

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Architecture
Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique

THÈSE

En Vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat en Troisième Cycle

Domaine : Architecture, urbanisme, et métiers de la ville
Filière : Architecture
Spécialité : Architecture écologique et durabilité

Présentée par

KIRATI Amal

Intitulée

**Vers une stratégie bas carbone intégrée dans le processus de projet
architectural.
Cas d'un complexe touristique à Guelma.**

Soutenue le : 04/11/2024

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr LAZRI Youcef	Professeur	Univ. de Guelma	Président
Mr ALKAMA Djamel	Professeur	Univ. de Guelma	Encadreur
Mr DECHAICHA Assoule	M.C.'A'	Univ. de M'sila	Co-encadreur
Mr CHERAITIA Mohammed	M.C.'A'	Univ. de Guelma	Examinateur
Mme SALAH SALAH Hana	M.C.'A'	Univ. de Guelma	Examinatrice
Mr MAHIMOUD Aissa	Professeur	Univ. de Constantine	Examinateur

Année Universitaire : 2023/2024

Avant-propos

À mes parents, que Dieu les protège et les garde toujours près de moi.

À mon mari, qui m'a apporté un soutien immense dans les moments les plus difficiles et m'a encouragé tout au long de ma période de recherche.

À mon frère unique, et tous ceux qui me sont chers.

Remerciement

Je souhaite avant tout exprimer ma gratitude envers Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force et la volonté nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur « **Pr ALKAMA Djamel** » pour ses conseils éclairés, son soutien indéfectible et sa patience tout au long de ce projet de recherche. Son expertise et sa disponibilité ont été des éléments clés dans la réussite de ce travail. Je remercie également mon Co-encadreur « **Dr DECHAICHA Assoule** » pour ses remarques pertinentes, ses encouragements et son aide précieuse. Leurs efforts combinés ont grandement enrichi cette recherche et m'ont permis de surmonter les défis rencontrés en cours de mon parcours.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance envers les honorables membres du jury pour leur engagement et leur précieuse contribution à l'évaluation de ce travail.

Ma reconnaissance s'étend à l'ensemble des enseignants du département d'architecture de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, pour leurs connaissances inestimables et leur soutien continu.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance au **Prof. Dr. Soofia Tahira Elias-Özkan**, du département d'architecture de l'Université technique du Moyen-Orient à Ankara, pour son accompagnement constant et ses précieux conseils.

Je tiens à exprimer une reconnaissance particulière à mes parents, à mon mari, à mon frère unique, ainsi qu'à ma belle-mère, à toute ma famille et à ma belle-famille. Leur soutien constant, surtout durant les périodes les plus difficiles, a été d'une aide inestimable tout au long de la réalisation de ce projet. Je tiens également à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à l'élaboration de ce travail.

ملخص

بسبب التغير المناخي العالمي، أصبحت تقليل انبعاثات الكربون قضية حاسمة. منذ توقيع اتفاقية باريس في عام 2015، تزايد الاهتمام العالمي بالإجراءات المضادة لمواجهة الاحترار العالمي، نظراً للتهديدات الكبيرة التي يمثلها التغير المناخي للمجتمعات البشرية، والتي تعزى بشكل رئيسي إلى استهلاك الطاقة وانبعاثات الغازات الدفيئة. يعتبر قطاع البناء أحد المساهمين الرئيسيين في هذه الانبعاثات، خاصة في المناطق الحضرية. تبرز هذه الحقيقة أهمية تبني استراتيجية منخفضة الكربون في عملية التصميم المعماري للحد من تأثيرها البيئي الكبير.

في هذه الدراسة، نقوم بفحص حالة مبنى خدمي، وهو مجمع سياحي يقع في قالمة (الجزائر)، يتميز بمناخ متوسطي معتدل مع صيف حار وجاف. يركز هذا العمل تحديداً على تقييم البصمة البيئية للمواد المختلفة المستخدمة في البناء والتجميعات التي تدخل في غلاف المبنى. الهدف الرئيسي هو تقييم وتحليل واقتراح سيناريوهات تسمح بتقليل التأثيرات البيئية للمبنى دون المساس براحة المستخدمين، بهدف تحقيق أداء طاقي أفضل وضمان سلوك حراري وبيئي أفضل للحصول على مبنى منخفض الكربون.

استخدمنا طريقة التقييم البيئي لتحليل دورة الحياة، وفقاً للمعايير **ISO 14040** إلى 14044، لدراسة مشروعنا على مدى 80 عاماً، تشمل المراحل الأربع لدورة حياة المبنى (البناء، التشغيل، التجديد والهدم). لتحقيق ذلك، استخدمنا برنامج **Pléiades** الذي يتضمن محرك حساب المحاكاة الحرارية الديناميكية (**STD**) لنمذجة السلوكيات الطاقية للمبنى ومعداته. بالإضافة إلى ذلك، استخدمنا أداة **ACV Equer** لتقييم 12 مؤشراً بيئياً استناداً إلى قاعدة بيانات **Ecoinvent**.

