mise en place à l'horizon 2030, reposant sur trois grands composants : le bâtiment, le Programme National de la Maitrise de l'Energie (PNME) défini par le décret exécutif n° 4-149 et la loi de finance 2000. En ce qui concerne le bâtiment, cette politique stipule le cadre général de la réglementation thermique du bâtiment (décret exécutif n°2000-90) ainsi que l'étiquetage et les règles spécifiques d'efficacité énergétique des appareils électroménagers.

Pour cela, le bâtiment se positionne *parmi les secteurs les plus favorables pour contribuer efficacement à la mise en place des politiques de développement durable et transition énergétique à l'échelle mondiale* (Romani, 2015, p.11). En Algérie, cela se concrétise à travers des actions adoptées par plusieurs organismes nationaux (APRUE, CNERIB, CDER, etc.) pour la mise en œuvre de la politique nationale de la maitrise d'énergie et la réduction des émissions des gaz à effet de serre.

Dans les sections suivantes, nous présenterons le contexte de la thématique de ce travail, en mettant l'accent sur sa problématique principale, ainsi que sur les hypothèses formulées et les objectifs à atteindre. Le chapitre introductif se conclut par l'exposition de la méthodologie de travail adoptée pour résoudre la problématique posée.

## I.2 Contexte de la thématique :

La projection des programmes de logements pour les deux quinquennal 2029 et 2034 est face à de nouveaux enjeux stratégiques en termes de : besoin en logement, croissance démographique (Fig.03), besoins énergétiques à 1.571TEP/ logement (Fig.04) et émissions CO2 dû à la consommation des logements le long de la phase opérationnelle (Fig.05).

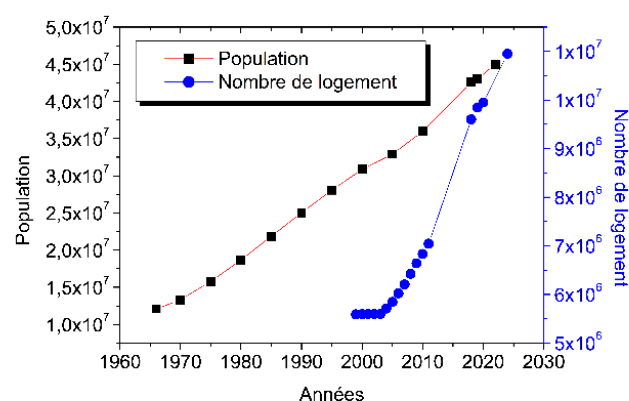


Figure 3: Evolution de la population en fonction du nombre des logements.  
Source : CNERIB/MHUV.

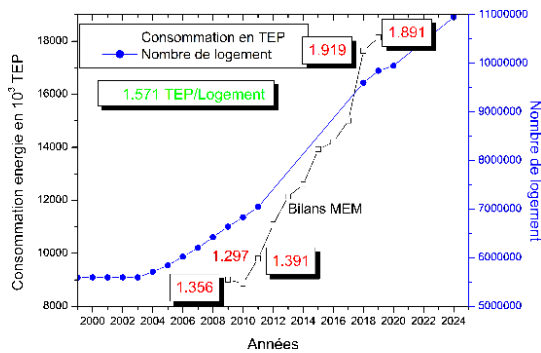


Figure 4: Consommation d'énergie annuelles d'un logement. Source : CNERIB.

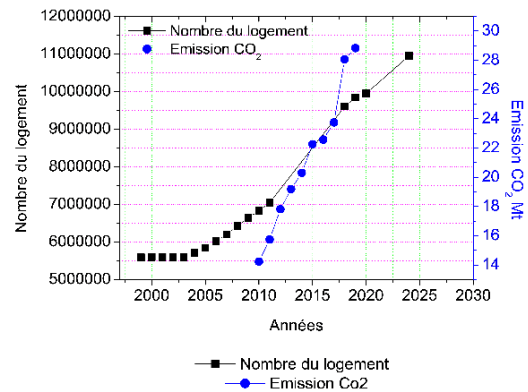


Figure 5: Evolution nombre de logements et émission CO2. Source : CNERIB.

La politique d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre mise en œuvre par l'Algérie s'inscrit dans la lutte contre les effets du changement climatique. Cette politique se manifeste par sa contribution active dans diverses manifestations, forums internationaux et accords à l'échelle mondiale, tels que la CCNUCC, Protocole de Kyoto et l'accord de Paris. Parmi ces politiques, nous citons les actions suivantes : le Cadre de la Contribution Déterminée au niveau National (CDN) et le Plan National Climat. Ce dernier consiste l'outil de mise en œuvre de la CDN pour la période 2020-2030<sup>2</sup>. Depuis 2015, les actions de la CDN définissent des objectifs et mesures en matière d'atténuation et de transition énergétique. Pour le secteur d'habitat et de l'urbanisme, elle propose des projections des émissions et des mesures planifiées sous plusieurs scénarios d'ici 2030, en tenant compte de :

- Le gisement important que représente le parc de logements existant et en cours de réalisation.
- L'opportunité réelle d'investissement pour la réduction de consommation énergétique afin d'atténuer les émissions GES.
- La diversité des mesures possibles à appliquer pour le secteur d'habitat (mesures sur l'enveloppe des bâtiments, sur la performance des appareils électriques et systèmes) ainsi que l'échelle des quartiers et des villes.

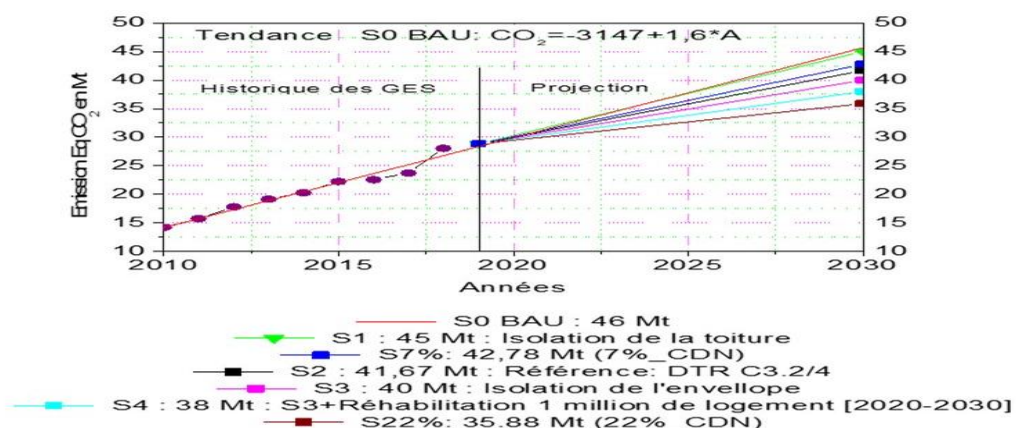
<sup>2</sup> Elaboration de la Troisième Communication Nationale et du Premier Rapport Biennal de l'Algérie auprès de la CCNUCC | Programme De Développement Des Nations Unies, (2023). p.77.

Cette politique est consolidée pour le secteur du bâtiment par un cadre réglementaire qui vient renforcer la mise en œuvre de ces actions. Nous citons : la loi relative à la maîtrise d'énergie n° 99-09 (1999), le décret exécutif portant réglementation thermique n°2000-90 qui établit l'obligation de la vérification réglementaire (DTR C3.2/4) pour les bâtiments neufs, publié par le CNERIB/MHUV en 2016 (ibid., p.107) et le circulaire interministérielle n°1 du 5-02-2018 qui fixe les orientations concernant l'isolation thermique des bâtiments.

Nous constatons que l'isolation thermique des logements est un des objectifs des actions phares de la CDN pour la période 2021-2030 en matière d'atténuation des émissions de GES à l'horizon 2030 (Fig.6). Elle est la mesure principale qui permettra non seulement de réduire la demande énergétique croissante mais aussi de diminuer le facteur énergétique. En addition, la promotion à cette solution permettra la création de nouveaux emplois et offrira des opportunités d'investissement dans la production locale des isolants thermiques.

Les données partagées dans le TCN et BUR1 (2023) sur le secteur résidentiel révèlent un parc de logements de 11.5 millions d'unités, composé de 65% de logements individuels et de 35% de logements collectifs, avec une consommation de 1.29 TEP par logement par an, soit 15000 KWh/logement.an (10000 KWh/logt pour logements bien isolés et 12500 KWh pour les logements moyennement isolés).

Le graphe ci-dessous présente la synthèse des mesures d'atténuation dans le secteur de l'habitat, avec l'isolation thermique comme action phare à l'horizon 2030. Selon les résultats du graphe partagé par le CNERIB, nous remarquons que le scénario S3 : 40MT et le scénario S1 45MT suggèrent des pistes prometteuses à explorer, avec des pourcentages de réduction des émissions de 67.8 % et 52.9% pour S3 et S1



respectivement. Ces projections sont corrélées avec l'évolution du nombre de logements présenté en Fig. 6.

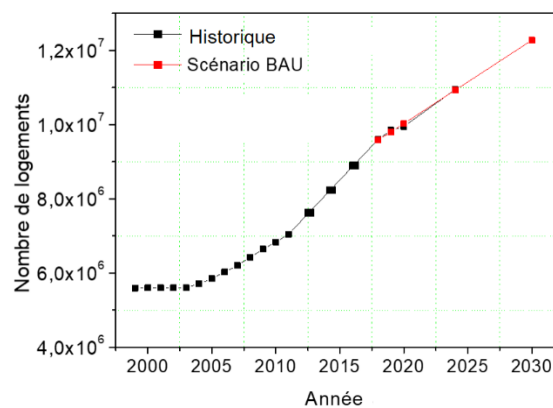


Figure 7: Evolution nombre de logements en Algérie. Source : CNERIB/MHUV.

Pour finir, cette action d'atténuation par l'introduction de l'isolation de l'enveloppe des logements proposent un ensemble d'indicateurs qualitatifs et/ou quantitatifs pour mesurer le progrès (TCN et BUR1, 2023, p.112-113). Parmi ces indicateurs, nous citons :

- Les déperditions et apports calorifiques selon les critères du DTR C3. 2/4.
- Les coefficients thermiques de transmission (valeur U) des systèmes de l'enveloppe selon le DTR C3. 2/4.
- Les indicateurs relatifs au réchauffement climatique (émissions CO<sub>2</sub>) : émission totale de CO<sub>2</sub> par an [kg/an] ou l'émission relative de CO<sub>2</sub> [kg/m<sup>2</sup>/an].
- Les indicateurs de performance énergétique (consommation d'énergie finale : en KWh/m<sup>2</sup>.an ou KWh/(m<sup>3</sup>.an) pour chauffage/ refroidissement ; ou en KWh/m<sup>2</sup>.K. jour en consommation par unité de surface habitable.

### I.3 Problématiques :

L'existence de la réglementation thermique algérienne est une déclaration d'engagement vers la promotion de la maîtrise de la consommation des ménages et une incitation à accroître la prise de conscience des parties prenantes, permettant ainsi un développement local et l'atteinte des objectifs fixés à l'échelle internationale pour le secteur d'habitat et de l'énergie.

A notre tour, la thématique de l'efficacité énergétique dans les bâtiments est l'action majeure introduite pour faire face à ces défis. Elle offre des mesures passives tels que l'isolation thermique, la ventilation naturelle et l'ensemble des solutions sur l'architecture

du bâtiment, ainsi que d'autres mesures actives regroupant les systèmes de chauffage, climatisation, domotique et gestion technique du bâtiment. L'enjeu actuel réside dans la création des outils pratiques d'aide à la décision pour l'introduction de ces mesures d'une manière efficace à l'échelle du bâtiment. Ces outils contribuent à l'optimisation énergétique de ce dernier afin de maîtriser la consommation et les coûts associés.

L'optimisation englobe des actions concrètes comme la réduction des déperditions thermiques, le choix d'équipements plus efficaces et l'élimination du gaspillage sous trois grands paliers :

- L'efficacité : par l'amélioration de la performance énergétique.
- Le renouvelable : par la réduction de l'impact environnemental de la demande énergétique et en matériaux.
- L'adéquation : par la réduction de la demande tout au long du cycle de vie des bâtiments.

Voilà pourquoi, nous portons notre intérêt sur la conception « thermique » des logements collectifs comme cas problématique riche en enseignements. S'intéressant spécifiquement aux éléments de l'enveloppe du bâtiment, aux facteurs de confort des occupants ainsi qu'à l'usage par ces derniers. Cette situation riche d'opportunités d'amélioration de performance et marquée par un manque de sensibilisation du public aux économies d'énergie, ainsi que par la nécessité de répondre aux accords internationaux, la question suivante s'émerge:

- Comment peut-on appliquer la méthode des plans d'expériences pour l'identification des solutions à implémenter pour l'optimisation des besoins en chauffage et en climatisation d'un logement collectif de type AADL ?

#### **I.4 Hypothèses :**

Une démarche durable à la recherche d'outil pratique permettra de répondre à la problématique posée. Nous supposons que : l'identification et la mise en œuvre de solutions pour la prise de décision technique et opérationnelle, adaptées au contexte algérien, peuvent optimiser la consommation énergétique des bâtiments résidentiels, basées sur l'application de la méthode de plans d'expériences à des fins d'optimisation. Cela permettra de déterminer les solutions optimales (et/ou combinaisons optimales) des



éléments de l'enveloppe et les paramètres de confort thermique des occupants, dont l'objectif principal sera la maîtrise et l'optimisation de la consommation énergétique.

### **I.5 Objectifs:**

Les attentes de ce travail de recherche s'inscrivent dans les points suivants :

- Développer un outil pratique et rapide d'optimisation énergétique d'un logement collectif.
- Identifier les facteurs les plus influents sur les besoins de chauffage et de climatisation.
- Explorer, en accord avec la réglementation thermique, les solutions techniques à suivre lors des études et conception thermique des logements collectifs, et les utiliser comme deux outils complémentaires.
- Formuler des recommandations pour renforcer les politiques et réglementation nationale, en mettant en avant l'aspect de **sensibilisation** des occupants, spécialistes et décideurs en cohérence avec les engagements internationaux de l'Algérie à l'horizon 2030.

### **I.6 Structure méthodologique :**

Ce travail empirique s'appuie sur quatre éléments nécessaires, à savoir :

1. La recherche bibliographique : à travers la lecture des articles scientifiques, des ouvrages, thèses et webinaires. Cela nous a permis de comprendre la thématique traitée et de saisir les concepts clés de recherche.
2. La recherche thématique : par les travaux déjà développés dans cette thématique.
3. La recherche exploratoire qualitative/ quantitative : pour l'application des expériences, les méthodes d'analyse des données et leurs interprétations.
4. Les outils d'exploration : mis à notre disposition au niveau de CNERIB, à savoir : le cas d'étude, les avis techniques des entreprises, normes, DTR et base de données informations. Également la licence étudiant DB fourni par RENAC Academy.

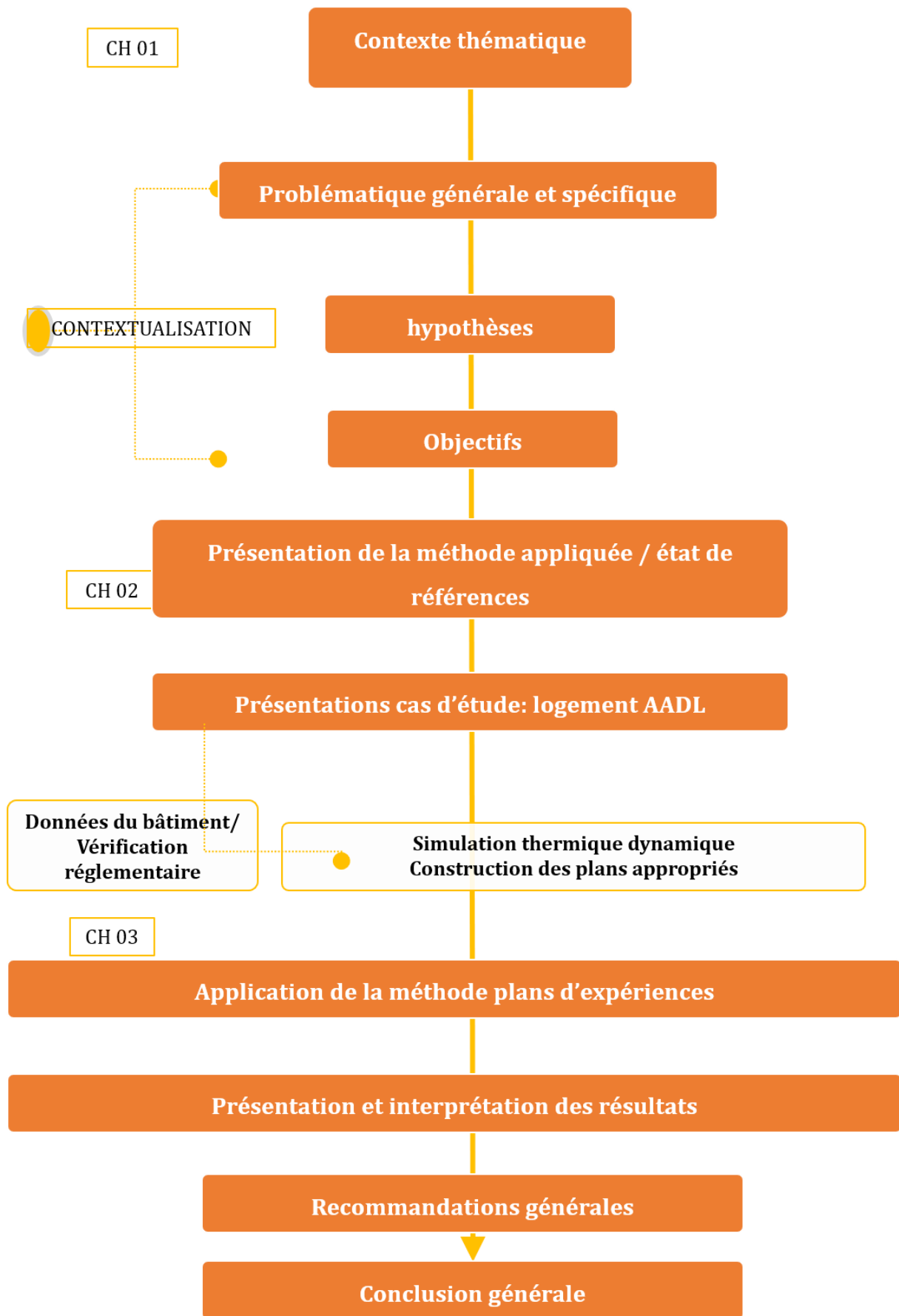


Figure 8: Organigramme méthodologique. Source : Auteur, 2024.

# **CHAPITRE 02 :**

# **CAS D'ETUDE**

## II. Chapitre 02 : description du projet, méthode utilisée et cas d'étude

Ce chapitre présentera la synthèse du cadre théorique de la méthode utilisée : les plans d'expériences, qui constituent une méthode de prise de décision multicritère, et son application dans le domaine de l'efficacité énergétique dans les bâtiments. Cette synthèse est basée sur la lecture des documents scientifiques pertinents relatifs à notre thématique. Le chapitre présentera, dans un second temps, la méthodologie appliquée au cas d'étude (logement AADL) avec l'enchaînement logique des calculs de ce modèle de base, à savoir : la vérification thermique réglementaire (logiciel LogRT, Fig.9), le protocole de simulation thermique dynamique sous DesignBuilder (Fig.11) et la réalisation des expériences sous la matrice des plans d'expérience PEX (Fig.10).

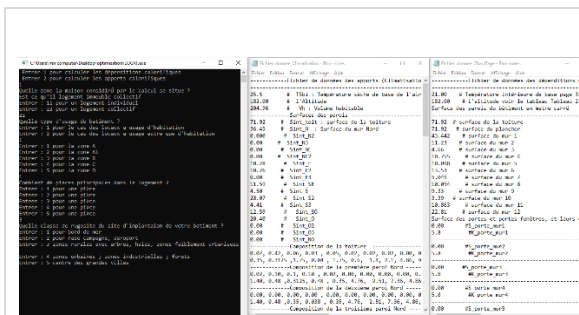


Figure 9: Interface logiciel LogRT. Source : CNERIB, 2024.

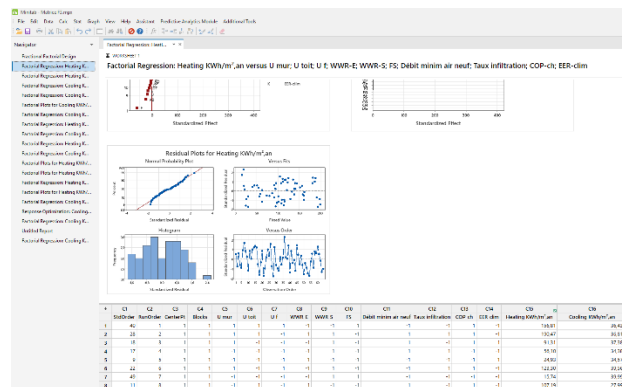


Figure 10: Interface logiciel Minitab. Source : auteur, 2024.

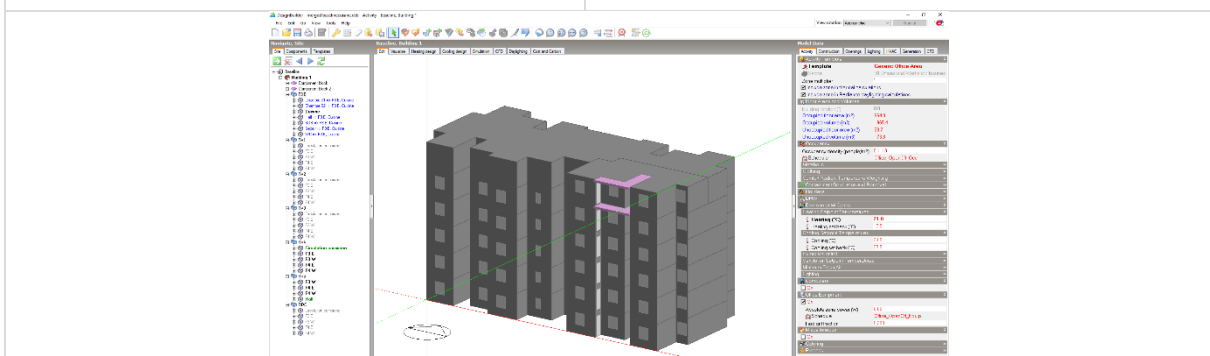


Figure 11: Interface DesignBuilder. Source : auteur, 2024.

### II.1 Présentation de la méthode : Plans d'expériences

#### II.1.1 Origines

En vue de résoudre la problématique de maîtrise et d'optimisation de la consommation énergétique des logements, nous nous intéressons à l'analyse de la performance

énergétique des éléments du bâtiment comme facteurs influençant les besoins en chauffage et en climatisation. La présence d'un grand nombre de paramètres exige l'exploration de modèles de travail permettant de mettre en avant la détection des facteurs les plus significatifs sur les réponses prédéfinis (besoins énergétiques).

Le concept d'un problème d'aide à la décision regroupe l'ensemble des techniques qui permettent de trouver et d'appliquer le meilleur choix (choix optimal) parmi des solutions existantes en suivant des critères prédéfinis. La formulation d'un problème passe par deux concepts relatifs :

a) L'espace de recherche (ou de décision) : l'ensemble des solutions possibles définies à partir des intervalles de variation des paramètres intrinsèques du problème. La dimension et la nature de cet espace sont déterminées par le nombre et la nature des variables (continues et/ou discrètes)

b) L'espace des objectifs : Caractérisé par les critères de décision définis comme des fonctions mathématiques permettant une évaluation qualitative ou quantitative des performances des solutions du problème. La dimension de cet espace dépend du nombre de critères.

Par analogie, dans le domaine de l'énergie du bâtiment les mêmes concepts se présentent (selon Rivallain, 2013) :

a) Espace de recherche (ou de décision) : il correspond à l'ensemble des programmes de réhabilitation générés à partir des mesures de réhabilitation élémentaires, variables d'étude qui peuvent être des paramètres liés à l'enveloppe et/ou aux systèmes de ventilation, etc. Les critères sont à définir par les décideurs.

b) Espace des objectifs : Caractérisé par les critères de décision définis comme des fonctions objectifs : impacts environnementaux + coûts économiques + inconfort thermique d'été, TOUS à MINIMISER<sup>3</sup>.