لإجراء هذه الدراسة، قمنا بتقييم الطاقة المطلوبة والتأثيرات البيئية الناتجة عن دراستنا في كل مرحلة من مراحل دورة حياتها. ثم حددنا المرحلة الأكثر أهمية من الناحية البيئية، وكذلك مساهمتها الرئيسية التي تؤثر على سلوك الطاقة وبالتالي على السلوك البيئي. قمنا بدراسة سيناريوهات تحسين مختلفة لتقييم تأثيرها على المبنى، وقارنا النتائج بالحالة الأولية. شملت هذه السيناريوهات نوع الزجاج المستخدم للنوافذ، ومواد العزل الحيوية المصدر، ودمج الطاقة المتجددة. من خلال هذه الطريقة، تمكنا من قياس فعالية التحسينات المختلفة التي تهدف إلى زيادة كفاءة الطاقة في المبنى، مما سيؤدي إلى تقليل تأثيره البيئي.

تشير النتائج إلى أن مرحلة استخدام المبنى تمثل 94.02% من مجموع التأثيرات البيئية. يمكن لتطبيق السيناريوهات المبنية على استراتيجية منخفضة الكربون، مثل تركيب نوافذ **PVC** بثلاثة طبقات زجاجية منخفضة الانبعاث مع الأرجون، استخدام عوازل حيوية المصدر (مثل صوف القنب والفلين) ودمج الطاقات المتجددة، أن تقلل من احتياجات الطاقة للغرفة بنسبة 50%، وتقلل من التأثيرات البيئية بنسبة 35.88% مقارنة بالحالة الأولية. التغييرات الجذرية نحو استخدام مواد حيوية المصدر وإنتاج الطاقة المتجددة تمثل فرصاً مستهدفة لحل التحدي المناخي المستقبلي.

الكلمات المفتاحية: استراتيجية منخفضة الكربون، التأثير البيئي، غلاف المبنى، تحليل دورة الحياة، المحاكاة الحرارية الديناميكية، الكفاءة الطاقية.

Résumé

En raison du changement climatique mondial, la réduction des émissions de carbone est devenue un enjeu crucial. Depuis la signature de l'Accord de Paris en 2015, l'attention mondiale portée aux contre-mesures contre le réchauffement de la planète s'est intensifiée, compte tenu des menaces majeures que représentent les changements climatiques pour les sociétés humaines, principalement dues à la consommation d'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment se distingue comme l'un des principaux contributeurs à ces émissions, en particulier en milieu urbain. Cette réalité souligne l'importance cruciale d'adopter une stratégie bas carbone dans le processus de projet architectural afin de réduire son impact environnemental significatif.

Dans cette étude, nous examinons le cas d'un bâtiment tertiaire, un complexe touristique situé à Guelma (Algérie), caractérisée par un climat tempéré méditerranéen avec des étés chauds et secs. Ce travail se focalise précisément sur l'évaluation de l'empreinte environnementale des divers matériaux de construction et des assemblages utilisés dans l'enveloppe du bâtiment. L'objectif principal consiste à évaluer, analyser et suggérer des scénarios qui permettent de diminuer les impacts environnementaux du bâtiment sans compromettre son confort, dans le but d'atteindre une meilleure performance énergétique et d'assurer un meilleur comportement thermique et environnemental pour avoir un bâtiment bas carbone.

Nous avons utilisé la méthode d'évaluation environnementale de l'Analyse de Cycle de Vie, conforme aux normes ISO 14040 à 14044, pour examiner notre étude sur une période de 80 ans, couvrant les quatre phases du cycle de vie du bâtiment (construction, exploitation, rénovation et démolition). Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel Pléiades, qui intègre un moteur de calcul de Simulation Thermique Dynamique (STD) pour modéliser les comportements énergétiques du bâtiment et de ses équipements. De plus, nous avons utilisé l'outil ACV Equer pour évaluer les 12 indicateurs environnementaux en nous appuyant sur la base de données Ecoinvent.

Pour réaliser cette étude, nous avons évalué l'énergie requise et les impacts environnementaux engendrés par notre cas d'étude à chaque étape de son cycle de vie. Nous avons ensuite déterminé la phase la plus critique du point de vue environnemental, ainsi que son contributeur ayant une influence significative sur le comportement énergétique et, par conséquent, sur le comportement environnemental. Nous avons étudié différents scénarios d'amélioration pour évaluer leur impact sur le bâtiment, comparant les résultats au cas initial.