Kolokosta et al. (2009) cités par Rivallain (2013, p.42) proposent cet ensemble de critères de décision pour la performance des programmes de réhabilitation, par une évaluation de :

---

<sup>3</sup>Rivallain, M. (2013). *Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants* (Doctoral dissertation, Paris Est).

- Le bilan énergétique.
- Le bilan environnemental.
- L'analyse économique.
- Les aspects sociétaux (confort des ambiances intérieures) et la santé (qualité de l'air intérieur).

Voir l'**annexe 01** pour la classification des méthodes de prise de décision multicritère ainsi que les différents paramètres d'études et leurs typologies cités dans la littérature relative à l'efficacité énergétique dans le bâtiment.

### ***II.1.2 Présentation de la méthode des plans d'expériences (PEX)***

Etant une branche de statistique appliquée, la méthode des plans d'expériences est une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conduite, l'analyse et l'interprétation des expériences (Fig.12). Cette méthodologie mathématique est appliquée depuis longtemps dans plusieurs domaines scientifiques. Elle est basée sur la modification simultanée de variables d'entrée (appelées facteurs, notées X) afin de révéler leurs effets sur une ou plusieurs variables de sortie (appelées réponses, notées Y). Telford (2007) explique les utilisations des plans d'expériences pour cribler de nombreux facteurs et découvrir les interactions entre eux dans un but d'optimisation ou de caractérisation des processus ou produits<sup>4</sup>. Dans ce travail, nous nous concentrons sur l'application de la méthode PEX conjointement avec la simulation thermique dynamique dans le domaine de l'efficacité énergétique dans les bâtiments résidentiels.

---

<sup>4</sup> Voir annexe 02 pour plus de détails sur l'historique de la méthode PEX.

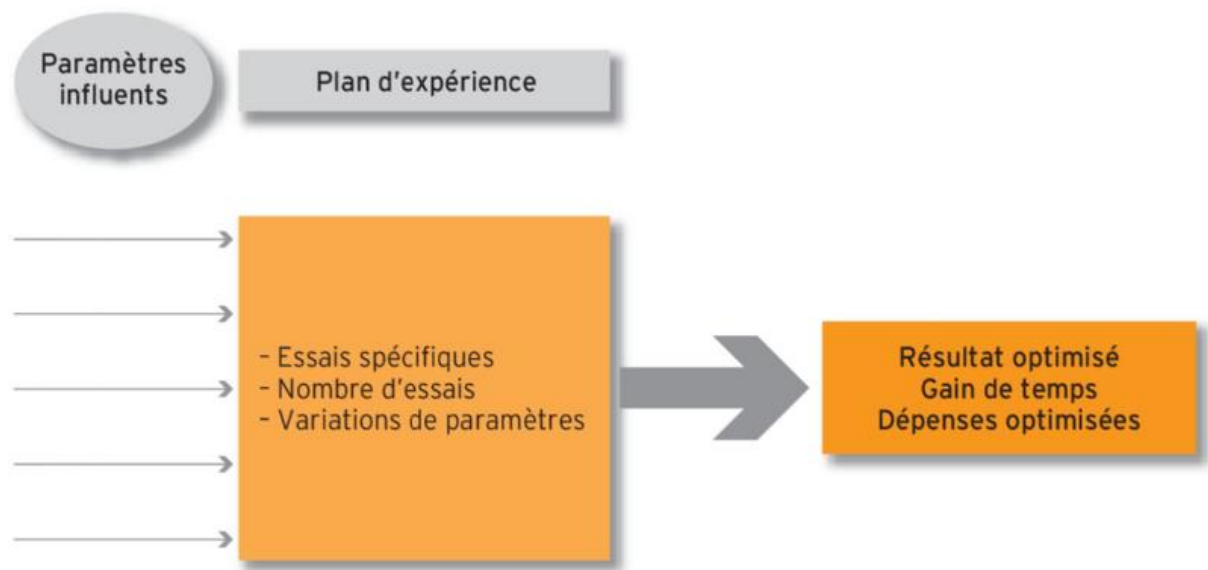


Figure 12: La structure de la méthode PEX. Source : (Le plan d'expérience, 2017).

La revue de la littérature portant sur les approches d'aide à la décision nous a conduit à explorer la méthode PEX comme méthode à appliquer, vu ses utilisations antérieures dans le domaine de l'énergie du bâtiment. Par exemple, elle a été appliquée pour prédire la consommation d'énergie ou pour l'analyse de sensibilité des facteurs influençant spécifiquement la mise en œuvre des mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments (Romani, 2015, p.93). De plus, la flexibilité de la méthode permet de tester simultanément un grand nombre de facteurs avec un nombre réduit d'expériences. Parmi ces travaux scientifiques, nous citons ceux de Rivallain (2013), Jaffal (2009), Chelala (2008) et Flifli (2006).

### **II.1.3 Formulation mathématique et terminologie des plans d'expériences (PEX)**

D'après Telford (2007, p.224), « Les données obtenues à partir d'études observationnelles ou d'autres données non collectées conformément à une approche de plans d'expériences ne peuvent établir qu'une corrélation, et non une causalité ». Elle se différencie des méthodes classiques par : à l'exemple de la méthode UFAF (un facteur à la fois) ne permet pas la détection d'effets de combinaisons entre les facteurs et leurs interactions ; les méthodes classiques effectuent les expériences relatives à toutes les combinaisons possibles entre les modalités de toutes les variables et donc un grand nombre d'expériences à réaliser avec des données et un temps important à gérer. La méthode permet également l'optimisation des ressources en termes de coût, matériel et d'effort.

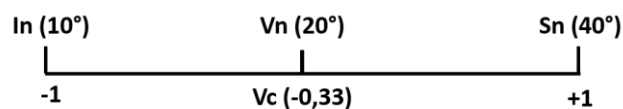
Les notions clés à identifier sont : facteurs, niveaux, réponses et interactions<sup>5</sup>, comme suit :

- a) Les facteurs : classés en variables contrôlables et non contrôlables et peuvent être quantitatifs ou qualitatifs<sup>6</sup>.
- b) Les niveaux : les facteurs sont utilisés en format codé de domaine d'étude pour permettre d'avoir le même domaine de variation [-1, +1] pour chaque facteur. Ces bornes supérieures et inférieures appelés respectivement niveau bas (-1) et niveau haut (+1). Par exemple, nous considérons 5 niveaux de température °C [140, 160, 180, 200, 220] et le domaine d'étude est : [140 ; 220].

Vc : valeur codée.

Vn : valeur naturelle.

Sn : limite supérieure du domaine d'étude de la variable.



Équation 1 : Equation de valeur codée.

$$V_c = \frac{2V_n - (S_n + I_n)}{(S_n - I_n)}$$

Équation 2: Equation de la valeur naturelle

$$V_n = \frac{V_c (S_n - I_n) + (S_n + I_n)}{2}$$

- c) Les interactions : Se produisent lorsque l'impact d'un facteur qui dépend de la valeur d'un second facteur.
- d) La réponse : nommée la fonction objectif. Les typologies de modèles (Y) de cette méthode<sup>7</sup> :

- Modèle linéaire :  $Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i$  Équation 3

- Modèle purement quadratique :  $Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_{ii} \cdot X_i^2$  Équation 4

- Modèle linéaire avec interaction :

-  $Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j$  Équation 5

- Modèle quadratique complet :

<sup>5</sup> D'après Dr. Mohamed Skander, DAAS-UFMC1. Université des Frères Mentouri Constantine 1.

<sup>6</sup> Voir annexe 02.

<sup>7</sup> Romani, 2015, p.92-93.



$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} \cdot X_i^2 \quad \text{Équation 6}$$

Où :

Y est la réponse (fonction objectif).

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

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

### II.1.4 Types de plans d'expériences (PEX)

Dans le tableau ci-dessous, nous résumons les différents types de plans et leurs cas d'utilisation. Le choix d'un plan expérimental dépend des objectifs de l'expérience, du nombre de facteurs à étudier et de la quantité de ressources disponibles.

Tableau 1: Typologies des plans d'expériences.

Type	Définition
Plan factoriel complet	C'est le plus courant et facile à construire. La matrice étudie toutes les combinaisons possibles des facteurs avec $2^k$ nombre d'expériences (k est le nombre de facteurs avec deux niveaux [-1, +1] pour chacun) ou $n^k$ pour le cas général (avec n : nombre de niveaux). (Romani, 2015, p.90) Voir annexe 03 pour un exemple de construction d'un plan factoriel complet $2^3$ .
Plan factoriel fractionnaire	Conçu pour réduire le nombre important de combinaisons d'un plan complet sous l'hypothèse de négliger toutes les interactions d'ordre trois et toutes celles d'ordre plus élevé sous satisfaction du critère d'orthogonalité. A l'exemple des plans fractionnaires nous citons les tables de Taguchi. (Ibid., p.91)
Plan pour surface de réponse	A l'exemple des plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehert (Ibid., p91-92). Ils sont utilisés pour la modélisation quadratique des phénomènes étudiés (nécessité de passage des modèles au second degré) d'après Dean et al (2015).
Plan D-optimal	C'est la réponse au problème avec contrainte ainsi que pour la réduction maximum de nombre des combinaisons. Cela est fait par la maximisation du déterminant de la matrice (satisfaction du critère d'optimalité). (Goupy, 2013) in (Romani, 2015, p.92)
Plan de mélange	D'autres types sont identifiés selon le cas spécifique à l'exemple des plans de mélange en cas d'existence des proportions entre facteurs. (Relation de dépendance à l'exemple du processus pharmaceutique)

### II.1.5 Objectifs d'utilisation des plans d'expériences (PEX)

Le tableau 2 résume les objectifs de l'utilisation des plans d'expériences, comme suit :

Tableau 2: Objectifs des plans d'expériences.

Comparaison d'alternatives	Objectif de criblage	Objectif de modélisation
Elle permet le choix judicieux d'une des alternatives si la différence entre elles est significative.	En cas de présence d'un nombre important de facteurs d'entrée, les PEX permettent de détecter les facteurs critiques et éliminer ceux qui possèdent peu ou pas d'effets sur la réponse.	Pour utiliser et exploiter des modèles mathématiques pour répondre à plusieurs sous objectifs : 1/ Objectif de prédiction : le modèle mathématique obtenu peut être utilisé pour prédire une réponse à un point quelconque dans les limites des domaines expérimentaux. 2/ Objectif d'optimisation : déterminer les valeurs d'entrées pour obtenir la sortie souhaitée du processus (exemple : maximiser le rendement d'un processus, de minimiser le temps de traitement pour fabriquer un produit ou atteindre une spécification du produit ou résultat.

Ce travail s'intéresse à l'application de la méthode des plans d'expériences pour des fins d'optimisation des besoins en chauffage et en climatisation pour un bâtiment résidentiel (logement F3 AADL). *Le problème d'optimisation cherchant à minimiser, maximiser ou obtenir une valeur cible d'une fonction peut être formulé en mathématique sous contraintes*<sup>8</sup>, en :

*Minimiser*  $f(x) = (f_i(x))$  (i fonction à optimiser)

*Tel que*  $g(x) \leq 0$  (m contraintes d'inégalité)

*et*  $h(x) = 0$  (p contraintes d'égalités)

*Avec*  $x \in R^n$ ,  $f(x) \in R^k$ ,  $g(x) \in R^m$ ,  $h(x) \in R^p$

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

## II.2 Récapitulatif du cadre de référence théorique :

L'organigramme suivant (Fig.13) résume le passage sur les travaux de recherche antérieurs qui ont abordé la méthode des plans d'expériences dans l'efficacité énergétique des bâtiments.

<sup>8</sup> Romani, 2015, p.79

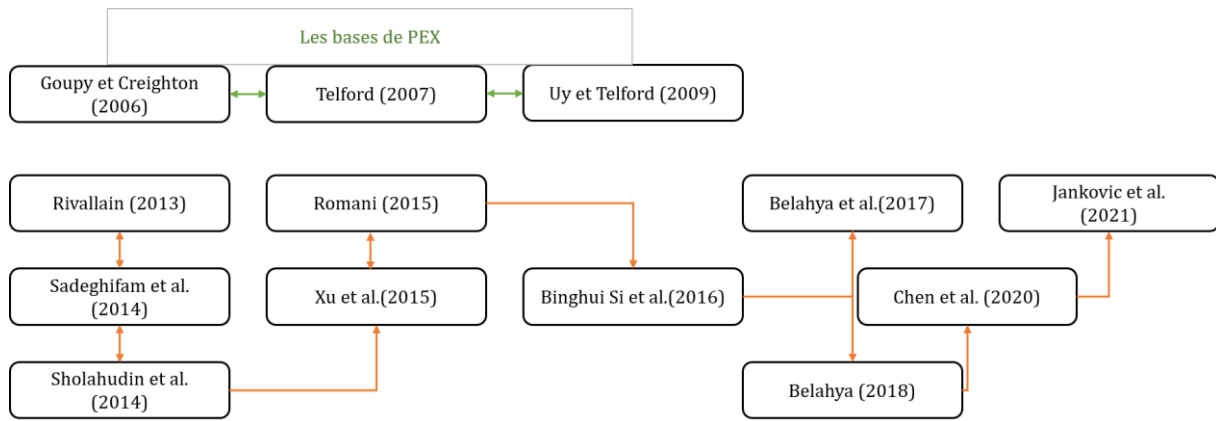


Figure 13: Récapitulatif du cadre de référence théorique. Source : Auteur, 2024.

Le tableau 3 résume les travaux de recherche relatifs à la thématique avec une discussion des résultats.

Tableau 3: Résumé des travaux relatifs à la thématique PEX. Source : Auteur, 2024.

N°	AUTEURS, ANNEE.	DISCUSSION
01	Sandeghifam et al. (2014)	Ils ont employé la méthode PEX pour évaluer et identifier les combinaisons optimales d'éléments de construction (murs, plafonds, fenêtres et températures) et la manière dont ils contribuent à une conception efficace des bâtiments, en particulier pour atteindre des économies optimales de charge de refroidissement dans un cadre résidentiel tropical. Les résultats ont révélé que, pour les régions tropicales, les éléments les plus importants pour réduire efficacement la consommation d'énergie sont les matériaux de plafond, suivis par les matériaux de murs extérieurs et les températures intérieures.
02	Jun Xu et al. (2015)	Ils ont développé une approche systématique visant à minimiser les charges de chauffage et refroidissement pour l'optimisation des facteurs de conception des bâtiments. Ils ont utilisé un sous-ensemble de toutes les combinaisons possibles de facteurs (plan factoriel fractionnaire) et ont évalué 10 facteurs (isolation des murs et fenêtres, hauteur des plafonds, coefficient de gains de chaleur -FS-, l'orientation, etc.). Les expériences sont réalisées avec un logiciel STD mené d'abord sous expérience de criblage pour filtrer une liste réduite des facteurs importants (liés à la performance des fenêtres, la perméabilité à l'aire...). Le front de Pareto a été utilisé pour l'optimisation après avoir éliminé les facteurs non significatifs.  Le front de Pareto a été tracé à l'aide de l'algorithme NSGA-2 dans le langage R pour identifier les valeurs optimales des facteurs sous forme d'équations pour chaque segment du front, pour les besoins minimums en chauffage et en refroidissement. Les auteurs ont consolidé leurs résultats en incorporant le coefficient de performance COP des systèmes HVAC en tant que facteur actif pour conclure que les facteurs

03	Romani. (2015)	<p>passifs et actifs doivent être simultanément pris en compte et associés pour l'obtention des meilleures réponses.</p> <p>Il a développé des modèles polynomiaux en utilisant la méthode PEX et TRNSYS pour prédire les charges en chauffage et de refroidissement, les besoins en énergie finale et le confort thermique estival. Suite à cela, une étude paramétrique de ces fonctions polynomiales a été menée en utilisant le front de Pareto pour identifier les solutions optimales pour la conception de nouveaux bâtiments dans différentes zones climatiques au Maroc, qui a un climat similaire à celui de l'Algérie. Cette étude a établi les meilleures pratiques, telles que l'amélioration de la performance de l'enveloppe du bâtiment, l'intégration de l'étude économique et de l'analyse du cycle de vie pour gérer la consommation d'énergie.</p>
04	Belahya. (2018)	<p>La méthode est appliquée pour le cas de logement individuel à Ouargla (climat aride). L'étude visait à recommander un modèle polynomial pour minimiser la consommation énergétique saisonnière. Les facteurs d'entrée sont : la transmission thermique à travers les murs U-mur, U-toit, U-sol, U-fenêtre, le rapport fenêtre/mur Nord WWR-N, WWR-S, WWR-W-E, la hauteur sous plafond, la surface au sol, le facteur de forme, le coefficient d'absorption solaire des murs et du toit. Deux modèles prédictifs sont développés.</p> $\begin{aligned} \text{HEAT} = & 52.64 - 4.70 U_{\text{wall}} - 0.46 U_{\text{roof}} - 4.08 U_{\text{ground}} - 3.02 C_{\text{Wall}} + 1.36 C_{\text{Roof}} \\ & + 2.14 U_{\text{wind}} + 3.06 \text{WWR\_N} + 2.90 \text{WWR\_S} + 2.31 \text{WWR\_E} - 3.15 \text{WWR\_W} + 4.51 \text{CH} \\ & + 9.19 \text{Area} + 3.40 \text{FS} \end{aligned}$ $\begin{aligned} \text{COOL} = & 80.12 + 0.53 U_{\text{wall}} + 3.32 U_{\text{roof}} + 3.45 U_{\text{ground}} + 1.59 C_{\text{Wall}} + 3.69 C_{\text{Roof}} - \\ & 3.57 U_{\text{wind}} + 3.52 \text{WWR\_N} + 1.18 \text{WWR\_S} - 0.15 \text{WWR\_E} - 1.10 \text{WWR\_W} - \\ & 3.08 \text{CH} + 15.49 \text{Area} + 1.81 \text{FS} \end{aligned}$ <p>Les résultats ont montré que les facteurs les plus influents sont : la surface et le facteur de forme respectivement, et que les charges de refroidissement sont prioritaires pour l'optimisation en raison du climat chaud de Ouargla. Les résultats sont discutés comme suit :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La surface était le facteur le plus influent sur les deux réponses (Heat, cool), avec le coefficient d'absorption solaire de la toiture. Une forme carrée a été recommandée comme forme optimale du bâtiment.</li> <li>• U-mur a réduit considérablement la consommation de chauffage de 10 kW/m<sup>2</sup>.an mais avec un impact limité sur le refroidissement.</li> <li>• U-sol a un effet inverse sur la charge de refroidissement mais il réduit notablement la consommation en chauffage d'environ 8 kW/m<sup>2</sup>.an.</li> </ul>

### II.2.1 Lecture critique :

L'état de l'art révèle que la méthode des plans d'expériences est largement utilisée dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels. Ses principaux atouts

sont sa capacité à étudier simultanément l'influence de nombreux facteurs sur une ou plusieurs réponses, tout en réduisant le nombre d'expériences nécessaires. Cette flexibilité permet d'optimiser les conceptions en identifiant les combinaisons optimales de facteurs et en révélant leurs interactions. Cependant, certaines limites apparaissent. Tout d'abord, l'optimisation devient en présence de facteurs contradictoires affectant les réponses d'une manière opposée. La plupart des études se concentrent sur les facteurs liés à l'enveloppe du bâtiment sans la prise en compte des autres paramètres de confort des occupants à l'exemple de température intérieure de confort et le débit minimal d'air neuf. Enfin, très peu de travaux de recherche sur cette thématique sont appliqués pour le cas de l'Algérie, un pays-continent avec une richesse en diversité climatique qui nous offre une piste importante d'application et de développement de stratégies d'optimisation à explorer, ainsi que la comparaison des résultats des modèles avec d'autres méthodes réglementaires.

Dans la continuité de cette recherche, il serait pertinent d'aborder cette lacune en développant des modèles qui incluent à la fois des facteurs passifs, actifs et de confort de l'occupant qui seront adaptés au contexte de l'Algérie, spécifiquement Alger, et en explorant également des comparaisons de leur pertinence par rapport aux calculs de vérification réglementaire. Cela peut aboutir à la création d'un cadre général de recommandations à suivre lors de la conception des logements collectifs, en couplant les exigences réglementaires avec des modèles de calcul optimaux pour la prédiction des besoins en chauffage et en climatisation des bâtiments résidentiels.

### **II.3 Description de méthodologie appliquée :**

Cet organigramme (Fig.14) décrit la méthodologie suivie pour optimiser les besoins énergétiques de chauffage et climatisation d'un logement. La démarche commence par le choix et la modélisation d'un modèle de base (F3) qui représente les caractéristiques des éléments du bâtiment et les différents scénarios envisagés. Ce modèle de base est ensuite vérifié par rapport à la réglementation, notamment le DTR C3.2/4 relative au chauffage et à la climatisation.

Une fois le modèle de base défini, une simulation thermique dynamique est réalisée. Les facteurs d'entrée et leurs plages de variation sont alors sélectionnés judicieusement.

Pour réduire le nombre d'expériences à mener, une matrice d'expériences PEX est construite. Ces expériences sont effectuées via le logiciel Design Builder. Une analyse de

variance permet d'identifier les paramètres influents parmi les résultats obtenus. Des modèles polynomiaux sont alors identifiés pour caractériser les besoins énergétiques en fonction des facteurs clés.

Grace à ces modèles, les solutions optimales minimisant les besoins de chauffage et climatisation sont déterminées par l'utilisation du front de Pareto. Un logiciel statistique est utilisé pour comparer ces résultats aux calculs réglementaires (DTR C3.2/4) et à la simulation thermique initiale. Enfin, des recommandations générales sont formulées pour la conception des logements collectifs en Algérie sur la base de cette approche.

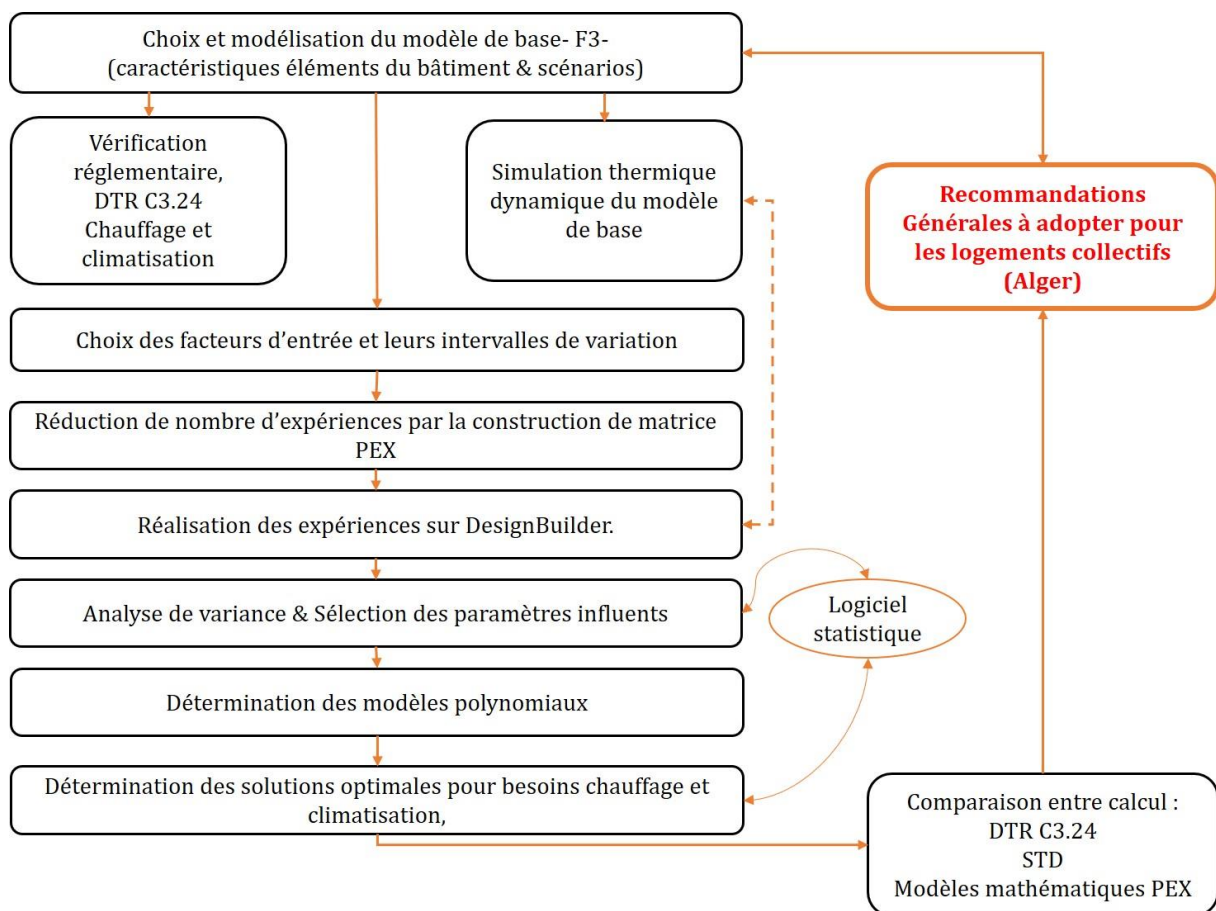


Figure 14: Organigramme descriptif de la méthodologie appliquée. Source : Auteur, 2024.

## II.4 Présentation Cas d'étude : Logement AADL

### II.4.1 Description du bâtiment :

Le bâtiment sélectionné pour notre étude est un logement F3 AADL similaire aux constructions des logements collectifs de nos jours. Situé à la cité 1520 Ouled Fayet, Daïra de Cheraga, Alger. Avec une superficie de 80.62m<sup>2</sup> et surface habitable de 71.92m<sup>2</sup>. Le gabarit d'immeuble est de R+5, nous s'intéressons à l'appartement F3 du dernier étage.



Les façades sont orientées Sud et Est. Le plan de masse (Fig.15), le plan 2D (Fig.17) et la façade principale (Fig.16) sont présentés ci-dessous :



Figure 15: Situation, cité 1520 AADL Ouled Fayet. Source : Google Earth, 2024.



Figure 16: Façade principale. Source : locataire Serghine, 2024.

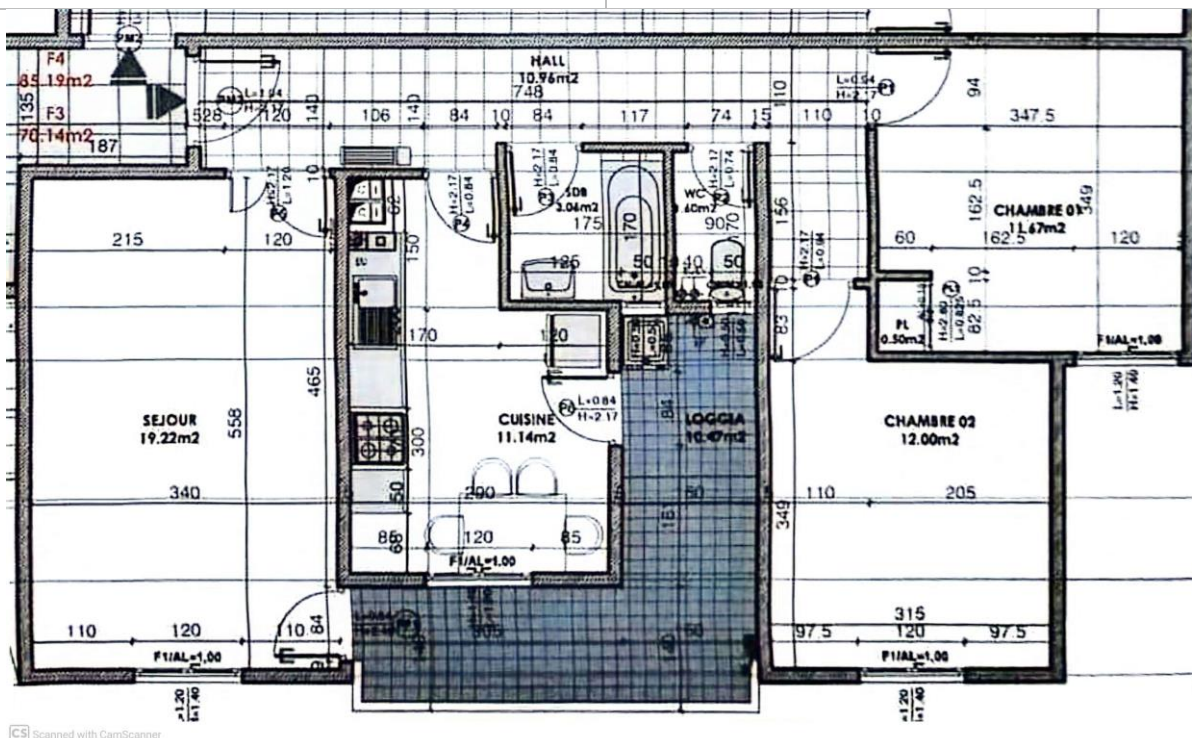


Figure 17: Plan courant de l'appartement F3. Source : CNERIB, 2024.

Les propriétés thermiques des éléments du logement F3 étudié, les paramètres d'entrée pour la modélisation ainsi que, les scénarios (d'occupation, chauffage et climatisation) sur le logiciel DesignBuilder sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 4 : Programme surfacique du logement F3.

Espace	Séjour	Cuisine	Hall	Loggia	Chambre 1	Chambre 2	WC	SDB
Surface (m <sup>2</sup> )	19.22	11.14	10.96	10.47	11.67	12.00	1.60	3.06

Tableau 5 : Propriétés thermiques des éléments de l'enveloppe.

N	Élément	Composition	Épaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m-K)	Valeur U (W/m <sup>2</sup> -K)
1	Mur extérieur	Enduit ciment	0.03	1.40	2.99
		Béton plein	0.15	1.75	
		Enduit plâtre	0.02	0.35	
2	Toiture	Enduit plâtre	0.01	0.35	0.48
		Béton plein	0.15	1.75	
		Polystyrène expansé	0.08	0.046	
		Enduit mortier	0.01	1.15	
		Étanchéité en feutres bitume	0.01	0.23	
3	Cloison intérieur	Enduit plâtre	0.02	0.35	2.55
		Béton plein	0.10	1.75	
		Enduit plâtre	0.02	0.35	
4	Fenêtre/ porte-fenêtre				2

Tableau 6 : Paramètres d'entrée pour la simulation thermique dynamique.

	Paramètres d'entrée	Valeur
<b>Enveloppe</b>	Mur extérieur	2.99
	Toiture	0.48
	Fenêtre	2
	Perméabilité à l'air (ac/h)	0.7
	Facteur solaire vitrage	0.60
	<b>Occupation</b>	Densité (personne/m <sup>2</sup> ) Planning
<b>Eclairage</b>	Intensité (W/m <sup>2</sup> )	15
<b>Ventilation naturelle &amp; HVAC</b>	Débit d'air minimal (l/s-personne)	8.28
	Température de consigne	Chauffage : 22°C/ 24-28°C climatisation
	COP/ EER	0.90/ 1.1
	Fonctionnement	Annexe 05.



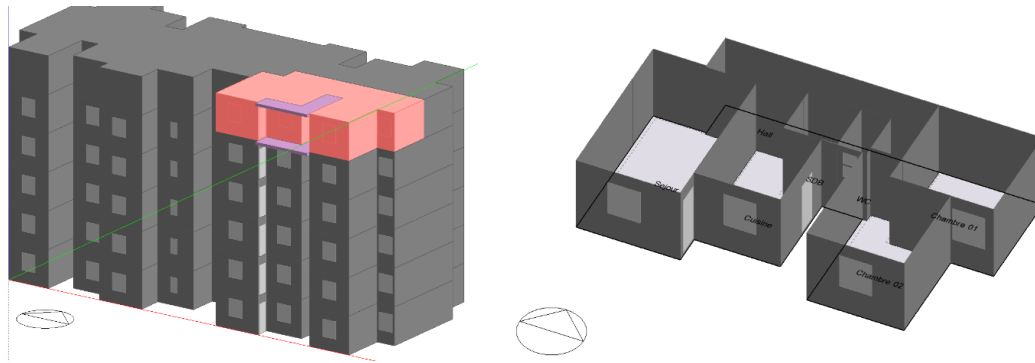


Figure 18: Modélisation de l'immeuble et le logement interface DesignBuider. Source : Auteur : 2024.

## **II.4.2 Structure de la vérification réglementaire sous logiciel LogRT :**

### **II.4.2.1 Calcul des déperditions calorifiques :**

Nous résumons les étapes de calcul numérique des déperditions (Fig.19) et apports calorifiques (Fig.20) en hiver et en été en organigrammes ci-dessous. Nous citons les données nécessaires comme l'enveloppe du bâtiment (les murs, avec les différentes couches et les propriétés thermo physiques et l'orientation de chaque mur. Les informations sur les bâtiments et les équipements utilisé (apport internes, conduites, machines...) sont saisis. Ces données sont stockées dans la base de données statiques pour être utilisé par l'utilisateur du logiciel. Les données climatiques de la zone A sont prises en considération (Cette zone est délimitée par la mer au nord et les hautes plaines de l'intérieur au sud avec une température extérieure de base est de 3 °C.) pour les deux calculs selon la classification thermique des zones en Algérie.

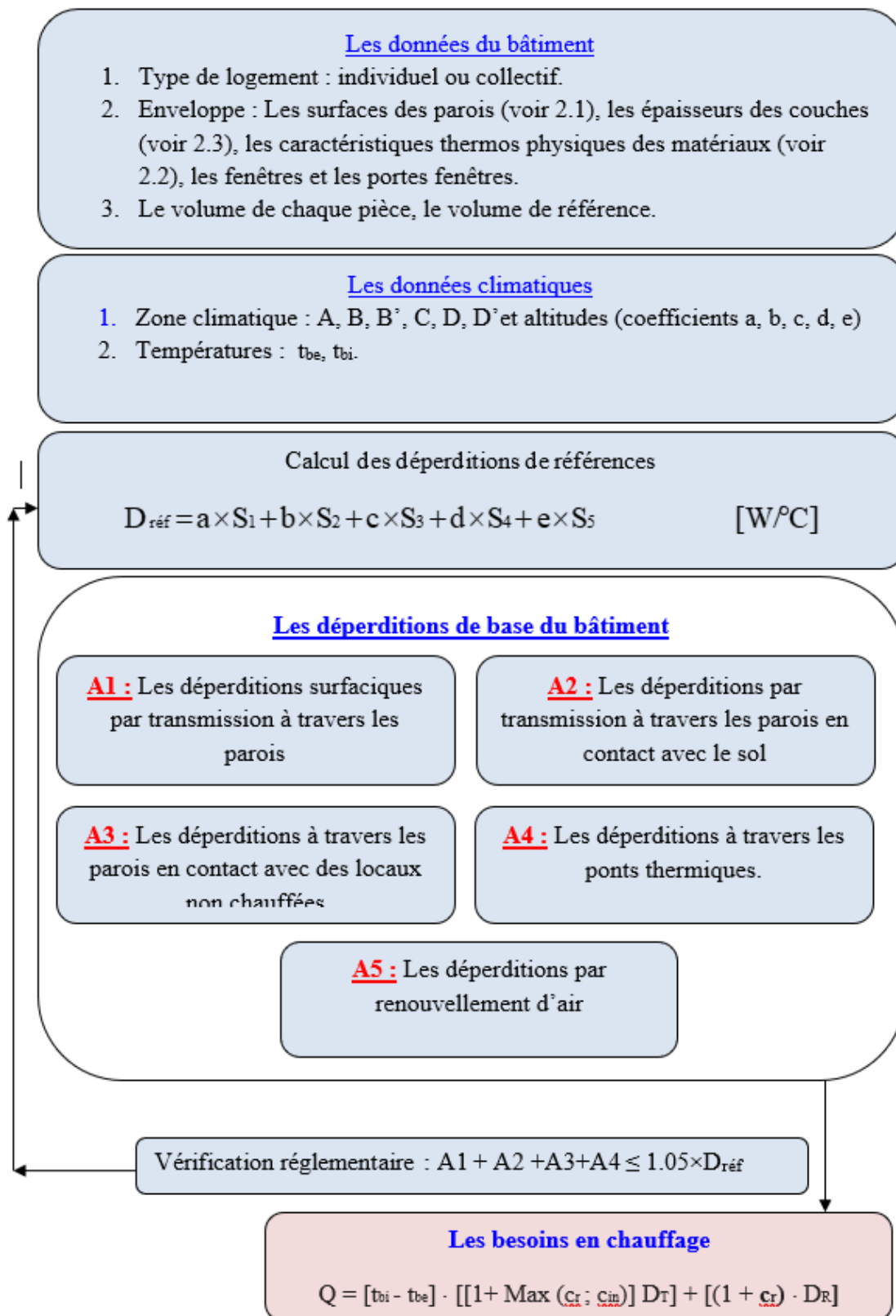


Figure 19: Organigramme des étapes de calcul réglementaire chauffage. Source : CNERIB.

#### **II.4.2.2 Calcul des apports calorifiques :**

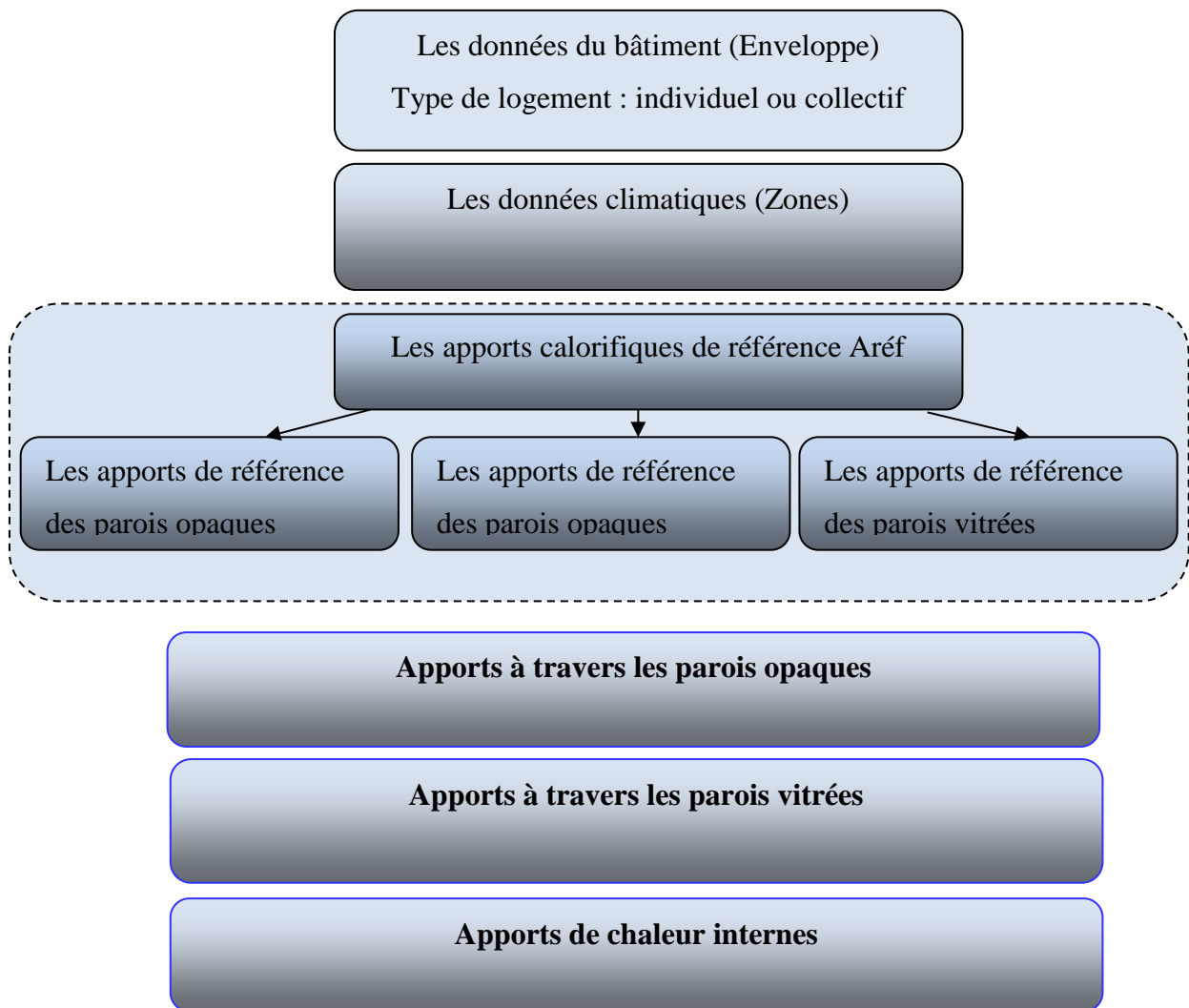


Figure 20: Organigramme général des étapes de calcul des apports calorifiques. Source : CNERIB.

#### **II.4.3 Application de la méthode plans d'expériences :**

La réalisation des expériences sur Design Builder passe d'abord par le choix des paramètres d'entrée et leurs plages de variation. Ensuite, nous passons à la construction du plan adéquat pour la réalisation des expériences.

##### **II.4.3.1 Choix des facteurs et leurs intervalles :**

Les facteurs de conception choisis et leurs intervalles de variation minimales et maximales pour l'application de la méthode PEX sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 7 : les intervalles de variation minimales et maximales des facteurs.

Facteur	(-1)	(+1)	Unité
U mur	0,35	3,286	W/m <sup>2</sup> . K
U Toiture	0,349	1,895	W/m <sup>2</sup> . K
U fenêtre	1,2	5	W/m <sup>2</sup> . K
WWR_ E	25%	50%	%
WWR_ S	25%	50%	%
FS vitrage	0,372	0,949	/
Débit minimal d'air neuf (logement F3)	4,14 75	8,28 150	l/s-personne m <sup>3</sup> /h
Taux d'infiltration d'air	0,36	1,15	V/h
COP chauffage	0,88	3,73	/
COP climatisation	1,1	3,5	/

Les intervalles de chaque paramètre sont représentés par leurs niveaux (-1) et (+1) en coordonnées centrées réduites. Les valeurs de coefficients de transmission thermiques des murs et des toitures sont extraites de l'annexe B.12 du DTR, ainsi qu'une base de données des différents systèmes de l'enveloppe crée par l'auteur en se basant sur l'annexe A.2 du DTR (p158) ; avec les données citées dans les travaux scientifiques antérieurs de Karchi et al (2017), Djebbar et al (2018), Bencheikh (2019) et Meftah et Mahri (2022).

Les valeurs de débit minimal d'air neuf pour un logement F3 sont extraites du tableau 7.1 et 7.2 (p. 83 DTR) relatives au débit extrait minimal et maximal de référence pour les locaux à usage d'habitation. Les caractéristiques (-1) relatives au vitrage sont référencées à l'avis technique délivré par le CNERIB des systèmes de fenestration de l'entreprise OXXO.

Les valeurs de taux d'infiltration d'air, le COP de chauffage et le EER de climatisation sont référencées par le travail de Romani (2015) et le guide de la RTB+ du projet Taka Nadifa, respectivement.

### **II.4.3.2 La construction de la matrice Plan d'expériences :**

La réalisation des expériences passe d'abord par la réduction de nombre important des expériences (  $2^{10} = 1024$ ) par l'utilisation d'un plan factoriel fractionnaire de la résolution IV qui permet d'étudier tous les facteurs mais dont le nombre d'essais est réduit avec une fraction de 1/16 (  $2^{10-4} = 64$  expériences) pour la sélection et le criblage des facteurs étudiés.

Nous présentons le plan détaillé ainsi que les résultats obtenus dans la première partie du chapitre suivant, ainsi que l'enchaînement (Fig.21) des expériences en étapes suivantes.

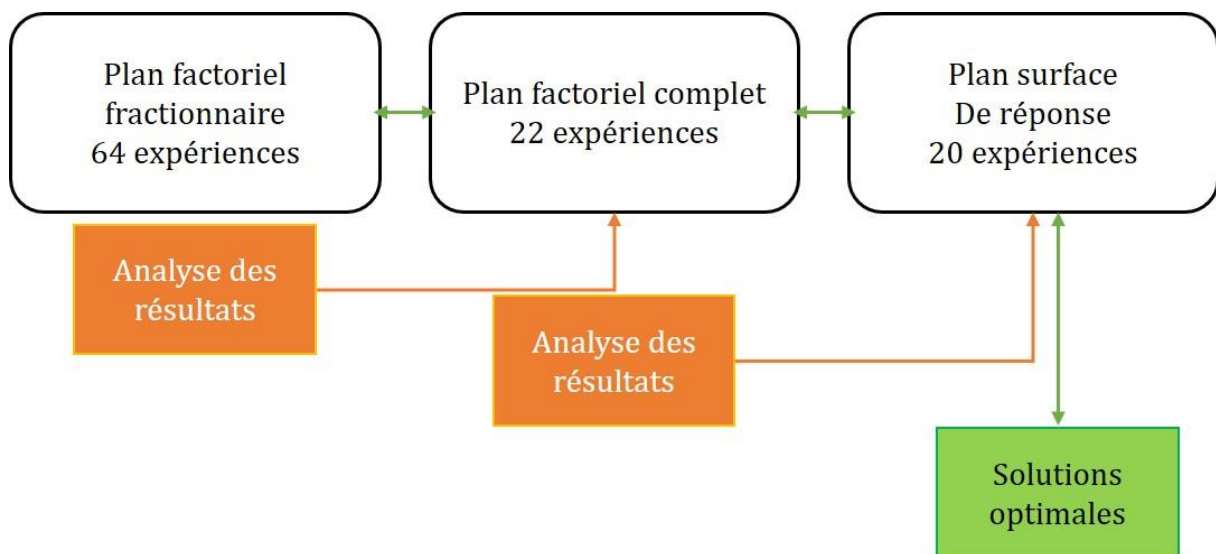


Figure 21: Enchaînement des expériences. Source : auteur, 2024.

## **II.5 Conclusion :**

Ce chapitre a présenté dans le détail la méthode à appliquer, ainsi qu'un récapitulatif de l'état de l'art des utilisations des plans d'expériences en faveur de l'efficacité énergétique des bâtiments et l'optimisation énergétique. Également, nous avons présenté le cas d'étude qui est un logement AADL F3 à Alger avec ses données et caractéristiques d'entrée, il qui sera le modèle de base pour le calcul réglementaire, la simulation thermique dynamique et la réalisation des expériences numériques selon la méthode proposée. Ce chapitre fait référence à des lectures complémentaires au niveau des annexes.

# **CHAPITRE 03 :**

## **RESULTATS**

**&**

## **DISCUSSIONS**

### III. Chapitre 03 : Résultats et Discussions

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus suite à l'application de la méthodologie basée sur les plans d'expériences pour optimiser les besoins de chauffage et de climatisation d'un logement AADL.

L'organigramme ci-dessous (Fig.22) résume la structure suivie dans la présentation des résultats, comme un appel des étapes principales de chapitre II qui sont : la vérification réglementaire vis-à-vis le DTR C3 2.4, la simulation thermique dynamique de base et la conduite des expériences selon la matrice construite.

Les résultats de la réalisation d'expériences sur DesignBuilder seront ensuite exposés à l'aide de graphique et tableaux détaillés. L'analyse de variance permettra d'identifier et de hiérarchiser les paramètres les plus influents sur les besoins énergétiques. Sur la base de ces analyses, les modèles polynomiaux prédictifs des besoins de chauffage et climatisation en fonctions des facteurs clés seront déterminés et présentés. Les solutions optimales minimisant ces besoins pour le contexte d'Alger seront alors extraites de ces modèles. Ces résultats seront comparés aux calculs réglementaires du DTR C3 2.4 ainsi qu'à la STD, mettant en évidence les avantages de l'approche par plans d'expériences.

Enfin, des recommandations pour la conception performante des logements AADL seront formulées, intégrant à la fois l'aspect réglementaires, les paramètres d'enveloppe optimisés mais également les critères de confort des occupants.