Résumé

Ces scénarios incluent le type de vitrage utilisé pour les fenêtres, les matériaux d'isolation biosourcés et l'intégration des énergies renouvelables. Grâce à cette méthode, nous avons pu mesurer l'efficacité de diverses améliorations visant à augmenter l'efficacité énergétique du bâtiment, ce qui entraînera une réduction de son impact environnemental.

Les résultats indiquent que la phase d'utilisation de notre cas d'étude représentait 94,02 % de l'ensemble des impacts environnementaux. L'application des scénarios basés sur une stratégie bas carbone, telles que l'installation des fenêtres en PVC à triple vitrage peu émissif argon, l'utilisation d'isolants biosourcés (la laine de chanvre et le liège) et l'intégration des énergies renouvelables, peuvent réduire les besoins énergétiques de la chambre à 50 %, et diminuer les impacts environnementaux à 35.88 % par rapport à la situation initiale. Les changements radicaux vers l'utilisation des matériaux biosourcés et la production d'énergie renouvelable représentent des opportunités ciblées pour résoudre le défi climatique à venir.

Mots clés : stratégie bas carbone, impact environnemental, enveloppe de bâtiment, Analyse de Cycle de Vie, Simulation Thermique Dynamique, efficacité énergétique.

Abstract

Due to global climate change, reducing carbon emissions has become a crucial issue. Since the signing of the Paris Agreement in 2015, global attention to countermeasures against global warming has intensified, considering the significant threats that climate change poses to human societies, primarily due to energy consumption and greenhouse gas emissions. The building sector stands out as one of the main contributors to these emissions, particularly in urban areas. This reality underscores the critical importance of adopting a low-carbon strategy in the architectural project process to significantly reduce its environmental impact.

In this study, we examine the case of a tertiary building, a tourist complex located in Guelma, Algeria, characterized by a temperate Mediterranean climate with hot and dry summers. This work specifically focuses on assessing the environmental footprint of various construction materials and assemblies used in the building envelope. The main objective is to evaluate, analyze, and suggest scenarios that can reduce the building's environmental impacts without compromising its comfort, aiming for better energy performance and ensuring better thermal and environmental behavior to achieve a low-carbon building.

We used the Life Cycle Assessment (LCA) environmental evaluation method, compliant with ISO 14040 to 14044 standards, to examine our study over a period of 80 years, covering the four phases of the building's life cycle (construction, operation, renovation, and demolition). To do this, we used the Pléiades software, which integrates a Dynamic Thermal Simulation (DTS) calculation engine to model the building's energy behaviors and its equipment. Additionally, we used the LCA Equer tool to evaluate 12 environmental indicators based on the Ecoinvent database.

To conduct this study, we assessed the energy required and the environmental impacts generated by our case study at each stage of its life cycle. We then identified the most critical phase from an environmental standpoint, as well as its key contributor influencing energy behavior and, consequently, environmental behavior. We examined different improvement scenarios to evaluate their impact on the building, comparing the results to the initial case. These scenarios included the type of glazing used for the windows, biosourced insulation materials, and the integration of renewable energy. Through this method, we were able to measure the effectiveness of various improvements aimed at increasing the building's energy efficiency, which will subsequently reduce its environmental impact.

Abstract

The results indicate that the use phase of our case study represented 94.02% of the total environmental impacts. Implementing scenarios based on a low-carbon strategy, such as installing PVC windows with triple low-emissivity argon glazing, using biosourced insulations (hemp wool and cork), and integrating renewable energy, can reduce the room's energy needs by 50% and decrease environmental impacts by 35.88% compared to the initial situation. Radical changes towards the use of biosourced materials and renewable energy production represent targeted opportunities to address the upcoming climate challenge.

Keywords: low-carbon strategy, environmental impact, building envelope, Life Cycle Assessment, Dynamic Thermal Simulation, energy efficiency.

Table des matières

Table des matières

<i>Avant-propos</i>	I
<i>ملخص</i>	III
<i>Résumé</i>	IV
<i>Abstract</i>	VI
<i>Table des matières</i>	IX
<i>Liste des figures</i>	XVIII
<i>Liste des tableaux</i>	XXIV
INTRODUCTION GENERALE	
Introduction	1
Problématique	2
Hypothèses de la recherche	3
Objectifs de la Recherche	4
Méthodologie de la recherche	4
Structure de la thèse	5
CHAPITRE I : ENVIRONNEMENT ET DEVELOPPEMENT DURABLE : IMPACTS ET ENJEUX DES BATIMENTS TOURISTIQUES	9
Introduction	10
1. La notion du développement durable, environnement et impact environnemental 10	
1.1 La notion du développement durable	10
1.1.1 Apparition et genèse de la notion du « développement durable »	13
1.2 Environnement	14
1.3 Le concept de l’impact environnemental	15
1.3.1 Spécificité des différents impacts environnementaux	16
1.3.1.1 L’échelle planétaire	16
1.3.1.1.1 Effet de serre	16
1.3.1.1.2 La destruction de la couche d’ozone	17
1.3.1.1.3 Épuisement des ressources	18
1.3.1.1.4 Pollution et acidification des mers	18
1.3.1.2 L’échelle régionale	19
1.3.1.3 L’échelle locale	20
1.3.1.4 L’échelle du bâtiment	21
1.3.1.4.1 La consommation énergétique des bâtiments	21
1.3.1.4.2 Les déchets des bâtiments	21
1.3.1.4.3 Les matériaux et produits de constructions	21