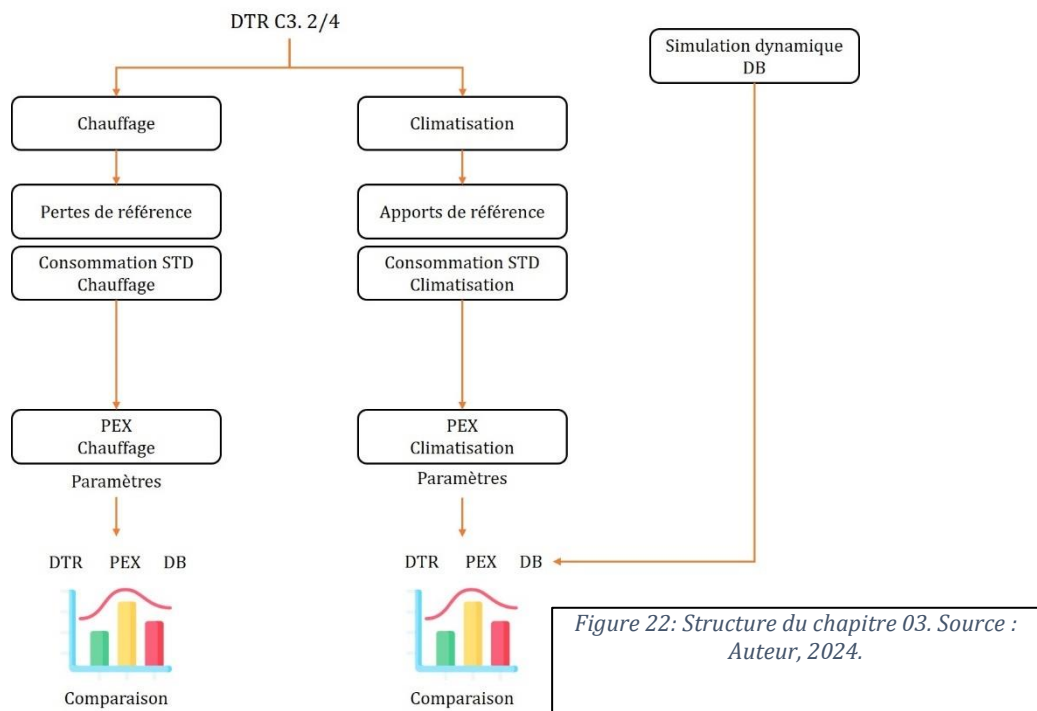


Figure 22: Structure du chapitre 03. Source : Auteur, 2024.

### III.1 Les résultats de la vérification réglementaire :

Nous avons effectué le calcul réglementaire des déperditions calorifiques en hiver et apports calorifiques en été pour identification des puissances chauffage et climatisation à l'aide d'un code de calcul développé par Dr. BOUTTOUT en langage FORTRAN sous nom « Programme LOGRT ». Les résultats sont présentés comme suit :

Tableau 8: Résultats de la vérification réglementaire d'hiver et d'été par logiciel LogRT.

Calcul chauffage	
Données du bâtiment et données climatiques	Logement en immeuble collectif Zone climatique : A
Calcul des déperditions de références	Température extérieure de base = 3.0° C Dréf_toiture= 75.35 W/° C Dréf_murs= 186.30 W/° C Dréfportes= 6.77 W/° C Dréfportes_fenêtres= 42.01 W/° C Dréf= 310.44 W/° C
Déperditions surfaciques par transmission à travers les parois	Déperditions surfaciques totale des façades : Ds_murs= 322.87 W/° C Ds_parois verticales= 296.24 W/° C Ds_fen_et_pf= 22.11 W/° C Ds_toiture= 41.33 W/°
Déperditions à travers les ponts thermiques	D_pt= 72.84 W/° C
Déperditions par renouvellement d'air	Le volume habitable : Vh= 238.63m <sup>3</sup> Nombres de pièces principales du logement : Nombre pièce= 3 pièces Le débit extrait de référence : Qvrefer= 90.00m <sup>3</sup> /h Le débit minimal d'air neuf : Qv= 143.17m <sup>3</sup> /h Le débit supplémentaire par infiltrations dues au vent : Qs= 223.54m <sup>3</sup> /h Les déperditions par renouvellement d'air : Dr= 124.68W/°C
Vérification réglementaire : A1 + A2 + A3+A4 ≤ 1.05×Dréf	D_transmission= 437.05W/°C Les déperditions totales à travers le logement : D_totale= 561.74W/°C Puissance de chauffage installée Q= 11684.74 W Puissance de chauffage de référence= 9285.18 W  <b>Le logement ne satisfait pas la vérification réglementaire</b>
Besoins en chauffage	Q= 11684.74 W



Calcul climatisation	
Données du bâtiment et données climatiques	Latitude= 36.00 Mois de calcul : Juillet
Les apports calorifiques de référence Aréf	Apports de référence des parois opaques horizontales $A_{réf,PH}$ ArefPH1= 1009.03[W] Les apports de référence des parois opaques verticales $A_{réf,PV}$ ArefPV= 1186.20[W] Les apports de référence des parois vitrées $A_{réf,PVI}$ ArefPVI= 401.89[W] Les apports calorifiques de référence Aref Aref= 2597.13[W]
Apports à travers les parois opaques	APO_POA_15h= 2922.68[W]
Apports à travers les parois vitrées	Les gains dus au gradient de température à travers les parois vitrées extérieurs AVT_PVE_15h= 185.64[W] Les gains dus au rayonnement des parois vitrées extérieurs AVE= 463.21[W]
Apports de chaleur internes	APO_int= 10452.04[W]
Apports de chaleur par introduction d'air extérieur	APO_int_air_ext_15= 1618.81[W]
Vérification réglementaire	Aref = 2597.13 APO_POA_15h+AVT_PVE_15h+AVT_t_15h+AVE_15h= 3571.54  <b>Le logement ne satisfait pas la vérification réglementaire</b>
Besoins en climatisation	3571.54 W

### III.2 Les résultats de la simulation thermique dynamique initiale :

Après la modélisation du logement avec l'ensemble des scénarios appliqués, nous présentons les résultats (Fig.23 et tableau 9) en besoins de chauffage et climatisation comme suit :

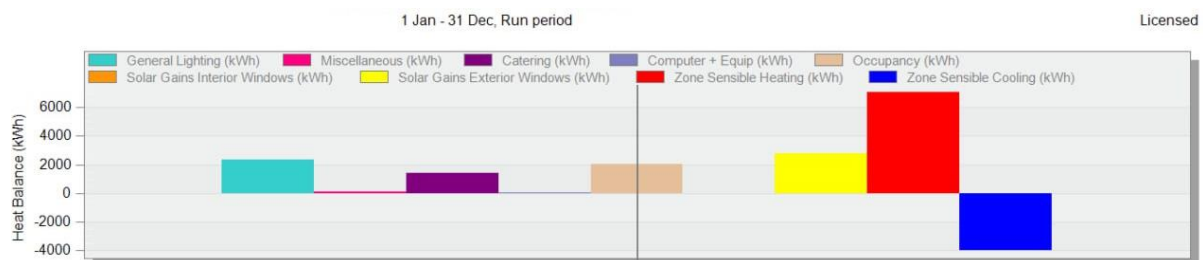


Figure 23: Bilan énergétique du logement F3. Source : DesignBuilder.

Tableau 9: Résultats de la simulation thermique dynamique du logement F3.

	Energie	Valeur
Besoin en Chauffage	Dépense thermique	10.43 kW
	Puissance de chauffage à installer	13.01 kW
	Consommation annuelle	7057.39 kWh
	Besoins/m <sup>2</sup>	101.44 kW/m <sup>2</sup> .an
Besoin en Climatisation	Apports	4.03 kW
	Puissance de climatisation	4.63 kW
	Consommation annuelle	2940.25 kWh
	Besoins/m <sup>2</sup>	40.88 kW/m <sup>2</sup> .an

Nous observons que les résultats de la simulation thermique dynamique (tableau 9) se rapprochent avec ceux de calcul réglementaire (tableau 8). En termes de puissance de chauffage, c'est 11.68kW et 13.01kW respectivement. Également pour la climatisation, le calcul réglementaire estimé à 3.57kW et 4.63kW. Le logement ne satisfait pas la vérification réglementaire à cause des coefficients thermiques très élevées de l'enveloppe notamment les murs extérieurs.

### III.3 Les résultats des expériences selon PEX :

En se demarrant du modèle de base sur DesignBuilder (Energy Plus), nous obtenues les résultats en besoins de chauffage et climatisation chaque fois nous appliquons un ensemble de variables sur le modèle dans l'objectif est en premier lieu, de cribler les facteurs les plus influents sur la réponse. Le tableau ci-dessous regroupe les résultats de 64 simulations.

Tableau 10: Résultats de 64 simulations selon le plan élaboré. Source : Auteur, 2024.

U mur	U toit	U f	WWR-E	WWR-S	FS	Débit minim air neuf	Taux infiltration	COP-ch	EER-clim	CH KWh/m <sup>2</sup>	Clim KWh/m <sup>2</sup>
1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	156,81	36,43
1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	190,47	36,81
1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	91,31	37,38
-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	56,1	34,38
-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	24,93	34,57
1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	123,3	39,56
-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	15,74	39,99
-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	107,19	27,99
1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	93,97	37,01
-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	114,91	38,58
1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	95,58	38,54
-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	62,14	36,15
1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	186,91	41,8
1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	118,39	39,87
1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	124,68	39,06
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	115,7	40,26
1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	73,16	47,28
-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	23,49	35,135
-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	57,81	33,84
-1	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	140,57	30,79
-1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	93,79	32,03
1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	108,78	48,78
1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	138,33	41,46
-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	112,18	26,85
-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	54,4	38,24
-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	105,31	28,43
1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	90,55	40,51
-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	28,91	33,35
-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	135,88	28,8
-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	29,09	32,75
1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	114,07	42,61
-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	61,97	36,76
1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	94,25	39,03
1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	79,21	45,28
-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	21,82	43,16
-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	19,33	45,28
-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	141,1	30,23
-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	121,19	36,69
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	188,36	38,79
1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	107,41	44,44
1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	181,55	40,23
1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	158,27	33,86
-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	133,02	31,78
-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	100,37	34,46
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	182,15	43,2
-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	39,52	47,32
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	160,89	33,59
1	1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	151,93	37,76
-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	100,22	30,24
1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	113,27	46,38
-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	137,81	28,37
-1	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	128,45	33,43
1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	199,04	36,07
1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	193,09	36,53
1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	85,98	42,14
-1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	50,78	40,26
1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	197,58	36,48
1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	144,86	39,93
-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	44,52	44,91
-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	111,59	27,42
-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	19,94	37,68
1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	161,91	34,78
-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	96,22	36,16
1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	160,45	35,18

### ***III.3.1 Analyse de variance et sélection des paramètres influents :***

Ces données sont ensuite traitées par un logiciel statistique pour la sélection des paramètres influents pour les besoins de chauffage et les besoins de climatisation (les réponses Y), séparément.

#### ***III.3.1.1 Besoins en chauffage :***

L'analyse de variance ANOVA permet l'identification des facteurs significatifs basée sur l'effet du facteur selon la valeur P-value. Si cette dernière est inférieure de 0.05, le facteur est considéré significatif. (Montgamery, 2009) in (Sadeghifam, 2014). Le tableau ci-dessous présente les résultats de l'analyse pour les besoins en chauffage :

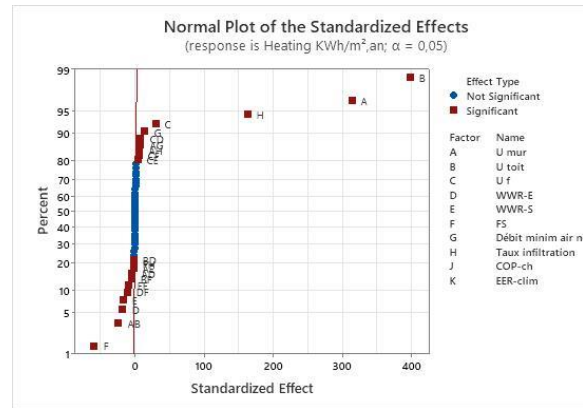
Les effets linéaires :

- U mur, U toit, WWR-E, WWR-S, FS, Débit minimal d'air neuf et le taux d'infiltration ont tous un P-value= 0.00. Donc ils sont statistiquement significatifs et ont un impact important sur la réponse.
- Le COP et EER-clim : P-value= 0.951 et 0.863 respectivement, indiquant une non-signification.

Les interactions à deux voies :

- Les interactions comme U mur& U toit, U mur& WWR-E, U mur& taux d'infiltration, U toit& WWR-E, Uf & WWR-S : possèdent des valeurs P de 0.00 indiquant qu'ils sont statistiquement influents.

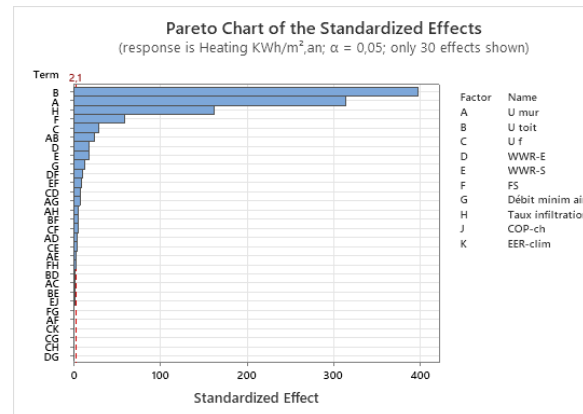
La probabilité de chaque effet est montrée dans la figure de graphe des effets standardisés. Les effets qui se situent le long de la ligne sont négligeables, tandis que les effets significatifs sont éloignés de la ligne. Les effets jugés importants sont ceux causés par : B (U toit), A (U mur), H (Taux d'infiltration) et F (facteur solaire). Le front de Pareto confirme cette classification des facteurs selon la ligne rouge en pointillés à 2.10 représente le seuil de signification statistique. Le graphe montre que les



#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	49	163850	3343,9	5916,36	0,000
Linear	10	163237	16323,7	28881,57	0,000
U mur	1	55928	55927,5	98952,98	0,000
U toit	1	89423	89423,4	158217,55	0,000
U f	1	494	493,5	873,16	0,000
WWR-E	1	190	190,2	336,46	0,000
WWR-S	1	176	176,0	311,45	0,000
FS	1	1996	1995,9	3531,28	0,000
Débit minim air neuf	1	105	105,2	186,07	0,000
Taux infiltration	1	14925	14924,9	26406,74	0,000
COP-ch	1	0	0,0	0,00	0,951
EER-clim	1	0	0,0	0,03	0,863
2-Way Interactions	39	614	15,7	27,84	0,000
U mur*U toit	1	335	334,5	591,88	0,000
U mur*U f	1	1	1,4	2,47	0,138
U mur*WWR-E	1	12	12,3	21,77	0,000
U mur*WWR-S	1	4	3,9	6,90	0,020
U mur*FS	1	1	0,6	1,10	0,313
U mur*Débit minim air neuf	1	33	33,3	58,96	0,000
U mur*Taux infiltration	1	22	21,7	38,34	0,000
U mur*COP-ch	1	0	0,0	0,00	0,969
U mur*EER-clim	1	0	0,0	0,01	0,932
U toit*U f	1	0	0,0	0,05	0,819
U toit*WWR-E	1	3	3,2	5,70	0,032
U toit*WWR-S	1	1	1,2	2,17	0,163
U toit*FS	1	15	15,1	26,77	0,000
U toit*COP-ch	1	0	0,0	0,00	0,977
U toit*EER-clim	1	0	0,0	0,00	0,966
U f*WWR-E	1	35	35,1	62,06	0,000
U f*WWR-S	1	10	9,7	17,11	0,001
U f*FS	1	14	14,3	25,31	0,000
U f*Débit minim air neuf	1	0	0,5	0,84	0,376
U f*Taux infiltration	1	0	0,4	0,69	0,420
U f*COP-ch	1	0	0,0	0,08	0,784
U f*EER-clim	1	1	0,6	1,08	0,317
WWR-E*WWR-S	1	0	0,1	0,16	0,696
WWR-E*FS	1	69	69,3	122,55	0,000
WWR-E*Débit minim air neuf	1	0	0,3	0,45	0,515
WWR-E*Taux infiltration	1	0	0,0	0,02	0,896
WWR-E*FS	1	50	50,5	89,32	0,000
WWR-S*Débit minim air neuf	1	0	0,0	0,06	0,809
WWR-S*Taux infiltration	1	0	0,2	0,29	0,601
WWR-S*COP-ch	1	1	0,9	1,64	0,221
WWR-S*EER-clim	1	0	0,1	0,25	0,623
FS*Débit minim air neuf	1	1	0,6	1,13	0,307
FS*Taux infiltration	1	4	3,6	6,45	0,024
FS*COP-ch	1	0	0,0	0,01	0,912
FS*EER-clim	1	0	0,0	0,01	0,917
Débit minim air neuf*COP-ch	1	0	0,0	0,02	0,896
Débit minim air neuf*EER-clim	1	0	0,0	0,01	0,927
Taux infiltration*COP-ch	1	0	0,0	0,05	0,822
Taux infiltration*EER-clim	1	0	0,0	0,00	0,982
Error	14	8	0,6		
Total	63	163858			

Figure 24: (a) : Analyse de variance, (b) : graphe des effets standardisés et (c) graphe de front de Pareto. Source : Auteur, 2024.



facteurs B, A, H et F indiquant leurs effets sur la réponse « besoins chauffage kWh/m<sup>2</sup>.an.

**III.3.1.2 Besoins en climatisation :**

Les effets linéaires :

- Les facteurs U mur, U toit, Uf, WWR-E, WWR-S et FS sont des P-values de 0.00 indiquant qu'ils sont statistiquement significatifs et ont un impact sur la réponse.
- Le débit minimal d'air neuf, le taux d'infiltration, COP-ch et le EER : ces facteurs sont des P-values supérieures à 0.05 (0.278, 0.00, 0.659 et 0.65 respectivement) indiquant qu'ils ne sont pas statistiquement influents, à l'exception de taux d'infiltration qu'est significatif.

Les interactions :

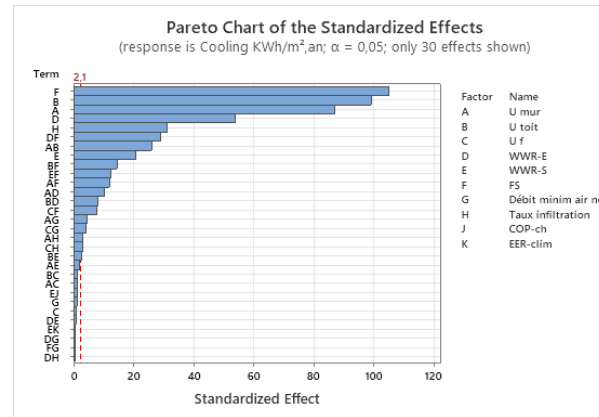
- U mur, U toit, U mur & WWR-E, U mur & WWR-S et toutes les combinaisons ayant un P-value entre 0.00 et 0.05 sont significatifs.
- D'autres combinaisons contenant des effets linéaires supérieurs à 0.05 sont par conséquent non significatifs (taux d'infiltration inclus).



**Analysis of Variance**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	49	1743,32	35,578	715,23	0,000
Linear	10	1627,44	162,744	3271,68	0,000
U mur	1	375,41	375,415	7547,05	0,000
U toit	1	488,16	488,161	9813,62	0,000
U f	1	0,04	0,036	0,72	0,410
WWR-E	1	145,19	145,187	2918,74	0,000
WWR-S	1	21,25	21,246	427,12	0,000
FS	1	548,76	548,760	11031,85	0,000
Débit minim air neuf	1	0,06	0,063	1,28	0,278
Taux infiltration	1	48,55	48,555	976,11	0,000
COP-ch	1	0,01	0,008	0,16	0,699
EER-clim	1	0,01	0,010	0,21	0,655
2-Way Interactions	39	115,88	2,971	59,73	0,000
U mur*U toit	1	33,49	33,488	673,22	0,000
U mur*U f	1	0,08	0,079	1,60	0,227
U mur*WWR-E	1	5,07	5,071	101,94	0,000
U mur*WWR-S	1	0,20	0,195	3,93	0,068
U mur*FS	1	7,15	7,146	143,65	0,000
U mur*Débit minim air neuf	1	1,07	1,070	21,51	0,000
U mur*Taux infiltration	1	0,50	0,503	10,12	0,007
U mur*COP-ch	1	0,01	0,012	0,24	0,631
U mur*EER-clim	1	0,00	0,000	0,00	0,998
U toit*U f	1	0,10	0,097	1,96	0,184
U toit*WWR-E	1	3,34	3,337	67,09	0,000
U toit*WWR-S	1	0,34	0,344	6,92	0,020
U toit*FS	1	10,42	10,421	209,49	0,000
U toit*COP-ch	1	0,01	0,008	0,17	0,691
U toit*EER-clim	1	0,02	0,015	0,31	0,586
U f*WWR-E	1	0,01	0,010	0,19	0,667
U f*WWR-S	1	0,00	0,000	0,00	0,958
U f*FS	1	3,00	3,004	60,38	0,000
U f*Débit minim air neuf	1	0,82	0,820	16,49	0,001
U f*Taux infiltration	1	0,46	0,456	9,18	0,009
U f*COP-ch	1	0,00	0,005	0,10	0,760
U f*EER-clim	1	0,00	0,003	0,05	0,824
WWR-E*WWR-S	1	0,03	0,035	0,70	0,416
WWR-E*FS	1	41,97	41,966	843,65	0,000
WWR-E*Débit minim air neuf	1	0,02	0,021	0,43	0,524
WWR-E*Taux infiltration	1	0,02	0,017	0,34	0,567
WWR-S*FS	1	7,58	7,580	152,38	0,000
WWR-S*Débit minim air neuf	1	0,01	0,007	0,14	0,711
WWR-S*Taux infiltration	1	0,01	0,007	0,13	0,723
WWR-S*COP-ch	1	0,07	0,073	1,46	0,247
WWR-S*EER-clim	1	0,02	0,024	0,48	0,500
FS*Débit minim air neuf	1	0,02	0,017	0,34	0,567
FS*Taux infiltration	1	0,00	0,003	0,06	0,807
FS*COP-ch	1	0,01	0,009	0,18	0,679
FS*EER-clim	1	0,00	0,005	0,10	0,756
Débit minim air neuf*COP-ch	1	0,01	0,009	0,17	0,683
Débit minim air neuf*EER-clim	1	0,01	0,009	0,19	0,671
Taux infiltration*COP-ch	1	0,00	0,002	0,04	0,837
Taux infiltration*EER-clim	1	0,01	0,010	0,19	0,667
Error	14	0,70	0,050		
Total	63	1744,02			

Figure 25: (a) Analyse de variance, (b) graphe des effets standardisés et (c) graphe de front de Pareto. Source : Auteur, 2024.



La probabilité pour les effets pour la réponse « cooling KWh/m<sup>2</sup>.an » est montré dans le graphe dont les facteurs F (FS), B (U toit), A (U mur) et D (WWR-E) sont tous significatifs respectivement. Le front de Pareto est utilisé pour la classification définitive des facteurs F, B, A et D selon leurs effets standardisés, ainsi que d'autres combinaisons tels que DF et AB et BF.

Ces graphes nous aiderons à la sélection des facteurs pour poursuivre les prochaines expériences.

### **Interprétation des résultats : Besoins en chauffage**

- Les coefficients de transmission thermique de la toiture et murs sont les plus importants qui influencent sur les besoins en chauffage du logement, notamment la toiture car le logement se situe en dernier étage. Ainsi que le rôle majeur que jouent les composants de l'enveloppe durant la période hivernale.
- Cela est également remarqué pour le facteur H (taux d'infiltration) dû à la construction, sur les besoins de chauffage. L'effet de l'étanchéité à l'air de l'habitation se confirme avec les deux facteurs cités en haut en degré d'importance.
- Le facteur solaire est moyennement influant sur la réponse, cela peut avoir relation avec l'orientation du logement (Sud-Est) aussi qu'à sa localisation sur Alger.

### **Interprétation des résultats : Besoin en climatisation**

- Le facteur solaire est le plus influent au niveau de ce stade d'expériences, avec le WWR-E. cela met l'accent sur l'importance des caractéristiques du vitrage et sa relation avec le rapport fenêtres/ murs. Nous constatons que WWR-E qui varie entre 25% et 50% est significatif au côté Est en raison de la forme rectangulaire du logement et l'immeuble, ou la surface des murs orienté Est est réduite par rapport au murs orientés Sud. Cela permettra une distribution plus importante des rapports (25% et 50%) sur la façade Est et par conséquent, une surface vitrée plus grande avec un effet de FS considérablement important.
- Les facteurs B et A (coefficients de transmission thermiques) affectent grandement les besoins en refroidissement.

Nous jugeons nécessaire de mentionner en remarque que les coefficients de performance COP de chauffage et le EER de climatisation sont dans ce cas non significatifs. Cela est peut-être en raison du niveau simplifié de modélisation du système HVAC, ou d'autres résultats peuvent être révéler dans le cas d'une modélisation détaillée des systèmes sur DesignBuilder. Ce qui n'est pas l'objet de ce travail.

### ***III.3.2 Détermination des modèles polynomiaux :***

De cette première sélection des facteurs, cette étape se focalise sur les facteurs : U toit, U mur et taux d'infiltration pour l'étude des besoins en chauffage et les facteurs : FS, U toit et U mur pour la réponse en besoin de climatisation du logement étudié.

Les expériences à cette étape sont élaborées séparément pour plus de précision. Des plans factoriels complets sont donc conçus respectivement. L'introduction d'un facteur clé qui est la température opérative (réglementaire de confort) est ajoutée aux matrices pour étudier son effet étant un facteur de confort des occupants en raison des effets potentiels qui peuvent être révéler sur les réponses.

Cette étape a pour objectif d'identification les modèles mathématiques à des fins d'optimisation des fonctions objectifs « Heating et Cooling » respectivement.

#### ***III.3.2.1 Besoins en chauffage : construction d'un plan factoriel complet***

Le plan factoriel complet est conçu par le nombre réduit des facteurs (04)  $2^K$  à 22 expériences afin de tester toutes les combinaisons possibles. (16 expériences avec 06 avec des points centraux). Le tableau ci-dessous représente la matrice avec les résultats :

*Tableau 11: Résultat de la matrice plan factoriel complet. Source : Auteur, 2024.*

U toit	U mur	Taux infiltration	T° opérative	Besoins chauffage en KWh/m <sup>2</sup>
1,3245	1,6705	0,755	22	116,47
0,349	0,35	1,15	23	75,83
0,349	0,35	0,36	21	10,85
0,349	2,991	1,15	21	108,25
2,3	0,35	0,36	21	91,54
1,3245	1,6705	0,755	22	116,47
1,3245	1,6705	0,755	22	116,47
0,349	2,991	0,36	21	79,45
1,3245	1,6705	0,755	22	116,47
1,3245	1,6705	0,755	22	116,47
2,3	2,991	0,36	21	165,36
2,3	2,991	1,15	21	198,11
0,349	0,35	0,36	23	40,25



1,3245	1,6705	0,755	22	116,47
2,3	0,35	1,15	21	121,88
0,349	0,35	1,15	21	31,12
0,349	2,991	0,36	23	145
2,3	0,35	0,36	23	158,07
2,3	2,991	1,15	23	302,64
2,3	0,35	1,15	23	199,74
2,3	2,991	0,36	23	258,32
0,349	2,991	1,15	23	185,54

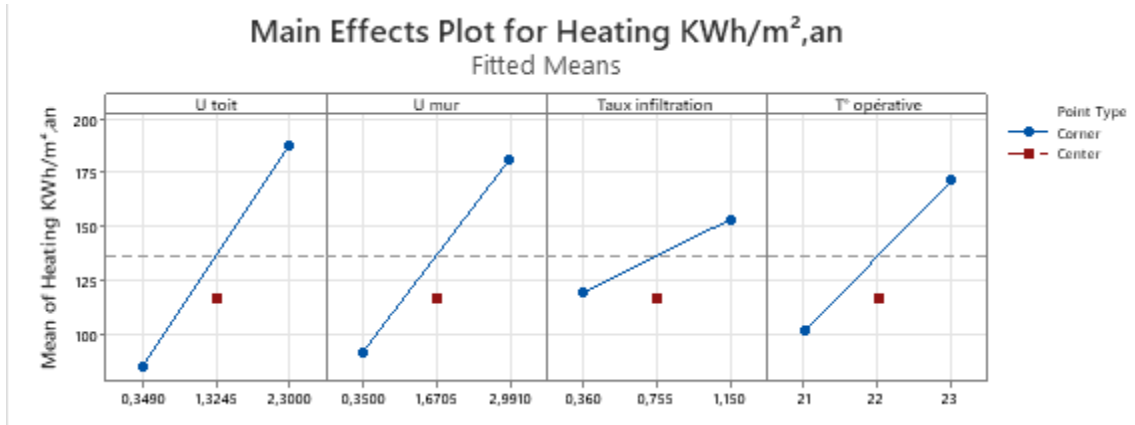


Figure 26 : Graphe des effets principaux pour besoins en chauffage. Source : Auteur, 2024.

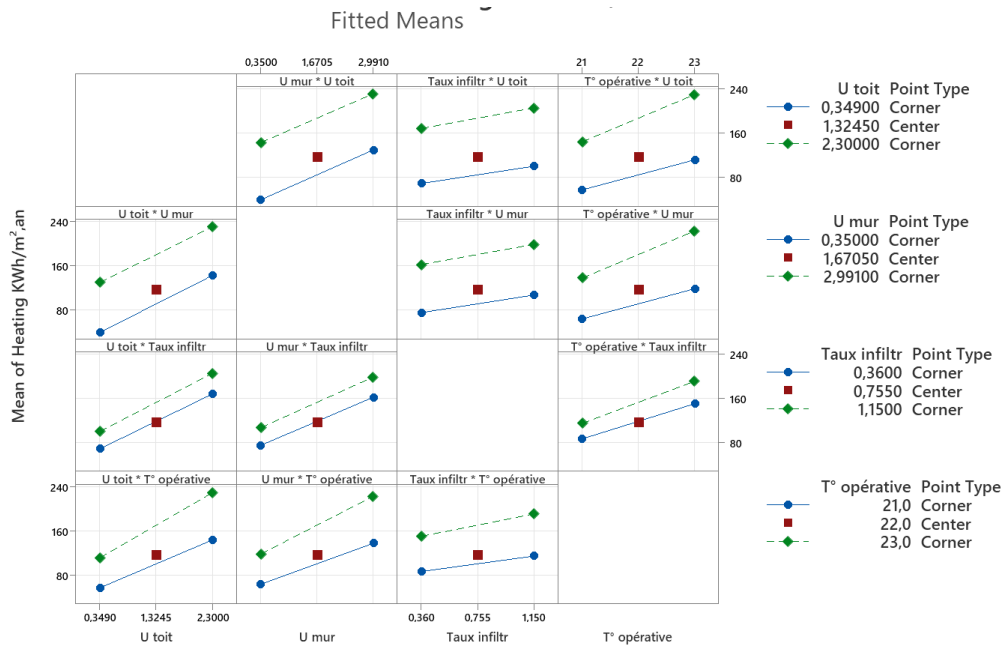


Figure 27 : Graphe des interactions entre facteurs. Source : Auteur, 2024.

### Interprétation :

- Le premier graphe (Fig.26) représente les effets principaux des 04 facteurs sur les besoins en chauffage. On distingue une augmentation importante de la réponse avec l'augmentation de la valeur U de la toiture et murs (les lignes droites en bleus composées par les niveaux extrêmes des facteurs).

- La même observation est valide pour le changement de la moyenne de la consommation selon le degré de la température opérative.
- La réponse est moins influencée par le facteur de taux d'infiltration.
- Le deuxième graphe (Fig.27) représente l'ensemble des interactions possibles entre les 04 facteurs, ou les interactions importantes sont observées par le niveau de rapprochement des lignes bleues et vertes, à savoir : U mur & taux d'infiltration, U toit & température ainsi que U mur avec la température opérative.
- Nous remarquons au niveau de premier graphe des effets principaux que les points centraux testés (en rouge) se localisent en dehors de la réponse linéaire pour l'ensemble des facteurs. Cela signifie l'existence d'une courbe dans la réponse (réponse quadratique) et nécessite la réalisation des expériences selon matrice de surface de réponse pour l'identification des modèles mathématiques.

### **III.3.2.2 Besoins en chauffage : construction d'un plan surface de réponse**

Pour le faire, nous sélectionnons les facteurs : U toit, U mur et la température T° C pour la création d'un plan de surface de réponse de type Plan Composite Centré avec 20 expériences. Le tableau ci-dessous résume les résultats :

Tableau 12: Résultats de la matrice pour les besoins en chauffage. Source : Auteur, 2024.

U toit	U mur	T° opérative	Déperditions (kW)	Puissance à installer (kW)	Consommation KWh	Besoins chauffage en KWh/m <sup>2</sup> .an
1,3245	1,6705	22	10,14	<b>12,67</b>	8197,04	<b>116,47</b>
2,3	2,991	23	16,43	<b>20,54</b>	20585,29	<b>280,45</b>
0,349	2,991	23	11,69	<b>14,61</b>	12124,7	<b>165,19</b>
1,3245	1,6705	22	10,14	<b>12,67</b>	8197,04	<b>116,47</b>
1,3245	1,6705	22	10,14	<b>12,67</b>	8197,04	<b>116,47</b>
2,3	1,6705	22	12,4	<b>15,5</b>	13401,67	<b>190,42</b>
2,3	2,991	21	14,7	<b>18,38</b>	13336,69	<b>181,7</b>
0,349	2,991	21	10,29	<b>12,87</b>	6878,45	<b>93,71</b>
2,3	0,35	21	8,54	<b>10,68</b>	7348,32	<b>106,61</b>
0,349	0,35	21	4,15	<b>5,18</b>	1385,58	<b>20,1</b>
1,3245	0,35	22	6,89	<b>8,61</b>	4654,79	<b>67,53</b>
1,3245	1,6705	23	10,79	<b>13,48</b>	10693,01	<b>151,93</b>
0,349	1,6705	22	7,83	<b>9,79</b>	5985,06	<b>85,03</b>
0,349	0,35	23	5,02	<b>6,28</b>	3990,85	<b>57,9</b>
1,3245	1,6705	21	9,49	<b>11,86</b>	5989,44	<b>85,09</b>

1,3245	1,6705	22	10,14	<b>12,67</b>	8197,04	<b>116,47</b>
2,3	0,35	23	9,76	<b>12,2</b>	12326,35	<b>178,84</b>
1,3245	1,6705	22	10,14	<b>12,67</b>	8197,04	<b>116,47</b>
1,3245	2,991	22	13,29	<b>16,62</b>	11585,16	<b>157,83</b>
1,3245	1,6705	22	10,14	<b>12,67</b>	8197,04	<b>116,47</b>

Ce plan permet l'identification de quatre types de modèles polynomiaux pour le calcul des besoins en chauffage sous forme des équations de régression. Le tableau suivant regroupe les modèles mathématiques possibles :

Tableau 13: Les modèles polynomiaux pour la réponse besoins en chauffage. Source : Auteur, 2024.

Type	Equation	R <sup>2</sup>
Linéaire	Équation de régression en unités non codées Heating KWh/m <sup>2</sup> .an = -764,3 + 52,91 U toit + 33,92 U mur + 34,71 T° opérative	95.2%
Linéaire +quadratique	Heating KWh/m <sup>2</sup> .an = 174 - 5,8 U toit + 41,5 U mur - 48 T° opérative + 22,18 U toit*U toit - 2,26 U mur*U mur + 1,89 T° opérative*T° opérative	98.47%
Linéaire+ interactions	Heating KWh/m <sup>2</sup> .an = -325 - 120,4 U toit - 90,9 U mur + 14,72 T° opérative - 0,41 U toit*U mur + 7,91 U toit*T° opérative + 5,70 U mur*T° opérative	96.7%
Quadratique complet	Heating KWh/m <sup>2</sup> .an = 612 - 179,10 U toit - 83,36 U mur - 68,4 T° opérative + 22,178 U toit*U toit - 2,260 U mur*U mur + 1,890 T° opérative*T° opérative - 0,408 U toit*U mur + 7,906 U toit*T° opérative + 5,699 U mur*T° opérative	99.98%

Les modèles polynomiaux de la réponse « Design capacity KW » sont présentés comme suit :

Tableau 14: Les modèles polynomiaux pour la réponse puissance chauffage. Source : Auteur, 2024.

Type	Equation	R <sup>2</sup>
Linéaire	Design capacity = -14,225 + 2,9288 U toit + 3,0345 U mur + 0,8140 T° opérative	98.2%
Linéaire +quadratique	Design capacity = -13,9 + 2,996 U toit + 3,138 U mur + 0,77 T° opérative - 0,0253 U toit*U toit - 0,0310 U mur*U mur + 0,0009 T° opérative*T° opérative	98.47%

Linéaire+ interactions	Design capacity = $-6,631 + 0,557 U \text{ toit} + 0,366 U \text{ mur} + 0,4690 T^{\circ} \text{ opérative} + 0,0019 U \text{ toit} * U \text{ mur} + 0,1076 U \text{ toit} * T^{\circ} \text{ opérative} + 0,1212 U \text{ mur} * T^{\circ} \text{ opérative}$	99.9%
Quadratique complet	Design capacity = $-6,284 + 0,6246 U \text{ toit} + 0,4699 U \text{ mur} + 0,4290 T^{\circ} \text{ opérative} - 0,02532 U \text{ toit} * U \text{ toit} - 0,031020 U \text{ mur} * U \text{ mur} + 0,00091 T^{\circ} \text{ opérative} * T^{\circ} \text{ opérative} + 0,001941 U \text{ toit} * U \text{ mur} + 0,107637 U \text{ toit} * T^{\circ} \text{ opérative} + 0,121166 U \text{ mur} * T^{\circ} \text{ opérative}$	99.99%

Le front de Pareto (Fig.28a) du modèle quadratique complet a permis de classer les facteurs en fonction de leurs effets : A (U toit) étant l'effet le plus significatif sur la réponse suivie par B (U mur) et la température opérative respectivement. L'étude de la deuxième réponse « Capacité de chauffage à installer » (Fig.28b) indique, à travers le calcul des effets principaux la classification suivante : B, A et C.

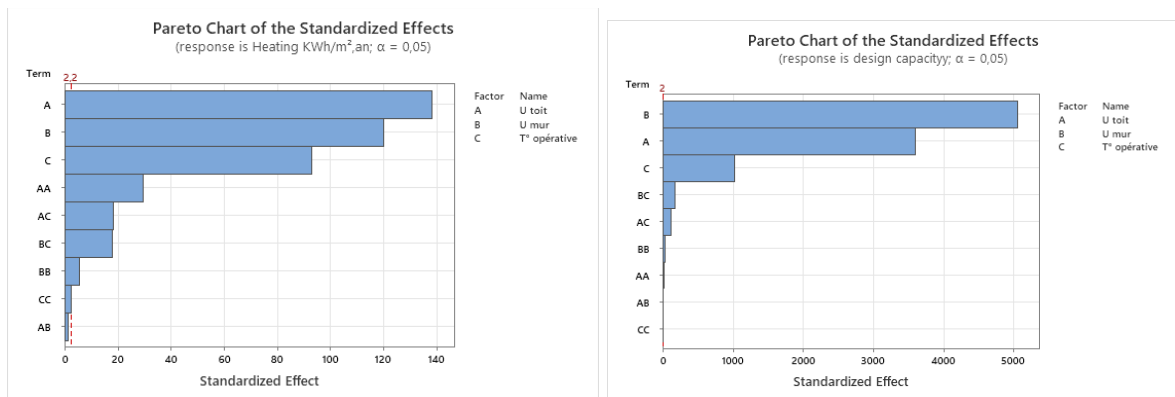


Figure 28 : Les graphes de Front de Pareto des effets standardisés pour : besoin en chauffage et Puissance de chauffage.

## L'optimisation de la réponse Y : besoins en chauffage

Ces deux graphes sont des diagrammes de contours développés d'après les résultats des expériences, ils représentent les besoins en chauffage en fonction de deux variables : U mur sur l'axe des ordonnées et U toit sur l'axe des abscisses. Les différents gradients de couleurs indiquent les plages de valeurs de la demande en chauffage en kWh/m<sup>2</sup>.an. Nous constatons

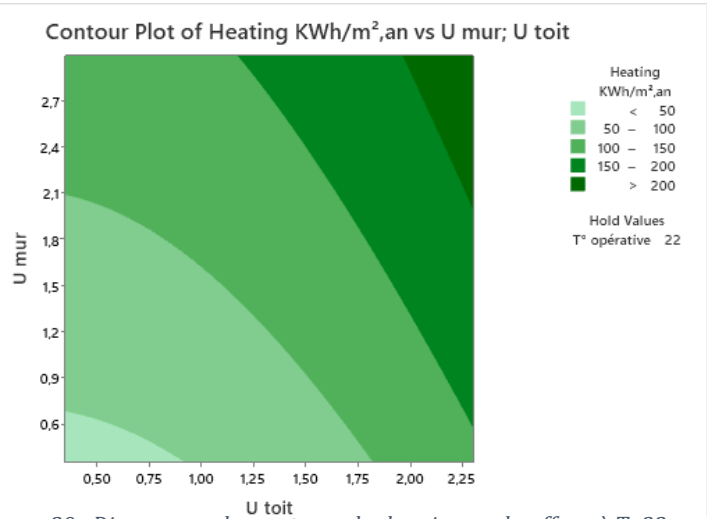


Figure 29 : Diagramme des contours des besoins en chauffage à T=22. Source : Auteur, 2024.

logiquement que les besoins en chauffage augmentent lorsque les valeurs U des murs et de toit sont plus élevées, correspond à une mauvaise isolation thermique et donc plus de déperditions de chaleur. Un élément principal est la température opérative fixé 22°C (Fig.29) pour le premier et 21°C pour le second (Fig.30a). Cela signifie que les valeurs de besoins affichés correspondent aux besoins nécessaires (en kW ou kW/m<sup>2</sup>) pour maintenir cette température intérieure du logement, en tenant compte des déperditions par les murs et toit selon leurs valeurs de coefficients de transmission. L'allure des courbes (forme parabolique) décrie la relation entre les besoins en chauffage et U toit et U mur, indique la modélisation par des polynômes de degré 2 c.-à-d des fonctions quadratiques, ce qui se confirme avec les équations formulées du plan de surface de réponse. Ces modèles mathématiques ainsi que les diagrammes de contours nous permettent d'identifier les solutions optimales pour les besoins en chauffage ; et une évaluation rapide entre les modèles PEX, STD et DTR.

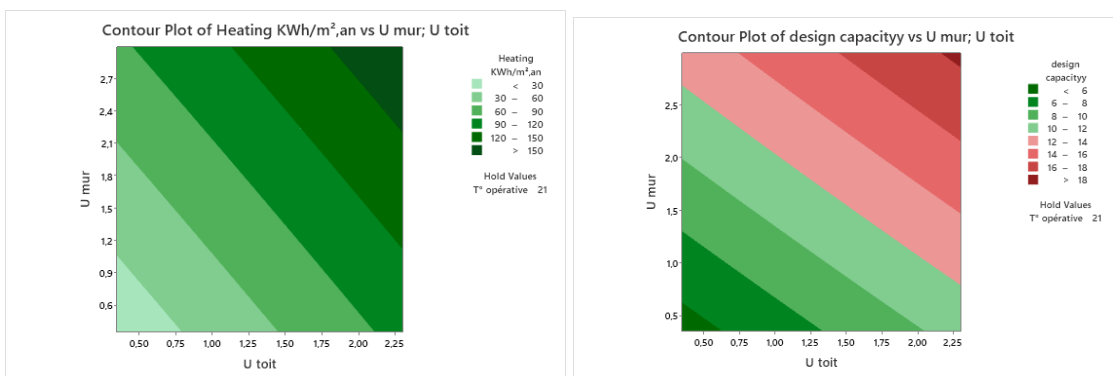


Figure 30: Diagrammes des contours pour : besoins en chauffage et Puissance à T=21°C. Source : Auteur, 2024.

### III.3.2.3 Besoins en climatisation : construction d'un plan factoriel complet

Le passage par un plan factoriel complet pour les besoins en climatisation été obligatoire tout comme le cas de chauffage afin de tester toutes les combinaisons possibles entre les facteurs. Le tableau ci-dessous résume les résultats de cette étape :

Tableau 15: Résultats du plan factoriel complet. Source : Auteur, 2024.

FS	U toit	U mur	T° opérative	Besoins climatisation en KWh/m <sup>2</sup>
0,949	0,349	0,35	24	68,85
0,372	0,349	2,99	24	76,3
0,372	2,3	0,35	24	51,14
0,949	2,3	0,35	27	12,76
0,372	2,3	2,99	27	17,57
0,6605	1,3245	1,67	25,5	57,68
0,6605	1,3245	1,67	25,5	57,68
0,949	0,349	0,35	27	21,15
0,372	2,3	2,99	24	73,33
0,6605	1,3245	1,67	25,5	57,68
0,372	2,3	0,35	27	7,87
0,372	0,349	0,35	27	12,68
0,6605	1,3245	1,67	25,5	57,68
0,372	0,349	0,35	24	56,51
0,949	2,3	2,99	27	22,54
0,949	0,349	2,99	24	86,43
0,6605	1,3245	1,67	25,5	57,68
0,372	0,349	2,99	27	21
0,6605	1,3245	1,67	25,5	57,68
0,949	2,3	2,99	24	82,22
0,949	2,3	0,35	24	61,45
0,949	0,349	2,99	27	27,74

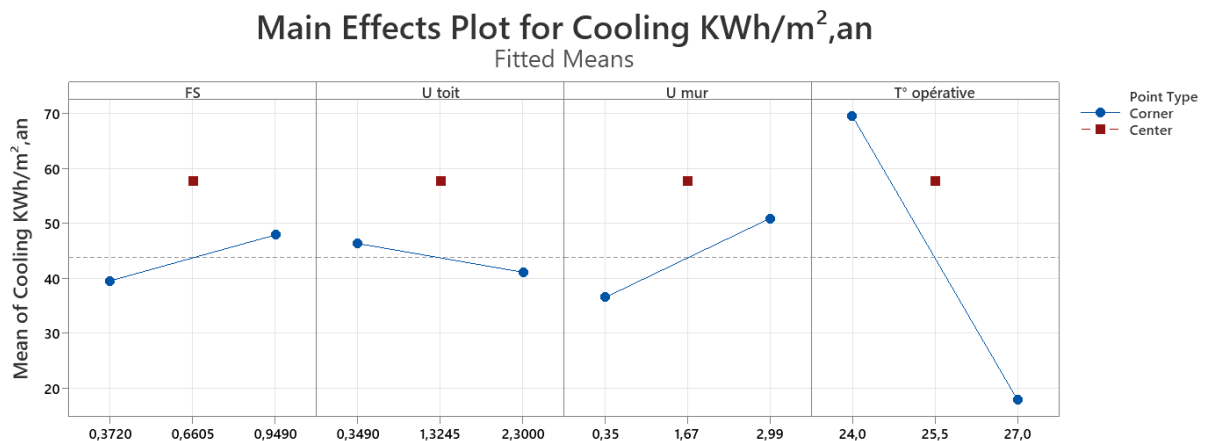


Figure 31 : Graphe des effets principaux des facteurs : FS, U toit, U mur et température. Source : Auteur, 2024.

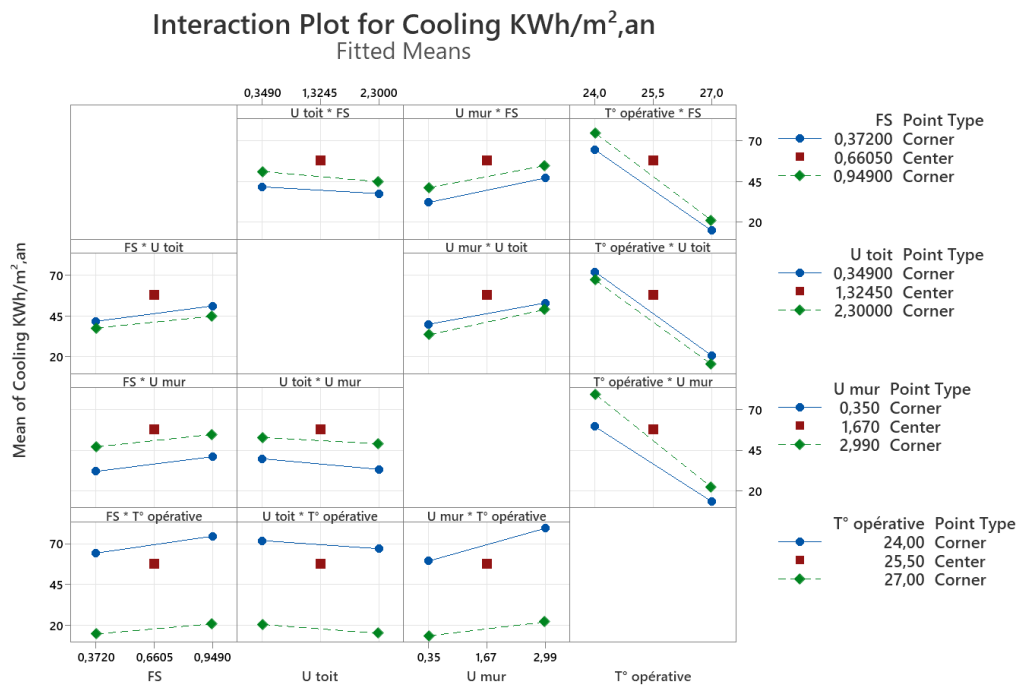


Figure 32 : Graphe des interactions entre les facteurs. Source : Auteur, 2024.