1.3.1.4.4 Les chantiers	22
2. Le bâtiment touristique, ses enjeux et ses rôles	22
2.1 Le fonctionnement d'un bâtiment touristique	24
2.2 Les enjeux environnementaux liés au bâtiment touristique	24
2.3 Les émissions du bâtiment touristique	26
2.4 Les consommations du bâtiment touristique	26
3. Portée de l'évaluation environnementale du bâtiment	26
3.1 Évaluation	26
3.2 Le cycle d'une démarche d'évaluation environnementale.....	27
3.3 Importance des méthodes d'évaluation environnementale	29
3.4 Typologie des méthodes d'évaluation environnementale.....	30
3.4.1 Les méthodes de type check-list	30
3.4.2 Les méthodes de labellisation	31
3.4.2.1 Les matrices d'impacts	31
3.4.3 Les méthodes d'aide à la décision	32
3.4.4 La méthode d'analyse du cycle de vie (ACV)	34
3.5 Etat des lieux des différentes méthodes	35
3.5.1 Usage des différentes méthodes.....	35
3.5.2 Critères de choix.....	35
Conclusion.....	36
CHAPITRE II : LA TRANSITION ENERGETIQUE VERS UNE STRATEGIE BAS CARBONE : UNE REPOSE INTERNATIONALE AUX ENJEUX ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	37
Introduction	38
1. La transition énergétique.....	38
2. Le contexte de la Stratégie Bas Carbone.....	39
3. Les objectifs de la Stratégie Bas Carbone	42
3.1 Atteindre la neutralité carbone	42
3.2 Réduire l'empreinte carbone	43
4. Les trois piliers de la stratégie bas carbone appliqués au bâtiment	43
5. Les labels liés aux stratégies bas carbone.....	44
5.1 Le label BBCA	44
5.1.1 Les critères spécifiques du label BBCA.....	45
5.1.1.1 La construction raisonnée	45
5.1.1.2 L'exploitation maîtrisée	45
5.1.1.3 Le stockage carbone.....	45

5.1.1.4	Une économie circulaire	46
5.2	Le Label bas carbone	46
6.	Le bâtiment bas carbone.....	47
6.1	Exemples des bâtiments bas carbones réalisés	48
6.1.1	Hôtel de Ville de Chartres.....	48
6.1.2	Bâtiment Max Weber / Université Paris Nanterre	49
6.1.3	Résidence au cœur de La Duranne « Aix en Provence ».....	50
7.	Alignement de la stratégie bas carbone avec la réglementation environnementale 2020	51
7.1	La réglementation environnementale RE 2020	51
7.2	Le contexte de mise en place de la RE2020	51
7.3	Objectifs de la RE2020.....	53
7.4	Les 6 indicateurs faisant l’objet d’exigences dans la RE2020	54
7.4.1	Exigences relatives à la thématique du carbone	54
7.4.1.1	IC construction.....	56
7.4.1.2	IC énergie : l’impact sur le changement climatique	56
8.	L’Algérie face au changement climatique	56
8.1	La politique énergétique en Algérie.....	57
8.1.1	Les textes règlementaires	57
8.1.2	Documents techniques règlementaire	59
8.1.3	Les dispositifs institutionnels de l’efficacité énergétique en Algérie.....	59
8.1.3.1	Le programme national de maîtrise de l’énergie (PNME).....	59
8.1.3.2	Le fonds national pour la maîtrise de l’énergie (FNME)	60
8.1.3.3	Le comité intersectoriel de la maîtrise de l’énergie (CIME).....	60
8.1.3.4	Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l’utilisation de l’énergie (APRUE).....	60
8.2	Programme national d’efficacité énergétique à l’horizon 2030	61
8.2.1	Secteurs d’intervention de programme	61
8.2.2	Les axes d’interventions de programme	61
8.2.3	Les programmes nationaux pour la maîtrise d’énergie.....	62
8.3	Les techniques de construction en Algérie	64
8.4	Les enjeux énergétiques associés à la construction des bâtiments.....	64
Conclusion.....		65
CHAPITRE III : ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) : UNE METHODE CRUCIALE POUR EVALUER L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES BATIMENTS.		66

Table des matières

Introduction	67
Section I : L'Analyse de Cycle de Vie	67
1. Présentation de l'Analyse de Cycle de Vie	67
2. Historique de l'Analyse de Cycle de Vie.....	68
3. Cadre méthodologique de l'analyse de cycle de vie.....	70
3.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude.....	70
3.2 Inventaire du cycle de vie	71
3.3 Evaluation de l'impact de cycle de vie.....	71
3.4 Interprétation des résultats	72
4. Principaux domaines d'application de l'ACV	72
5. Normalisation de l'approche analyse de cycle de vie ACV.....	73
6. Outils d'évaluations et de réalisation d'ACV produits.....	73
7. Des bases de données d'ACV de produit.....	74
8. Limites de la méthode d'analyse du cycle de vie de produit.....	75
Section II : L'Analyse de Cycle de Vie des bâtiments	75
1. Analyse de Cycle de Vie des bâtiments.....	75
1.1 Le bâtiment : typologie et composition	76
2. Méthodologie d'analyse de cycle de vie ACV des bâtiments	77
2.1 Modélisation d'un bâtiment	78
2.2 Indicateurs environnementaux considérés pour le bâtiment	80
3. Les outils d'évaluations des bâtiments	80
3.1 Les outils d'analyse de cycle de vie ACV de bâtiments.....	80
3.2 Caractéristiques des outils d'analyse de cycle de vie ACV des bâtiments	84
4. Projets de recherche et de normalisation sur l'ACV des bâtiments	85
5. Les bases de données utilisées dans les études ACV des bâtiments	87
5.1 Les données ACV génériques multisectorielles.....	87
5.2 Les données ACV génériques pour le secteur de la construction.....	89
5.3 Bases de données ACV spécifiques aux déclarations environnementales	89
6. Les déclarations environnementales.....	91
7. Limites de la méthode ACV dans le bâtiment.....	92
8. Principaux résultats issus de l'état de l'art (ACV de bâtiment)	93
8.1 Analyse du cycle de vie des bâtiments hôteliers	94
Conclusion.....	94
CHAPITRE IV : EXPLORATION DE GUELMA : CONTEXTE, POTENTIEL TOURISTIQUE ET PRESENTATION DE L'OUTIL DE SIMULATION CHOISE.....	96

Introduction	97
Section I : la ville de Guelma comme un contexte d'étude.	97
1. Présentation de la ville de Guelma.....	97
2. Situation géographique de la ville de Guelma	97
3. Contexte historique de la ville de Guelma	98
3.1 La cité militaire : avant 1850.....	99
3.2 Guelma la cité coloniale : 1852-1962	99
3.3 Guelma période de logique populaire : 1962-1966.....	99
3.4 Guelma lors de la période de la logique industrielle : 1966-1989	99
3.5 Guelma de 1990 jusqu'à l'époque contemporaine	100
4. Contexte géophysique de la ville de Guelma.....	101
4.1 Relief et topographie	101
4.2 Hydrologie.....	101
5. Potentialités naturelles de la région de Guelma	102
5.1 Potentialités forestières	102
5.2 Potentialités agricoles.....	102
5.3 Potentialités hydrauliques	103
6. Le contexte climatique de la ville	103
6.1 Température moyenne à Guelma.....	103
6.2 Rayonnement solaire.....	105
6.3 Précipitation.....	106
6.4 Humidité.....	107
6.5 La vitesse de l'air	108
Section II : Les complexes touristiques de la ville de Guelma	111
1. Critère de choix de secteur tertiaire	111
1.1 Tertiaire	111
1.2 Les complexes touristiques	111
2. Guelma et ses opportunités touristiques et thermales	111
2.1 Zone de hammam Debagh et ses complexes	112
2.2 Zone de hammam Ouled Ali et ses Complexes	113
3. Identification du cas d'étude	115
3.1 Localisation de Cas d'étude.....	116
3.2 Description de Cas d'étude.....	117
3.2.1 Descriptif des matériaux de construction.....	120
3.2.2 Description des équipements	122