**Interprétation :**

- Le premier graphe (Fig.31) représente les effets principaux des 04 facteurs sur les besoins en climatisation. Nous distinguons une augmentation importante de la réponse avec l'augmentation de la valeur de la température opérative (les lignes droites en bleus composées par les niveaux extrêmes des facteurs) suivi par le coefficient de transmission des murs et le facteur solaire.
- La réponse est moins influencée par le facteur de U toit.
- Le deuxième graphe (Fig.32) représente l'ensemble des interactions possibles entre les 04 facteurs, ou les interactions importantes sont observées par le niveau de rapprochement des lignes bleues et vertes, à savoir : FS et U toit, U mur et Ut, Température et U mur ainsi que la température avec le facteur solaire.
- Nous remarquons au niveau de premier graphe des effets principaux que les points centraux testés (en rouge) se localisent en dehors de la réponse linéaire pour l'ensemble des facteurs. Cela signifie l'existence d'une courbe dans la réponse (réponse quadratique) et nécessite la réalisation des expériences selon matrice de surface de réponse pour l'identification des modèles mathématiques.

### III.3.2.4 Besoins en climatisation : construction d'un plan surface de réponse

Nous sélectionnons les facteurs : le température opérative, U mur et facteur solaire pour la création d'un plan de surface de réponse de type Plan Composite Centré avec 20 expériences. Le tableau ci-dessous résume les résultats :

Tableau 16: Résultats de plan de surface de réponse, besoins en climatisation. Source : Auteur, 2024.

T° opérative	U mur	FS	Charge (kW)	Puissance à installer (kW)	Consommation KWh	Besoins climatisation en KWh/m <sup>2</sup> .an
25,5	1,67	0,6605	4,47	5,14	3102,31	44,07
24	1,67	0,6605	5,37	6,17	5170,39	73,46
25,5	1,67	0,372	4,38	5,03	2843,8	40,4
25,5	0,35	0,6605	3,78	4,35	2622,45	38,04
27	0,35	0,372	2,95	3,39	976,97	14,17
25,5	2,99	0,6605	5,13	5,9	3717,31	50,64
27	1,67	0,6605	3,57	4,11	1450,22	20,6
27	2,99	0,372	3,98	4,57	1666,63	22,71
25,5	1,67	0,6605	4,47	5,14	3102,31	44,07
25,5	1,67	0,6605	4,47	5,14	3102,31	44,07
24	0,35	0,372	4,42	5,09	4070,34	59,05
27	2,99	0,949	4,24	4,87	2164,39	29,48
24	0,35	0,949	4,61	5,3	4914,98	71,3
25,5	1,67	0,6605	4,47	5,14	3102,31	44,07
24	2,99	0,949	6,34	7,29	6528,75	88,94
25,5	1,67	0,6605	4,47	5,14	3102,31	44,07
27	0,35	0,949	3,15	3,62	1560,87	22,64
24	2,99	0,372	6,07	6,98	5788,8	78,87
25,5	1,67	0,949	4,58	5,27	3526,84	50,11
25,5	1,67	0,6605	4,47	5,14	3102,31	44,07

Ce plan permet l'identification de quatre types de modèles polynomiaux pour le calcul des besoins en climatisation sous forme des équations de régression. Le tableau suivant regroupe les modèles mathématiques possibles :

Tableau 17: Les modèles polynomiaux pour la réponse besoin en climatisation. Source : Auteur, 2024.

Type	Equation	R <sup>2</sup>
Linéaire	$\text{Cooling KWh/m}^2, \text{ an} = 472,6 - 17,468 \text{ Température} + 4,958 \text{ U mur} + 16,38 \text{ FS}$	96.10%



Linéaire +quadratique	Cooling KWh/m <sup>2</sup> , an = 1323 - 83,8 Température + 4,50 U mur - 1,9 FS + 1,301 Température*Température + 0,136 U mur*U mur + 13,8 FS*FS	97.32%
Linéaire+ interactions	Cooling KWh/m <sup>2</sup> , an = 377,4 - 13,79 Température + 41,3 U mur + 70,7 FS - 1,394 Température*U mur - 2,05 Température*FS - 1,27 U mur*FS	96.7%
Quadratique complet	Cooling KWh/m <sup>2</sup> , an = 1227,6 - 80,14 Température + 40,889 U mur + 52,37 FS + 1,3010 Température*Température + 0,1362 U mur*U mur + 13,84 FS*FS - 1,3939 Température*U mur - 2,045 Température*FS - 1,274 U mur*FS	99.96%

Les modèles polynomiaux de la réponse « Design capacity KW » pour la climatisation sont présentés comme suit :

Tableau 18: Les modèles polynomiaux de la réponse Design capacity cooling. Source : Auteur, 2024.

Type	Equation	R <sup>2</sup>
Linéaire	Design capacity cooling = 21,308 - 0,6847 Température + 0,5955 U mur + 0,447 FS	96.31%
Linéaire +quadratique	Design capacity cooling = 21,7 - 0,72 Température + 0,622 U mur + 0,27 FS + 0,0006 Température*Température - 0,0078 U mur*U mur + 0,14 FS*FS	95.40%
Linéaire+ interactions	Design capacity cooling = 17,520 - 0,53370 Température + 2,8929 U mur + 0,280 FS - 0,09154 Température*U mur + 0,00289 Température*FS + 0,05580 U mur*FS	99.97%
Quadratique complet	Design capacity cooling = 17,95 - 0,565 Température + 2,9190 U mur + 0,100 FS + 0,00061 Température*Température - 0,00783 U mur*U mur + 0,1365 FS*FS - 0,09154 Température*U mur + 0,00289 Température*FS + 0,05580 U mur*FS	99.99%

Le front de Pareto (Fig.33) du modèle quadratique complet a permis de classer les facteurs en fonction de leurs effets : A (T°C opérative) étant l'effet le plus significatif sur les deux réponses suivies par B (U mur) également influençant les réponse « design capacité » plus que la première, et l'interaction AB est remarquable dans la deuxième réponse. Le facteur solaire est classé en dernier pour les deux graphes.

Nous constatons que le facteur de température opérative est l'élément déterminant de la valeur en puissance à installer pour la climatisation et en besoins annuels vu son effet majeur entre ces valeurs extrêmes de 24°C et 27°C.

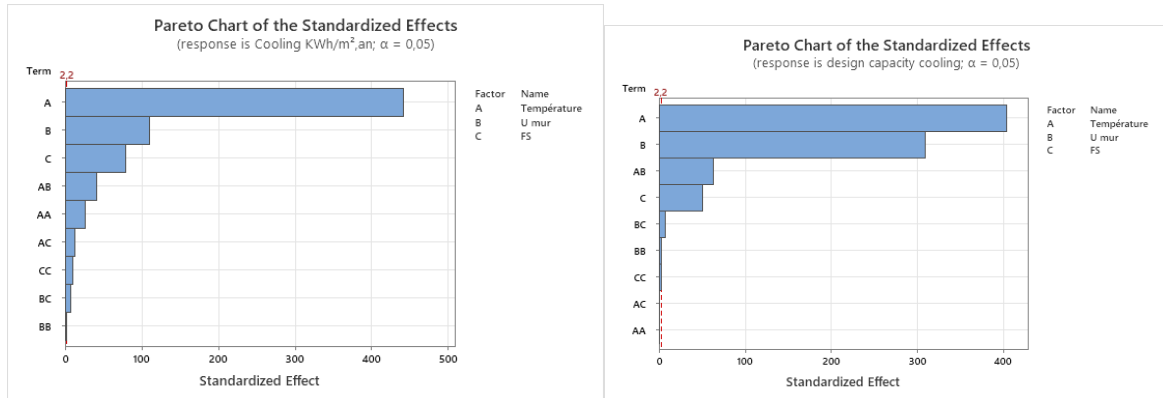


Figure 33 : Les graphes de Front de Pareto pour : besoin en climatisation, et puissance de climatisation. Source : Auteur, 2024.

### L'optimisation de la réponse Y : besoins en climatisation

Le diagramme des contours (Fig.34a) ci-dessous illustre les besoins en climatisation en fonction des deux variables : la température opérative et le coefficient U mur. Nous observons que la réponse est grandement influencée par la variable « température opérative » et indique les meilleurs résultats lorsque la variable est placée entre 25.7°C et 26.7°C. le deuxième diagramme (Fig.34b) présente également les plages de la puissance de climatisation à installer selon les variables U mur et température. Nous remarquons une variété plus accentuée (diversité des couleurs) par rapport au premier graphe. Ces diagrammes et les modèles mathématiques nous aiderons à formuler les solutions optimales pour les besoins en climatisation avec la vérification réglementaire.

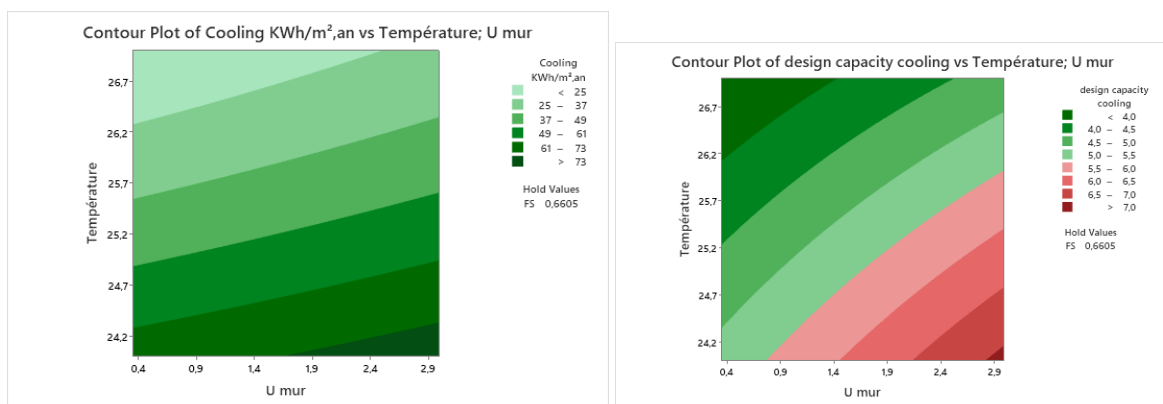


Figure 34: Diagrammes de contours besoin en climatisation, et puissance de climatisation. Source : Auteur, 2024.

### III.4 Identification des solutions optimales pour les besoins en chauffage et en climatisation :

Nous proposons dans cette partie trois scénarios qui regroupent les facteurs les plus influents sur les réponses avec une comparaison entre le calcul réglementaire, les modèles mathématiques et la simulation thermique dynamique. Sur la base de cette comparaison, nous identifions les solutions optimales basées sur les diagrammes de contours pour chaque scénario. Qui satisfait à la fois la conformité réglementaire et les résultats des valeurs optimales des modèles utilisés (puissance et besoins chauffage et climatisation). Le tableau suivant présente les trois scénarios :

Tableau 19 : Scénarios proposés avec leurs comparaisons entre : DTR, STD et modèles PEX. Source : Auteur, 2024.

Scénario	Données	DTR C3.2/4	STD	Modèle PEX										
01	U toit= 0.75 U mur=1.22 Fs= 0.660 T° hiver= 21°C T° été= 25,5°C	Ch= 7.70kW Clim= 3.45kW	Ch=8.75kW Clim=4.96kW	Ch=8.88 kW Clim=4.87kW										
		<p>Scénario 01</p> <table border="1"> <caption>Data for Scénario 01</caption> <thead> <tr> <th>Modèle</th> <th>Chauffage (kW)</th> <th>Climatisation (kW)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DTR C3.2/4</td> <td>7.70</td> <td>3.45</td> </tr> <tr> <td>Modèle mathématique</td> <td>8.75</td> <td>4.96</td> </tr> <tr> <td>STD</td> <td>8.88</td> <td>4.87</td> </tr> </tbody> </table>			Modèle	Chauffage (kW)	Climatisation (kW)	DTR C3.2/4	7.70	3.45	Modèle mathématique	8.75	4.96	STD
Modèle	Chauffage (kW)	Climatisation (kW)												
DTR C3.2/4	7.70	3.45												
Modèle mathématique	8.75	4.96												
STD	8.88	4.87												
02	U toit= 0.46 U mur=0.58 Fs= 0.372 T° hiver= 21°C T° été= 24°C	Ch= 5.89kW Clim= 3.31kW	Ch= 6.14kW Clim= 5.16kW	Ch= 6.20kW Clim=5.30kW										
		<p>Scénario 02</p> <table border="1"> <caption>Data for Scénario 02</caption> <thead> <tr> <th>Modèle</th> <th>Chauffage (kW)</th> <th>Climatisation (kW)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DTR C3.2/4</td> <td>5.89</td> <td>3.31</td> </tr> <tr> <td>Modèle mathématique</td> <td>6.14</td> <td>5.16</td> </tr> <tr> <td>STD</td> <td>6.20</td> <td>5.30</td> </tr> </tbody> </table>			Modèle	Chauffage (kW)	Climatisation (kW)	DTR C3.2/4	5.89	3.31	Modèle mathématique	6.14	5.16	STD
Modèle	Chauffage (kW)	Climatisation (kW)												
DTR C3.2/4	5.89	3.31												
Modèle mathématique	6.14	5.16												
STD	6.20	5.30												
03	U toit= 0.349 U mur=0.35 Fs= 0.372	Ch= 4.74 kW Clim= 2.75 kW	Ch=4.91 kW Clim=3.87 kW	Ch=5.22 Kw Clim=4.20 kW										

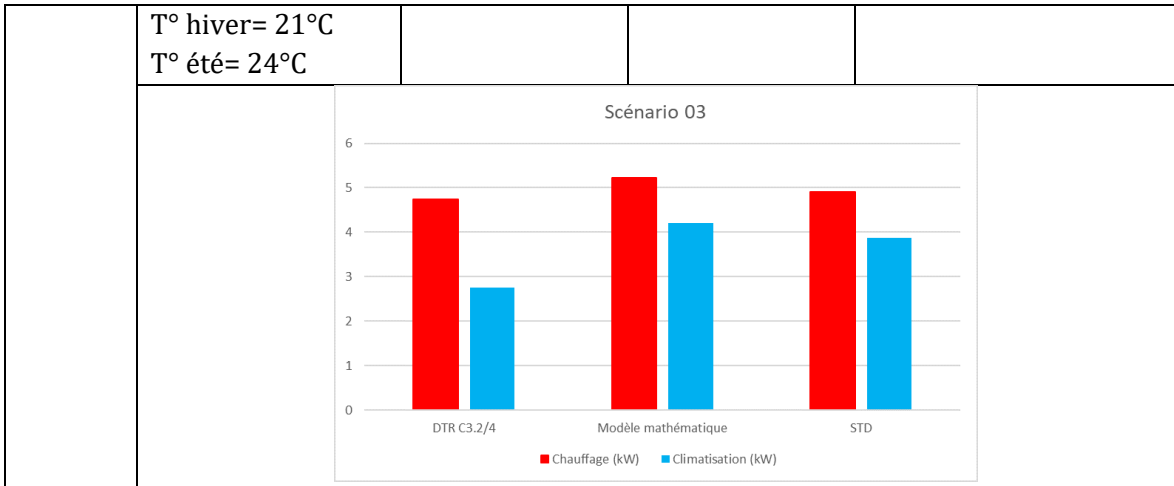


Tableau 20 : Solutions optimales choisies avec leur comparaison entre DTR et modèles PEX. Source : Auteur, 2024.

Solution optimale	Valeurs optimales	Résultats																				
<b>01</b>	U toit= 0.75 U mur=0.815 Fs= 0.372 T° hiver= 21°C T° été= 27°C	Ch. DTR=7.70 kW Ch. modèle= 7.69 kW Clim. DTR= 3.45 kW Clim. Modèle= 4.6 kW																				
<b>02</b>	U toit= 0.586 U mur=0.35 Fs= 0.372 T° hiver= 21°C T° été= 24°C	Ch. DTR=5.89 kW Ch. Modèle= 5.88 kW Clim. DTR= 3.31 kW Clim. Modèle= 4.50 kW																				
<b>03</b>	U toit= 0.349 U mur=0.35 Fs= 0.372 T° hiver= 21°C T° été= 26°C	Ch. DTR=4.74 kW Ch. Modèle= 5.22 kW Clim. DTR= 2.75 kW Clim. Modèle= 3.90 kW																				
Comparaison	<p style="text-align: center;">Comparaison des solutions optimales</p> <table border="1"> <caption>Data for Comparaison des solutions optimales</caption> <thead> <tr> <th>Solution</th> <th>Chauffage (kW) modèle</th> <th>Climatisation (kW) modèle</th> <th>Chauffage (kW) DTR</th> <th>Climatisation (kW) DTR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Solution optimale 03</td> <td>~5.2</td> <td>~3.9</td> <td>~5.3</td> <td>~2.8</td> </tr> <tr> <td>Solution optimale 02</td> <td>~5.9</td> <td>~4.5</td> <td>~5.9</td> <td>~3.3</td> </tr> <tr> <td>Solution optimale 01</td> <td>~7.7</td> <td>~4.6</td> <td>~7.7</td> <td>~3.5</td> </tr> </tbody> </table>		Solution	Chauffage (kW) modèle	Climatisation (kW) modèle	Chauffage (kW) DTR	Climatisation (kW) DTR	Solution optimale 03	~5.2	~3.9	~5.3	~2.8	Solution optimale 02	~5.9	~4.5	~5.9	~3.3	Solution optimale 01	~7.7	~4.6	~7.7	~3.5
Solution	Chauffage (kW) modèle	Climatisation (kW) modèle	Chauffage (kW) DTR	Climatisation (kW) DTR																		
Solution optimale 03	~5.2	~3.9	~5.3	~2.8																		
Solution optimale 02	~5.9	~4.5	~5.9	~3.3																		
Solution optimale 01	~7.7	~4.6	~7.7	~3.5																		

Tableau 21 : Propriétés thermiques des valeurs des systèmes de l'enveloppe proposées dans les solutions. Source : Auteur, 2024.

N	Elément	Composition	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m-K)	Valeur U (W/m <sup>2</sup> -K)
1	Toiture	Granito	0.02	2.10	0.75
		Enduit ciment	0.02	1.40	
		Lit de sable	0.02	0.60	
		Forme de pente	0.05	1.75	
		Polystyrène	0.03	0.04	
		Prédalle	0.06	1.75	
		Lame d'air	0.42		
		Faux plafond	0.02	0.35	
2	Toiture	Etanchéité	0.01	0.23	0.349
		Mortier ciment	0.01	1.40	
		Mousse minérale (Thermorooft)	0.20	0.08	
		Pare vapeur			
		Béton	0.15	1.75	
		Enduit plâtre	0.01	0.35	
3	Mur extérieur	Enduit plâtre	0.02	0.35	0.35
		Brique creuse	0.10	0.046	
		Polystyrène expansé	0.10	0.48	
		Brique creuse	0.10	0.48	
		Enduit mortier	0.02	1.15	
4	Mur extérieur	Enduit ciment	0.02	1.40	0.89
		Brique creuse	0.15	0.48	
		Lame d'air	0.05	/	
		Brique creuse	0.10	0.48	
		Enduit plâtre	0.02	0.35	

#### Discussions :

- L'optimisation des réponses pour la recherche des solutions optimales en fonction des contraintes définies est faite par criblage de la réponse avec celle qui satisfait le calcul réglementaire en termes de coefficients de transmission thermique et les températures intérieures réglementaires en hiver et en été.
- Le logiciel d'analyse des données détermine les valeurs optimales des facteurs selon leurs effets principaux et les interactions sur la réponse observée. Cela permet l'identification des valeurs des variables qui optimisent conjointement la réponse. Le modèle est donc ajusté pour satisfaire la valeur ciblée ou minimisée.

- Nous constatons que les modèles d'optimisation pour les besoins en chauffage se rapprochent plus avec ceux du calcul réglementaire par rapport aux modèles d'optimisation des besoins en climatisation. Les résultats obtenus s'alignent au domaine d'étude établie en amont pour l'ensemble des facteurs dans la réalisation de ces expériences. Un domaine d'étude plus large pourra révéler d'autres résultats davantage.
- La logique de calcul statique (DTR) et le régime dynamique a été respectée dans l'analyse et l'interprétation de ces résultats, ou le logiciel numérique Energy Plus effectue les calculs statiques pour la conception de chauffage en prenant en considération le cas le plus défavorable (la semaine la plus froids), et un calcul dynamique pour la conception de climatisation selon les apports thermiques estivales ainsi que l'estimation des besoins énergétiques annuelles en chauffage et climatisation.
- Une évaluation de l'ensemble des données et résultats collectés dans ce travail a été faite pour identifier les parts (en pourcentages) des besoins en chauffage et climatisation pour le cas d'Alger. L'énergie finale consommée est de 69.71% en chauffage et de 30.28% en climatisation.

### **III.5 Recommandations pour l'amélioration des modèles :**

Les projections (Fig.35) suivantes de ce travail élaboré visent à :

- Développement de ces modèles par maximisation de nombre des expériences.
- Entraînement des données par un modèle de machine Learning classique (exemple : régression linéaire)
- L'intégration des données collectés par la méthode plans d'expériences dans différents algorithmes afin de bénéficier de la puissance prédictive des algorithmes de machine Learning avec la rigueur des plans d'expériences.
- Cet organigramme général ci-dessous résume la réflexion de l'amélioration des modèles mathématiques :

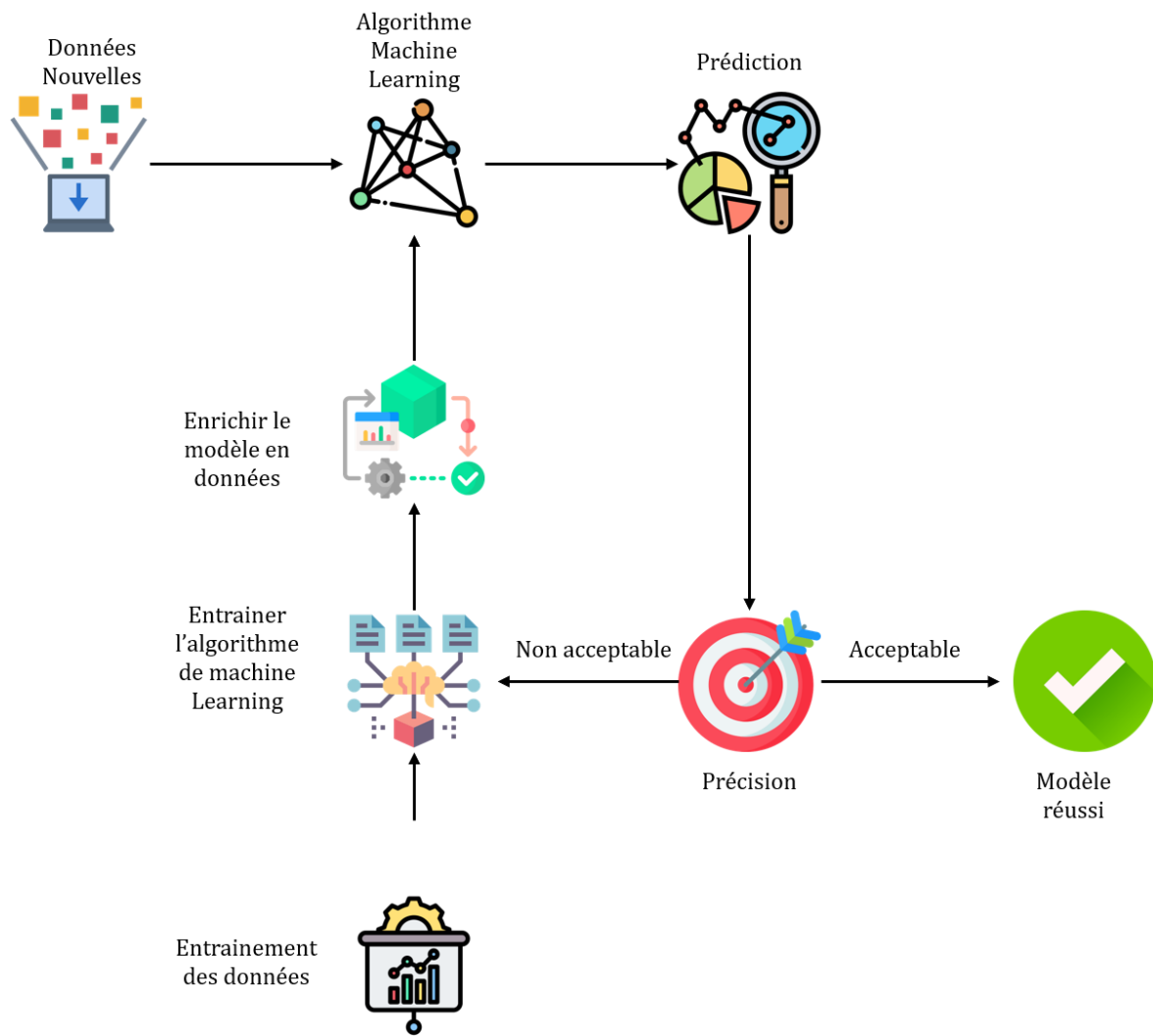


Figure 35 : Schéma des recommandations pour l'amélioration des modèles mathématiques développés. Source : Auteur, 2024.