3.2.3	Description du système HVAC	122
3.2.4	La Ventilation.....	122
3.3	Les scénarios d’usage	123
Section III : Choix des Outils de Simulation.....		124
1.	Présentation du logiciel « Pleiades »	124
1.1.1	Bibliothèque	125
1.1.2	Modeleur (Anciennement ALCYONE)	125
1.1.3	BIM.....	125
1.1.4	Éditeur (Anciennement COMFIE- Pléiades).....	125
1.1.5	Résultats	126
1.1.6	ACV EQUER (Anciennement nova-EQUER).....	126
2.	Pléiades : un outil de simulation thermique dynamique STD.....	126
2.1	Principe de calcul	127
2.1.1	Transfert de chaleur dans les parois extérieures	127
2.1.2	Coefficients de transfert superficiel (hint et hext).....	128
2.1.3	Calcul des sollicitations de flux solaire	128
2.1.4	Sollicitation de puissance interne.....	128
2.1.5	Intégration et résultats.....	129
Conclusion.....		130
CHAPITRE V : ANALYSE DE CYCLE DE VIE D'UN BATIMENT HOTELIER :		
OPTIMISATION THERMIQUE, ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENTALE		
Introduction		132
Section I : Protocole de la Campagne de mesures et d'enquête		132
1.	Protocole de la campagne de mesures de la qualité du confort.....	132
2.	Evaluation de la qualité de confort par la campagne de mesures.....	134
2.1	Mesures de la température	134
2.2	Mesures de l’humidité.....	136
2.3	Mesures de la vitesse de l’air	137
3.	Protocole de l’enquête auprès des usagers	138
4.	Evaluation de la qualité du confort par l’enquête de satisfaction auprès des usagers	139
Section II : la simulation thermique et environnementale du cas d’étude.....		139
1.	Bases des données pour la simulation thermique et environnementale du bâtiment	139
2.	Méthodologie de la Simulation Thermique et Environnementale	140
2.1	L’analyse thermique.....	140

2.2	L'analyse énergétique.....	140
2.3	L'analyse environnementale	141
3.	Simulation thermique dynamique	141
3.1	Le site.....	141
3.1.1	Données météorologiques.....	141
3.2	Le bâti.....	142
3.2.1	La géométrie du bâtiment.....	142
3.2.2	Enveloppe du bâtiment	144
3.3	Les scénarios d'usage du bâtiment	146
3.3.1	Scénario d'occupation	147
3.3.1.1	Scénario d'occultations.....	147
3.3.2	Scénario de la puissance dissipée	148
3.3.3	Scénarios saisonniers.....	148
3.3.3.1	Consigne de température.....	148
3.3.3.1.1	Scénario hebdomadaire.....	149
3.3.3.1.2	Scénario annuel.....	149
3.3.3.1.3	Scénario de rafraîchissement (Été)	149
3.3.3.1.4	Scénario de chauffage (Hiver)	150
3.3.4	Scénario de ventilation.....	150
3.3.5	Scénario du niveau d'éclairément	150
3.3.6	Les besoins en eau chaude sanitaire	151
4.	Evaluation de Cycle de Vie	151
4.1	Transport.....	152
4.2	Energie.....	153
4.3	Eau	153
4.4	Déchet	153
5.	Les niveaux de simulation.....	153
5.1	Premier niveau de simulation : le bâtiment dans son état initial.....	154
5.2	Deuxième niveau de simulation : choix des menuiseries	154
5.3	Troisième niveau de simulation : Variation de la nature d'isolant sur les façades	154
5.4	Quatrième niveau de simulation : Augmentation de l'épaisseur d'isolation existante au niveau du toit	155
5.5	Cinquième niveau de simulation : Énergie renouvelable (panneau photovoltaïque).....	155

5.6	Sixième niveau de simulation : mise en œuvre simultanée de tous les scénarios d'amélioration.....	156
	Section III : Résultats et discussion	156
1.	Cas du scénario réel	156
1.1	Performance thermique	156
1.2	Performance énergétique.....	157
1.3	Performance environnementale	158
2.	Cas du scénario de choix des menuiseries.....	160
3.	Cas du scénario de la nature d'isolant sur les façades	162
4.	Cas du scénario d'augmentation d'épaisseur d'isolation existante au niveau du toit 164	
5.	Cas du scénario d'énergie renouvelable (PV).....	166
6.	Cas du scénario optimal du cas d'étude	167
6.1	Performance thermique	167
6.2	Performance énergétique.....	168
6.3	Performance environnementale	169
6.3.1	Analyse et comparaison de la phase d'utilisation	170
	Conclusion.....	171
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	173
1.	Conclusion générale	174
2.	Limites de la recherche et difficultés rencontrées	176
3.	Futures pistes de recherche	177
	BIBLIOGRAPHIE	178
	ANNEXES.....	202
	Annexe 1	203
	Annexe 2	206
	Annexe 3	207
	Annexe 4	210
	Annexe 5	214

Liste des figures

Liste des figures

Fig. 1 : Récapitulation de la problématique posée et la méthode d'évaluation utilisée (Auteur, 2024).....	8
Fig. 2: Le développement durable est au centre des trois domaines principaux : l'économie, la société et l'environnement (Safer, 2016).	12
Fig. 3: Le concept de développement durable repose sur cinq dimensions selon Sachs (Sachs, 1993).....	12
Fig. 4 : Un cadre conceptuel dans le domaine de l'environnement proposé par Theys (Theys, 1993).....	14
Fig. 5 : Un schéma de l'effet de serre simplifié proposé par Minh (Minh, 1998).	17
Fig. 6 : Le réchauffement global jusqu'à 2100 selon les scénarios du GIEC (Kaoula, 2017).	17
Fig. 7 : Structure des domaines environnementaux dans un bâtiment hôtelier (Kaoula, 2017).	23
Fig. 8 : Flux entre le bâtiment touristique et les divers compartiments de l'environnement (Kaoula, 2017).....	24
Fig. 9 : Les impacts environnementaux engendrés par le bâtiment touristique (Kaoula, 2017).	25
Fig. 10 : les étapes essentielles du processus d'évaluation (auteur, 2024).	27
Fig. 11 : Le cycle de la démarche d'évaluation environnementale d'un bâtiment (Kaoula, 2017).....	28
Fig. 12 : Recherche de la meilleure solution (Brunner & Starkl, 2004).	32
Fig. 13 : Les variations des émissions et des puits de gaz à effet de serre sur le territoire français de 1990 à 2050 (en MtCO ₂ eq) (Limousin, 2022).	40
Fig. 14 : Trajectoire de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre du secteur du bâtiment selon la SNBC (Limousin, 2022).	41
Fig. 15 : Le parcours établi par l'Agence internationale de l'énergie afin d'atteindre la neutralité carbone à l'échelle mondiale d'ici 2050 (Désaunay, 2023).	42
Fig. 16 : Hôtel de Ville de Chartres (Ville de Chartres, 2018).	49
Fig. 17 : Bâtiment Max Weber - Université Paris Ouest Nanterre (Ekopolis, 2023).....	49
Fig. 18 : Résidence au cœur de La Duranne « Aix en Provence » (Sinteo, 2016).	50
Fig. 19 : Calendrier d'application et de publication (Chauvin & Palis, 2021).....	52
Fig. 20 : Les principaux changements de la RE 2020 (Arce, 2022).....	53
Fig. 21 : Les 6 indicateurs faisant l'objet d'exigences dans la RE2020 (Chauvin & Palis, 2021).....	54

Liste des figures

Fig. 22 : Principe de l'ACV (Arce, 2022).	55
Fig. 23 : Contributions aux impacts sur le cycle de vie du bâtiment (Arce, 2022)	55
Fig. 24 : Le cycle de vie d'un produit (Dakhia, 2019).	68
Fig. 25 : Historique et évolution de l'ACV (Le Pôle Eco-conception, 2023).	69
Fig. 26 : Cadre méthodologique de l'ACV (ISO 14040, 2006).	70
Fig. 27 : Les étapes d'évaluation de l'impact de cycle de vie (Dewandre, 2017).	71
Fig. 28 : Le Cycle de vie d'un bâtiment (Dakhia, 2019).	77
Fig. 29 : Principe de l'Analyse de Cycle de Vie d'un bâtiment (Thiers, 2008).	78
Fig. 30 : Types de frontières du bâtiment (Peuportier, 2008).	79
Fig. 31 : La modélisation d'une ACV bâtiment (Inies, 2024).	79
Fig. 32 : Tableau des 12 indicateurs environnementaux évalués (Thiers & Peuportier, 2012).	80
Fig. 33 : Indicateurs environnementaux d'Elodie et ses unités (Pannier, 2014).	81
Fig. 34 : Les logiciels utilisés pour l'ACV des bâtiments à l'échelle mondiale (Lasvaux, 2010).	82
Fig. 35 : Présentation de la structure de pléiades avec ses composants et ses modules (Izuba énergies, 2023).	83
Fig. 36 : Indicateurs environnementaux d'Equer (Pannier, 2014).	84
Fig. 37 : Les principales caractéristiques d'un modèle pour l'ACV des bâtiments (Lasvaux, 2010).	85
Fig. 38 : Bases de données génériques utilisées dans les outils pour l'ACV des bâtiments (Lasvaux, 2010).	88
Fig. 39 : Bases de données ACV génériques pour le secteur de la construction utilisées dans les outils pour l'ACV des bâtiments (Lasvaux, 2010).	89
Fig. 40 : Bases de données au format EPD utilisées dans les outils pour l'ACV des bâtiments (Lasvaux, 2010).	90
Fig. 41 : Le tableau des flux environnementaux reportés pour chaque FDES (Lasvaux, 2010).	91
Fig. 42 : La situation géographique de la ville de Guelma (Direction du Commerce de la Wilaya de Guelma, 2021).	98
Fig. 43 : La transformation de la structure urbaine de Guelma de 1848 à 2016 (Sayad, 2021).	100
Fig. 44 : La composition du relief de Guelma (Mokhnache, 2023).	101
Fig. 45 : Cultures et superficies agricoles pour la ville de Guelma (Sayad, 2021).	102