- De toutes les données cumulées, nous avons évalué les résultats des besoins énergétiques en chauffage en fonction des puissances, par un modèle de régression linéaire. Cette technique permet l'analyse des données qui prédit la valeur de données inconnues en utilisant une autre valeur de donnée connue. (La variable inconnue nommée dépendante ou réponse et la variable connue nommée indépendante) sous forme d'équation linéaire. Les résultats ci-dessous présentés par le graphe de la ligne ajustée (fitted line plot Fig.36) décrit la relation linéaire entre la capacité de conception et la consommation de chauffage. Un  $R^2=88.2\%$  indique que 88.2% de variance totale de besoin en chauffage est expliquée par le prédicteur. Cela indique un modèle fortement explicatif.

Le graphe de probabilité normale des résidus (Fig.37) indique que la plupart des points ou résidus semblent suivre la distribution normale (ou théorique en ligne rouge). Cependant, certaines dériviations sont indiquées aux extrémités. Cela nécessite une vérification et traitement de données davantage.

- Les résultats de modèle ajusté sont encourageants et ouvre une nouvelle perspective pour l'amélioration des modèles mathématiques.

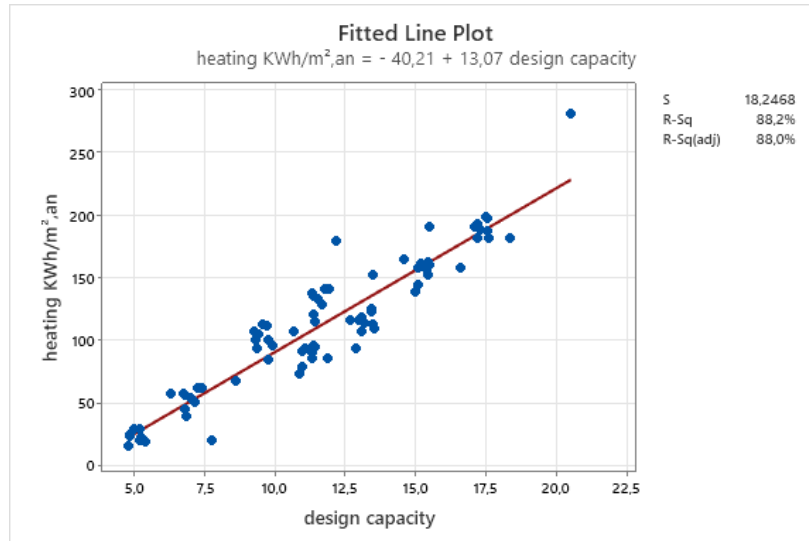


Figure 36 : Graphe de la ligne ajustée de la régression linéaire. Source : Auteur,

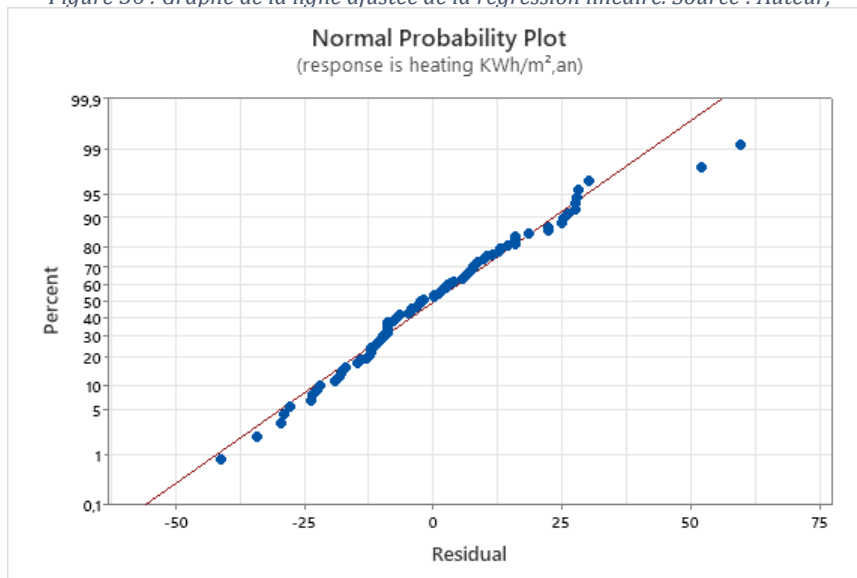


Figure 37 : Graphe de probabilité normale des résidus pour besoins en chauffage. Source : Auteur, 2024.



# **CONCLUSION GENERALE :**

#### IV. Conclusion générale :

Etablir un travail au sein de ce programme de master professionnel en efficacité énergétique dans les bâtiments nous a permis d'explorer un nouveau volet de domaine d'efficacité de l'énergie en bâtiment, dans un contexte interdisciplinaire ou l'interaction de notre profession d'architecte et spécialiste en énergie dans le bâtiment font l'objet de ce modeste travail de fin d'études.

Le produit de ce travail se résume dans les points suivants :

- Il nous permet de se positionner par rapport aux projections des stratégies de la CDN. L'utilisation des modèles PEX se focalise principalement sur l'enveloppe de bâtiment (mesures passives) qui permettent de répondre aux scénario 01 et scénario 03 par des solutions optimales pour l'enveloppe du bâtiment. Nous proposons davantage un scénario optimal « ambitieux » à l'horizon 2050 avec une estimation de l'évolution de nombre de logements à 20 millions unités. Le tableau suivant résume les propositions<sup>9</sup> comme suit :

Tableau 22 : Propositions des solutions pour les scénarios de la CDN pour atténuation des émissions CO2. Source : Auteur, 2024

Scénario 01 230kWh/m <sup>2</sup> .an Isolation toiture			Scénario 03 205kWh/m <sup>2</sup> .an Isolation enveloppe			Scénario optimal 2050 60kWh/m <sup>2</sup> .an Construction optimisée		
45 Mt CO2	Ch 160kWh/m <sup>2</sup>	Clim 69kWh/m <sup>2</sup>	40 Mt CO2	Ch 143kWh/m <sup>2</sup>	Clim 60kWh/m <sup>2</sup>	20 Mt CO2	Ch 40kWh/m <sup>2</sup>	Clim 20kWh/m <sup>2</sup>
U toit= 0.362 U mur= 2.872 T°C : 22°C/ T°C : 25°C			U toit= 1.324 U mur= 1.67 T°C : 22.6°C/ T°C : 25.5°C			U toit= 0.75 U mur= 0.815 T°C : 21°C/ T°C : 26°C		

- En termes d'optimisation énergétique des logements collectifs AADL cette méthode a prouvé sa pertinence pour l'optimisation de l'enveloppe notamment pour les nouvelles constructions (lancement du projet AADL 3 le 05 juillet 2024) pour l'anticipation de la maîtrise des consommations énergétiques avec l'ambition de réduction des GES. Une consolidation du modèle avec des paramètres « actives » est nécessaire avec association du l'aspect économique

<sup>9</sup> En énergie finale.

avec les indicateurs appropriés en termes de prix des systèmes d'isolation intégrés à la base des données du modèle.

Cet outil d'aide à la décision aidera les décideurs et les spécialistes du bâtiment pour (Fig.38 ci-dessous) :

- Agir efficacement sur le choix des mesures d'efficacité énergétique à implémenter pour les logements AADL, principalement l'isolation thermique.
- Le lancement des nouveaux projets d'efficacité énergétique offrira une croissance dans la demande de production des isolants thermiques et évolution de nombre des entreprises fabricantes.
- Cette offre permettra aux institutions concernées (CNERIB- MHUV) de collecter les données actualisées sur les nouveaux projets d'application des mesures d'isolation, d'audit et de la réhabilitation énergétique des constructions neufs et existantes.
- Anticipation des solutions pour le programme AADL 3 en termes de développement des nouveaux systèmes s'isolants, de fenestration et de constructions adaptées au zonage climatique.

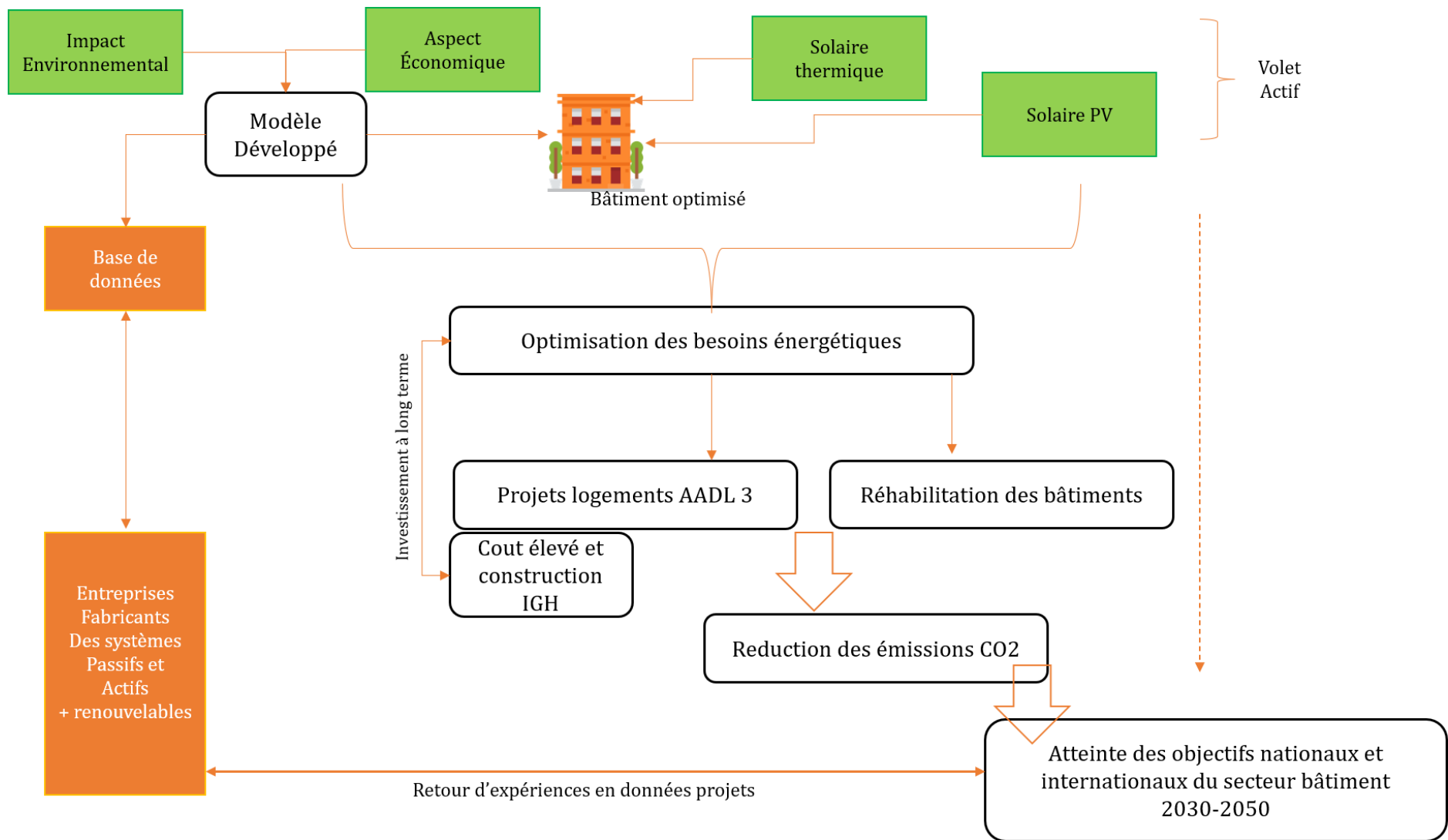


Figure 38 : Schéma synoptique des recommandations d'optimisation des besoins en chauffage et climatisation par la méthode développée. Source : Bouttout et Yaici, 2024.

# **REFERENCES**

# **BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références bibliographies :

Belahya, h. (s. D.). *Contribution au développement d'une conception énergétique de bâtiment à basse consommation d'énergie. Application aux régions du sud algérien* [phd thesis]. Consulté 5 mars 2024, à l'adresse <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/20564>

Belahya, h., boubekri, a., & kriker, a. (2017). A fast evaluation method for energy building consumption based on the design of experiments. *Iop conference series: earth and environmental science*, 83(1), 012025. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/83/1/012025/meta>

Bencheikh, D., & Bederina, M. (2020). Assessing the duality of thermal performance and energy efficiency of residential buildings in hot arid climate of Laghouat, Algeria. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(1), 143-162.

Benmicia, N. (2023). The energy efficiency diagnosis of residential buildings in Algeria. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 436, p. 01009). EDP Sciences.

Chen, s., zhang, g., xia, x., setunge, s., & shi, l. (2020). A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings. *Energy and buildings*, 216, 109944.

Dhariwal, J., & Banerjee, R. (2017, June). An approach for building design optimization using design of experiments. In *Building Simulation* (Vol. 10, pp. 323-336). Tsinghua University Press.

Djebbar, K. E. B., Salem, S., & Mokhtari, A. (2018). A MULTI-OBJECTIVEOPTIMIZATION APPROACH OF HOUSING IN ALGERIA. A STEP TOWARDS SUSTAINABILITY. *Urbanism. Arhitectura. Constructii*, 9(2), 131.

*Elaboration de la troisième communication nationale et du premier rapport biennal de l'Algérie auprès de la ccnucc | programme de développement des nations unies.* (s. D.). Consulté 20 mai 2024, à l'adresse <https://www.undp.org/fr/algeria/projets/elaboration-de-la-troisieme-communication-nationale-et-du-premier-rapport-biennal-de-lalgerie-aupres-de-la-ccnucc>

Gonzalo, F. D. A., Griffin, M., Laskosky, J., Yost, P., & González-Lezcano, R. A. (2022). Assessment of indoor air quality in residential buildings of New England through actual data. *Sustainability*, 14(2), 739.

Goupy, J. (2000). Modélisation par les plans d'expériences. *Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle*, (R275), R275-1.

Hocine, b., abdelghani, b., rafik, b., & zaid, r. (2023). Residential building design and optimization in arid climates using multiple objectives and ann-ga. *Journal of advanced research in fluid mechanics and thermal sciences*, 110(2), 14-31.

Imessad, K., Kharchi, R., Bouchaib, S., Chenak, A., Hakem, S., Hamidat, A., ... & Sahnoune, F. (2017). Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment. *Journal of Renewable Energies*, 20(4), 591-597.

Jankovic, a., chaudhary, g., & goia, f. (2021). Designing the design of experiments (doe)–an investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. *Energy and buildings*, 250, 111298.

Jaouaf, S., Bensaad, B., & Dorbane, A. (2024). Energy efficiency of a house in Mediterranean region: insulation and glazing impact. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 10(1), 17038-17038.

Kolokotsa, d., diakaki, c., grigoroudis, e., stavrakakis, g., & kalaitzakis, k. (2009). Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings. *Advances in building energy research*, 3(1), 121-146. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0305>

- Marszal, a. J., heiselberg, p., bourrelle, j. S., musall, e., voss, k., sartori, i., & napolitano, a. (2011). Zero energy building—a review of definitions and calculation methodologies. *Energy and buildings*, 43(4), 971-979.
- Meftah, N., & Mahri, Z. L. (2021). Analysis of Algerian energy efficiency measures in buildings for achieving sustainable development goals. *Journal of Renewable Energies*, 37-44.
- Nabil, M., & Labidine, M. Z. (2022). Application Efficiency Measures Through TRNSYS Software on Algerian Building to Save Energy. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 93(2), 160-172.
- Rahmouni, S., & Smail, R. (2020). A design approach towards sustainable buildings in Algeria. *Smart and Sustainable Built Environment*, 9(3), 229-245.
- Rais, M., Boumerzoug, A., & Baranyai, B. (2021). Energy performance diagnosis for the residential building façade in Algeria. *Pollack Periodica*, 16(2), 136-142.
- Rivallain, m. (2013). *Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants* [phd thesis, paris est]. <https://www.theses.fr/2013pest1038>
- Romani, z. (2015). *Développement d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception des bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants à haute efficacité énergétique* [phd thesis, université de la rochelle; université abdelmalek essaâdi (tétouan, maroc)]. <https://theses.hal.science/tel-01373443/>
- Sadeghifam, a. N., zahraee, s. M., meynagh, m. M., & kiani, i. (2015). Combined use of design of experiment and dynamic building simulation in assessment of energy efficiency in tropical residential buildings. *Energy and buildings*, 86, 525-533.
- SALAH-SALAH, H., & HARBI, I. (2023, June). About the regulatory framework for improving the energy efficiency of buildings: An overview of the Algerian Context. In *Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA* (Vol. 6, No. 1, pp. 26-34).
- Seddiki, M., Bennadji, A., & Tehami, M. (2020). Barriers to the adoption of energy efficiency measures in Mostaganem, Algeria. *Journal of construction in developing countries*, 25(2).
- Semahi, s., benbouras, m. A., mahar, w. A., zemmouri, n., & attia, s. (2020). Development of spatial distribution maps for energy demand and thermal comfort estimation in algeria. *Sustainability*, 12(15), 6066.
- Sholahudin, s., alam, a. G., baek, c. I., & han, h. (2016). Prediction and analysis of building energy efficiency using artificial neural network and design of experiments. *Applied mechanics and materials*, 819, 541-545.
- Si, b., tian, z., jin, x., zhou, x., tang, p., & shi, x. (2016). Performance indices and evaluation of algorithms in building energy efficient design optimization. *Energy*, 114, 100-112.
- Telford, J. K. (2007). A brief introduction to design of experiments. *Johns Hopkins apl technical digest*, 27(3), 224-232.
- Topics – analysis.* (s. D.). Iea. Consulté 18 mai 2024, à l'adresse <https://www.iea.org/topics>
- Uy, M., & Telford, J. K. (2009, March). Optimization by design of experiment techniques. In *2009 IEEE Aerospace conference* (pp. 1-10). IEEE.
- Xu, j., kim, j.-h., hong, h., & koo, j. (2015). A systematic approach for energy efficient building design factors optimization. *Energy and buildings*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.022>

## Contenu multimédia :

Optimisation et Recherche Opérationnelle—YouTube. (s. d.). Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.youtube.com/>

Colas, J. (s. d.). Analyse de la régression : Comment interpréter le R-carré et évaluer l'adéquation de l'ajustement ? Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://blog.minitab.com/fr/analyse-de-la-regression-comment-interpreter-le-r-carre-et-evaluer-ladequation-de-lajustement>

Design of experiments: Analyze response surface design | LinkedIn Learning. (s. d.). Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.linkedin.com/learning/quality-analytics-using-minitab/design-of-experiments-analyze-response-surface-design>

François Husson (Réalisateur). (2013, septembre 2). Cours sur les plans d'expériences : Les plans fractionnaires. <https://www.youtube.com/watch?v=LWWLvDlaZQ8>

Khaled. (2024, janvier 28). Les rapports sur les changements climatiques soumis par l'Algérie publiés par le Secrétariat de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. وزارة البيئة والطاقة المتجددة. <https://www.me.gov.dz/ال-الوطنية-حول-ال-تقديم-الجزائر-تقارير-ها-الوطنية-حول-ال-ال-الطاقة-المتجددة>

XL Groupe (Réalisateur). (2017, décembre 11). Web-formation | Les Plans d'expérience (DOE). <https://www.youtube.com/watch?v=ooYqbp6HHVg>

Le plan d'expérience. (2017, novembre 30). <https://www.e-marketing.fr/>. [https://www.e-marketing.fr/thematique/academie-1078/fiche-outils-10154/le-plan-d-experience-324909.htm#&utm\\_source=social\\_share&utm\\_medium=share\\_button&utm\\_campaign=share\\_button&utm\\_content=](https://www.e-marketing.fr/thematique/academie-1078/fiche-outils-10154/le-plan-d-experience-324909.htm#&utm_source=social_share&utm_medium=share_button&utm_campaign=share_button&utm_content=)

Electricité : le tarif moyen appliqué au citoyen « inférieur au coût réel ». (s. D.). Consulté 1 février 2024, à l'adresse <https://www.aps.dz/economie/117852-electricite-le-tarif-moyen-applique-au-citoyen-inferieur-au-cout%20reel>

Final energy consumption of buildings relative to other sectors, 2022 – charts – data & statistics. (s. D.). Iea. Consulté 18 mai 2024, à l'adresse <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/final-energy-consumption-of-buildings-relative-to-other-sectors-2022>

Scibilia, b. (s. D.). Why is it always better to perform a design of experiments (doe) rather than change one factor at a time? Consulté 5 juin 2024, à l'adresse <https://blog.minitab.com/en/applying-statistics-in-quality-projects/why-is-it-always-better-to-perform-a-design-of-experiments-doe-rather-than-change-one-factor-at-a-time>

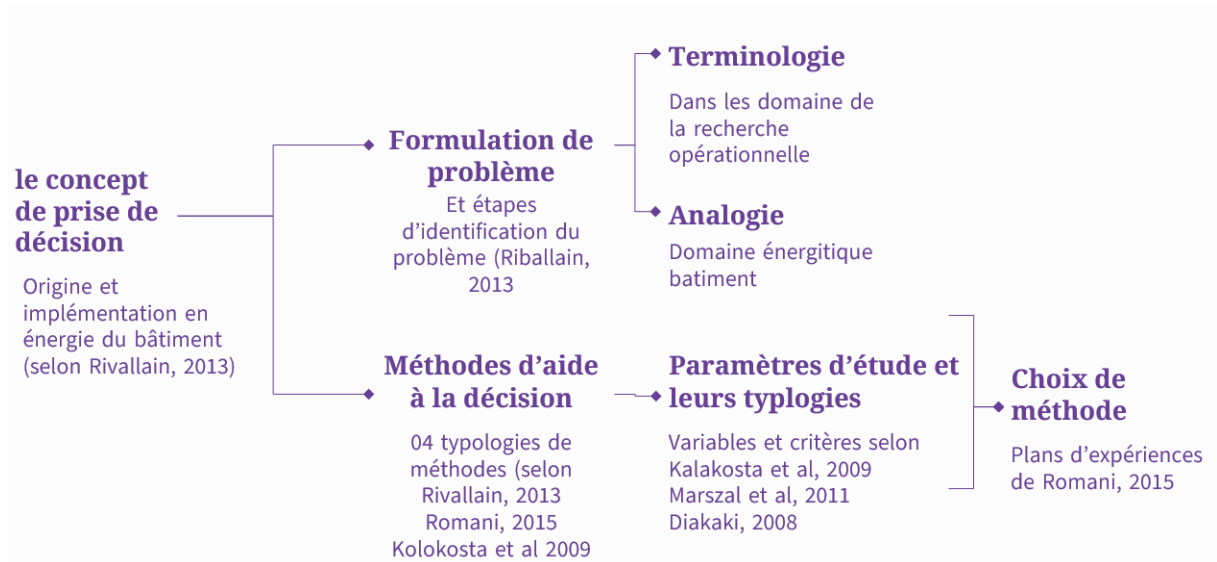
User, s. (s. D.). Publications. Consulté 1 février 2024, à l'adresse <https://www.aprue.org.dz/index.php/fr/communication/publication>



# Annexes

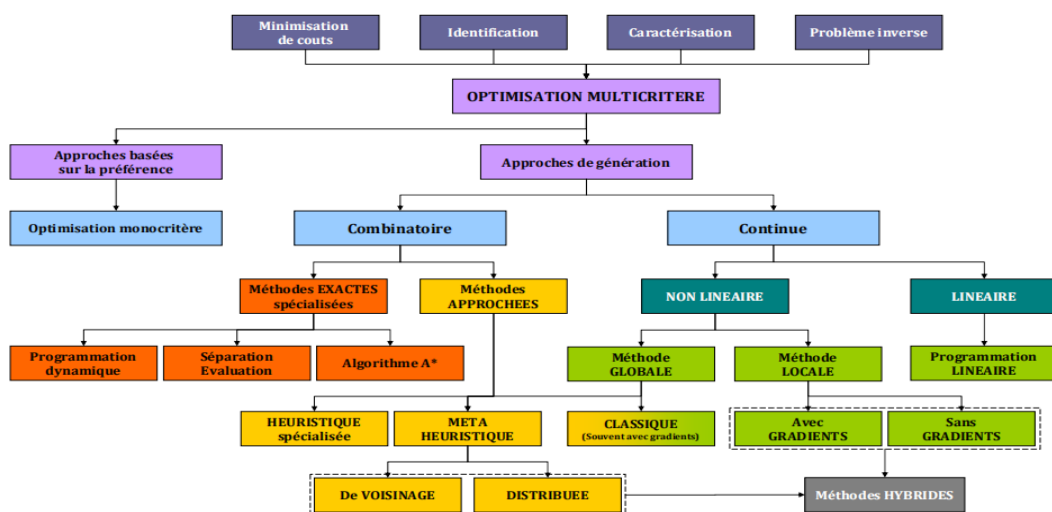
## Annexes :

### Annexe 01 : Méthodes d'aide à la décision multicritère et typologies des paramètres :



Nous retenons du travail de Romani (2015) la classification des méthodes d'aide à la décision multicritère suivante :

1. Approches par itération de simulation
2. Approches par analyse multicritère de la décision MCDA (avec 03 sous types)
3. Approches d'optimisation multicritère (avec leurs méthodes de résolutions)
4. Approches hybrides



V. Figure 39: Classification des méthodes d'optimisation multicritère (adapté de Collette et al, 2003 ; Talbi, 2001) in Rivallain, (2013, p.102.)

Romani a donné une critique vis à vis les méthodes exactes et a cité les inconvénients, qui sont (Romani, 2015, p.88) : la méthode présente plusieurs anomalies, temps de calcul élevé, paramétrage complexe, pas de garantie de convergence vers un optimum. Il a fixé les objectifs à atteindre dans le choix de la méthode : (Romani, 2015, p.89)

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

### **Annexe 02 : Paramètres d'étude et leurs typologies :**

La méthode plan d'expériences et d'autres méthodes de prise de décision appliquée au domaine d'efficacité énergétique, font appel à un ensemble de paramètres (facteurs) qui s'inscrit sous les stratégies ou mesures d'efficacité énergétique ; à l'exemple de l'isolation thermique, l'étanchéité à l'air, la compacité et l'efficacité des équipements...etc. Ce travail s'inspire des paramètres d'études sélectionnées pour l'optimisation énergétique du bâtiment cités dans le travail de Romani (2015) pour la construction de notre matrice initiale.

Stratégie	Système	Sous-système	Actions
Isolation thermique	Enveloppe	Toiture	Isolation thermique de la toiture dans les combles ou addition de panneaux d'isolant rigides sur la surface externe de la toiture.
		Murs extérieurs	Isolation thermique injectée dans les lames d'air ou isolation par l'intérieur (ITI) ou isolation par l'extérieur (ITE)
		Plancher bas	Isolation thermique du plancher en sous face ou pose d'isolant rigide sous chape
		Ouvrants	Remplacement des ouvrants existants par des vitrages haute performance basse émissivité (double ou triple) et menuiseries performantes en isolation Pose de double fenêtre Réduction des surfaces de vitrages Pose de volets isolants
Étanchéité à l'air		Ouvrants et systèmes	Utilisation de composants (portes, fenêtre) performants. Attention particulière sur la mise en œuvre des composants, dont en particulier l'étanchéité de l'interface entre la menuiserie et la structure de l'enveloppe. Contrôle de la mise en œuvre et actions correctives sur l'étanchéité à l'air de l'enveloppe (jointements, bandes adhésives d'étanchéité).
		Enveloppe	Pose de membrane d'étanchéité à l'air dans le cas des enveloppes à ossature.
Compacité	Bâtiment		Fermeture des balcons ou loggias Construction d'un atrium commun à différents bâtiments Construction d'un étage supplémentaire
Exploitation des gains solaires	Protections solaires et stratégies passives		Intégration de protections solaires externes ou internes (dont casquettes, etc.) Remplacement des ouvrants par des vitrages à hautes performances (contrôle solaire) Pose de films réfléchissants sur la face externe du vitrage Réduction de la surface de vitrage, à confort lumineux contrôlé. Exploitation de l'inertie thermique Murs capteurs
		Eclairage	Intégration de lucarnes, puits de lumière, diffuseurs, étagères de lumière
	Chauffage passif		Optimisation de l'orientation bioclimatique (répartition des surfaces de vitrage) Exploitation de l'inertie thermique Pas de volets sur fenêtres des espaces chauffés non occupés
Efficacité des équipements	Equipements techniques	Chauffage	Remplacement de l'équipement existant par un système de chauffage à haut rendement (chaudière gaz/fuel basse température ou à condensation, cycle combinés, etc.)
			Intégration des ENR (énergies renouvelables): chauffage bois, pompe à chaleur, etc. Raccordement à un réseau de chaleur urbain (RCU)
		Ventilation	Remplacement de l'équipement existant par un système à récupération de chaleur sur l'air extrait (ventilation double flux), ou ventilation hygroréglable (type Hygro-B)
		ECS	Intégration des ENR (dont chauffe eau solaire thermique) Efficacité des moteurs et pompes
		Eclairage	Remplacement des lampes à incandescence : systèmes d'éclairage efficaces, lampes fluorescentes, LED, etc.
	Autres équipements	Electricité Spécifique	Remplacement des équipements existants par des produits performants (dont électroménager et audiovisuel), gestion des veilles. Intégration des ENR : panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes, etc.
Suivi, contrôle et gestion énergétique du bâtiment en usage	Régulations des consignes de chauffage		Mesure des consommations et affichage : capteurs, mesure des consommations énergétiques, thermographie infrarouge, Intégration de régulations intelligentes : horloge programmable d'intermittence sur une régulation existante, thermostat d'ambiance programmable, robinets thermostatiques, ordinateurs de bord, systèmes de pilotage des stratégies de gestion en usage
	Contrôle des gains solaires		Capteurs et régulations pour le pilotage des protections solaires actives (dont stores déployables, volets, etc.)

Figure 40: Une classification des actions pour l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, adaptée de (Kolokotsa et al, 2009) (Marszal et al, 2011) (Diakaki, 2008). In (Rivallain, 2013, p.33)

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

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

VI. Figure 41: Les paramètres d'études sélectionnés pour l'optimisation énergétique du bâtiment. Source : Romani, 2015 p.69

### Annexe 03 : La méthode des plans d'expériences en détails (extrait de cours de Dr. Mohamed Skander DAAS-UFMC 1) :

#### *La notion de modèle et de régression linéaire multiple :*

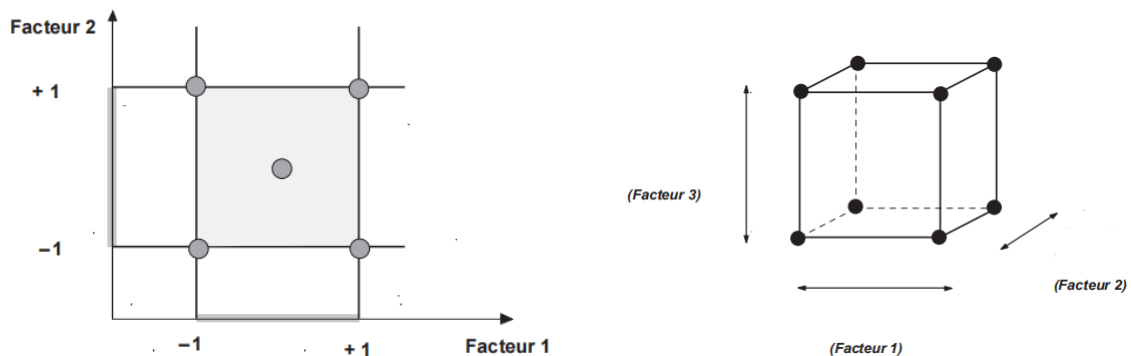
La régression linéaire multiple est une méthode d'analyse de données quantitatives pour l'objectif de mettre en évidence la liaison pouvant exister entre une variable dite expliquée (réponse)  $\rightarrow$  notée ( $y$ ) et plusieurs autres variables dites explicatives (facteurs) notées  $x_1, x_2, \dots, x_k$  avec :  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$

Où le modèle quadratique :  $y = \alpha_0 + \sum \alpha_i x_i + \sum \alpha_{ij} x_{ij} + \sum \alpha_{ii} x_i^2 + \epsilon$

Les tests des hypothèses  $H_0$  et  $H_1$  étant hypothèse de base et hypothèse d'alternatives respectivement, permettent de fournir une règle de décision. Les tests sont effectués à un niveau de signification basé sur une probabilité.

#### *La méthode de conception d'un plan factoriel complet :*

Ce type de plan a pour objectif d'identifier les facteurs qui ont un effet significatif sur la réponse ainsi que l'étude des effets d'interactions. Les plans factoriels complets à 2 niveaux (-1, +1) qui permettent de réduire le nombre de traitements et permettent d'étudier tous les facteurs et toutes leurs interactions.



VII. Figure (a) : Plan à 2 facteurs, Figure (b) : Plan à 3 facteurs. Source : Goupy et Creighton, 2006, p.10 et p.35.

Un plan factoriel complet est représenté par un tableau appelé la matrice d'expériences qui montre toutes les combinaisons possibles  $2^k$  avec  $k$  nombre de facteurs. La matrice est remplie selon **l'algorithme de Yates**. Cet algorithme fonctionne ainsi :

- 1ère colonne : alterner (-1) et (+1)
- 2ème colonne : alterner (-1,-1) et (+1, +1)

- 3ème colonne : alterner (-1,-1,-1,-1) et (+1, +1, +1, +1)
- N -ème colonne : alterner  $2^{n-1} (-1)$  et  $2^{n-1} (+1)$

Pour $2^2$		
Expérience	X1	X2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Pour $2^3$			
Expérience	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

**Effets moyens d'un facteur :**

Nous avons une matrice suivante :

Pour $2^2$			
Expérience	X1	X2	Y
1	-1	-1	Y1
2	+1	-1	Y2
3	-1	+1	Y3
4	+1	+1	Y4

a (-1) et a(+1) correspondent aux moyennes des réponses pour chaque niveau. Pour  $2^2$ , les effets moyens du facteur x1 sont donnés par les équations :

$$a_1^- = \frac{y_1+y_3}{2} \quad \text{Et} \quad a_1^+ = \frac{y_2+y_4}{2} \quad \text{idem pour x2} \rightarrow a_2^- = \frac{y_1+y_2}{2} \quad \text{et} \quad a_2^+ = \frac{y_3+y_4}{2}$$

**L'effet global d'un facteur (coefficient) :**

Est la variation moyenne de la réponse en passant du niveau bas de facteur à un niveau haut. Dans un plan équilibré à 2 niveaux, l'effet estimé d'un facteur est la variation

moyenne de la réponse entre ses 2 niveaux. (Sachant que la réponse dans un niveau est représentée par un effet moyen). D'une manière générale, quand le modèle choisi est un polynôme, les coefficients des termes du premier degré sont les effets des facteurs.

**La réponse théorique :**

La réponse théorique est la moyenne de toutes les réponses observées. (En ajoutant une colonne nommée moyenne)

$$a_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4}$$

Pour 2 <sup>2</sup>				
Expérience	Moyenne	X1	X2	Y
1	+1	-1	-1	Y1
2	+1	+1	-1	Y2
3	+1	-1	+1	Y3
4	+1	+1	+1	Y4
Effets a <sub>i</sub>	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	

**Effets d'interactions :**

Pour calculer l'effet d'une interaction entre plusieurs variables x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub> ..., nous ajoutons à la matrice des effets de colonnes (x<sub>1</sub>x<sub>2</sub> ...) et que nous l'obtenons en faisant le produit « ligne à ligne » des colonnes de variables. Les effets moyens et l'effet global d'une interaction peuvent être calculé de la même manière que celle de l'effet global d'un facteur et ses effets moyens.

$$a_{12} = \frac{a_{12}^+ - a_{12}^-}{2} = \frac{y_1 - y_2 - y_3 + y_4}{4}$$

Pour 2 <sup>2</sup>					
Expérience	Moyenne	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	Y
1	+1	-1	-1	+1	Y1
2	+1	+1	-1	-1	Y2
3	+1	-1	+1	-1	Y3
4	+1	+1	+1	+1	Y4
Effets a <sub>i</sub>	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>12</sub>	

Le modèle mathématique linéaire :  $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + \epsilon$

Effet d'interactions pour exemple d'une matrice 2<sup>3</sup> :

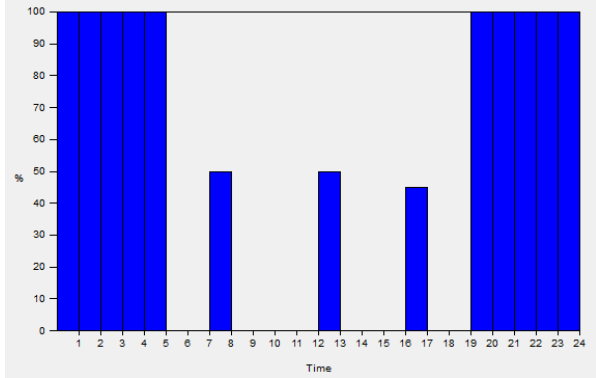
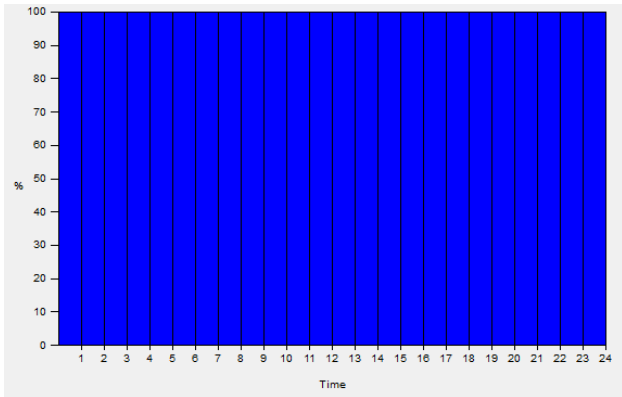


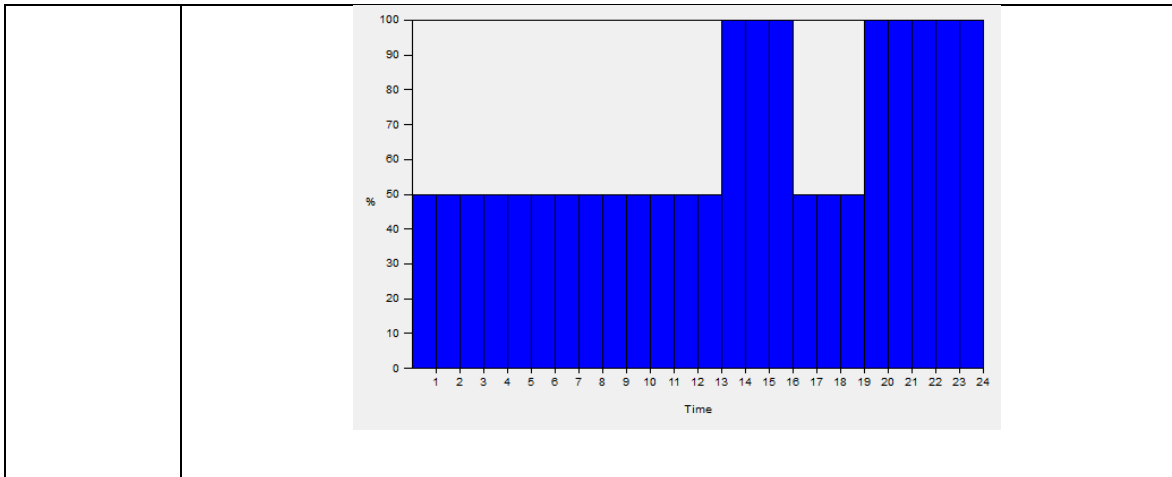
Exp	Moy	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_2$	Réponse
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y8

$$a_{123} = \frac{a_{123}^+ - a_{123}^-}{2} = \frac{\frac{y_2 + y_3 + y_5 + y_8}{4} - \frac{y_1 + y_4 + y_6 + y_7}{4}}{2}$$

### Annexe 04 : les scénarios et planning de fonctionnement : simulation thermique dynamique :

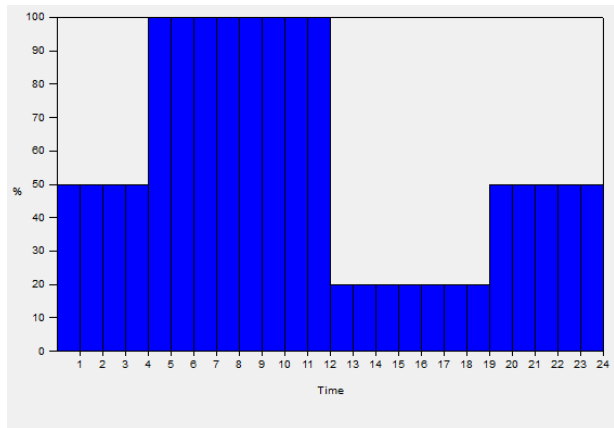
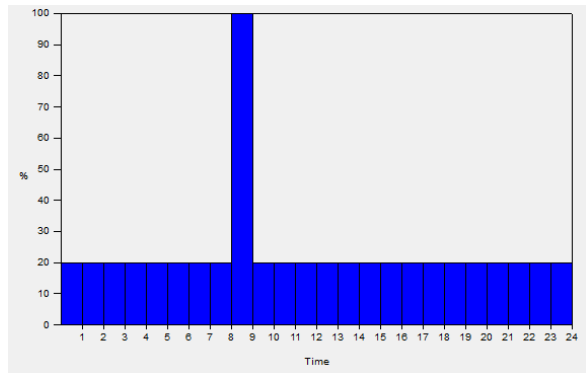
<b>Planning</b>																																																																																																																	
<b>Occupation</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Profiles</th> </tr> <tr> <th>Mo...</th> <th>Monday</th> <th>Tuesday</th> <th>Wednesday</th> <th>Thursday</th> <th>Friday</th> <th>Saturday</th> <th>Sunday</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Jan</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> <tr> <td>Feb</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> <tr> <td>Mar</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> <tr> <td>Apr</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> <tr> <td>May</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> <tr> <td>Jun</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> <tr> <td>Jul</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> <tr> <td>Aug</td> <td>vide</td> <td>jour de vacanc...</td> <td>jour de vacanc...</td> <td>jour de vacanc...</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de vacanc...</td> </tr> <tr> <td>Sep</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> <tr> <td>Oct</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> <tr> <td>Nov</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> <tr> <td>Dec</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de semaine</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de weekend</td> <td>jour de semaine</td> </tr> </tbody> </table>	Profiles								Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday	Jan	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine	Feb	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine	Mar	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine	Apr	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine	May	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine	Jun	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine	Jul	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine	Aug	vide	jour de vacanc...	jour de vacanc...	jour de vacanc...	jour de weekend	jour de weekend	jour de vacanc...	Sep	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine	Oct	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine	Nov	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine	Dec	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine
Profiles																																																																																																																	
Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday																																																																																																										
Jan	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
Feb	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
Mar	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
Apr	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
May	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
Jun	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
Jul	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
Aug	vide	jour de vacanc...	jour de vacanc...	jour de vacanc...	jour de weekend	jour de weekend	jour de vacanc...																																																																																																										
Sep	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
Oct	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
Nov	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
Dec	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de semaine	jour de weekend	jour de weekend	jour de semaine																																																																																																										
<b>Occu :</b>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Time</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Time</p> </div> </div>																																																																																																																

<p><b>Planning journée estivale</b></p>																																																																																																																	
<p><b>Chauffage Planning annuel et scénario type</b></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Profiles</th> </tr> <tr> <th>Mo...</th> <th>Monday</th> <th>Tuesday</th> <th>Wednesday</th> <th>Thursday</th> <th>Friday</th> <th>Saturday</th> <th>Sunday</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Jan</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td></tr> <tr><td>Feb</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td></tr> <tr><td>Mar</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td></tr> <tr><td>Apr</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td></tr> <tr><td>May</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td></tr> <tr><td>Jun</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>Jul</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>Aug</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>Sep</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>Oct</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td></tr> <tr><td>Nov</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td></tr> <tr><td>Dec</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td><td>Consigne chaud</td></tr> </tbody> </table> 	Profiles								Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday	Jan	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Feb	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Mar	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Apr	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	May	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Jun	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Jul	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Aug	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Sep	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Oct	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Nov	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Dec	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud
Profiles																																																																																																																	
Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday																																																																																																										
Jan	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud																																																																																																										
Feb	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud																																																																																																										
Mar	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud																																																																																																										
Apr	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud																																																																																																										
May	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud																																																																																																										
Jun	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
Jul	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
Aug	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
Sep	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
Oct	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud																																																																																																										
Nov	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud																																																																																																										
Dec	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud	Consigne chaud																																																																																																										
<p><b>Climatisation Planning annuel et scénario type</b></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Profiles</th> </tr> <tr> <th>Mo...</th> <th>Monday</th> <th>Tuesday</th> <th>Wednesday</th> <th>Thursday</th> <th>Friday</th> <th>Saturday</th> <th>Sunday</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Jan</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>Feb</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>Mar</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>Apr</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>May</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>Jun</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td></tr> <tr><td>Jul</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td></tr> <tr><td>Aug</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td></tr> <tr><td>Sep</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td><td>Consigne froid</td></tr> <tr><td>Oct</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>Nov</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> <tr><td>Dec</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td><td>Off</td></tr> </tbody> </table>	Profiles								Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday	Jan	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Feb	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Mar	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Apr	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	May	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Jun	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Jul	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Aug	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Sep	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Oct	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Nov	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Dec	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Profiles																																																																																																																	
Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday																																																																																																										
Jan	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
Feb	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
Mar	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
Apr	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
May	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
Jun	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid																																																																																																										
Jul	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid																																																																																																										
Aug	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid																																																																																																										
Sep	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid	Consigne froid																																																																																																										
Oct	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
Nov	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										
Dec	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off																																																																																																										



**Ventilation naturelle :  
Planning Annuel, Journée hiver et été**

Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver
Feb	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver
Mar	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver
Apr	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver
May	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver
Jun	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été
Jul	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été
Aug	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été
Sep	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été	vent été
Oct	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver
Nov	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver
Dec	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver	vent hiver



## Eclairage

Profiles							
Month	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver
Feb	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver
Mar	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver
Apr	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver
May	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été
Jun	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été
Jul	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été
Aug	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été	eclairage été
Sep	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver
Oct	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver
Nov	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver
Dec	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver	eclairage hiver