Liste des figures

Fig. 46 : La température moyenne quotidienne maximale (ligne rouge) et moyenne quotidienne minimale (ligne bleue) à Guelma (Weather Spark, 2023).....	103
Fig. 47 : La Température horaire moyenne à Guelma (Weather Spark, 2023).....	105
Fig. 48 : Le rayonnement solaire en ondes courtes quotidien moyen atteignant le sol en m ² (Weather Spark, 2023).	105
Fig. 49 : La précipitation quotidienne à Guelma (Weather Spark, 2023).....	106
Fig. 50 : Les valeurs d'humidité relative à Guelma (Weather Spark, 2023).....	107
Fig. 51 : La vitesse moyenne du vent à Guelma (Weather Spark, 2023).	109
Fig. 52 : La direction du vent à Guelma (Weather Spark, 2023).	110
Fig. 53 : Le complexe hammam Chellala à Guelma (Douakha, 2022).....	113
Fig. 54 : Le complexe touristique El Baraka (DTA, 2022b).	114
Fig. 55 : Le complexe touristique Bouchahrine (DTA, 2022b).....	115
Fig. 56 : Vue aérienne du complexe touristique « El Baraka » (Google Earth, 2002, traité par auteur).....	115
Fig. 57 : L'extension (partie B) du complexe touristique « El Baraka ».....	116
Fig. 58 : (a) situation de la ville de Guelma sur la carte de l'Algérie ; (b) situation de la commune d'Héliopolis sur la carte de la ville de Guelma ; (c) situation du complexe touristique sur la carte de la commune d'Héliopolis.....	116
Fig. 59 : Plan d'ensemble du complexe « El Baraka ».	117
Fig. 60 : (a) Appartement en F3 en RDC, (b) Appartement en f2 en 1 ^{er} étage, (c) Façade principale du bungalow.	118
Fig. 61 : (a) situation d'hôtel sur le plan de masse du complexe touristique ; (b) plan du sous-sol ; (c) plan du RDC ; (d) plan du 1er, 2eme et 3eme étage ; (e) plan de la terrasse ; (f) façade principale ; (g) façade postérieure	119
Fig. 62 : schéma récapitulatif du processus de choix de cas d'étude (Auteur, 2023).....	120
Fig. 63 : Présentation de la structure de Pleiades avec ses composants (auteur, 2023).	124
Fig. 64 : Résultats de comparaison des besoins annuels en chauffage (Peuportier, 2005). ..	127
Fig. 65 : Résultats de comparaison des besoins annuels en climatisation (Peuportier, 2005).	127
Fig. 66 : Schéma de la campagne de mesure et les aspects pris en compte par notre méthode (Auteur, 2023).	133
Fig. 67 : représentation synthétique de la procédure de protocole des mesures (Auteur, 2022).	134

Liste des figures

Fig. 68 : Mesures comparatives de la température extérieure et intérieure de la chambre en saison hivernale (Auteur, 2022).	135
Fig. 69 : Mesures comparatives de la température extérieure et intérieure de la chambre en saison estivale (Auteur, 2022).	135
Fig. 70 : Mesures comparatives de l'humidité extérieure et intérieure de la chambre en saison hivernale (Auteur, 2022).	136
Fig. 71 : Mesures comparatives de l'humidité extérieure et intérieure de la chambre en saison estivale (Auteur, 2022).	136
Fig. 72 : Mesures comparatives de la vitesse d'air extérieure et intérieure de la chambre en saison hivernale et estivale (Auteur, 2022).	137
Fig. 73 : Importation d'un nouveau fichier météorologique à l'aide du module STD COMFIE de Pleiades (Pleiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).....	142
Fig. 74 : Description géométrique du bâtiment à modéliser (Pleiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	143
Fig. 75 : Volumétries du bâtiment (Pleiades (version 5.23.4.4), assemblées par l'auteur, 2023).....	144
Fig. 76 : création d'un nouveau scénario d'occupation spécifique à notre chambre d'étude (Pleiades (version 5.23.4.4), créé par l'auteur, 2023).	147
Fig. 77 : Création d'un nouveau scénario de rafraîchissement de notre cas d'étude (Pleiades (version 5.23.4.4), créé par l'auteur, 2023).	149
Fig. 78 : Création d'un nouveau scénario de chauffage de notre cas d'étude (Pleiades (version 5.23.4.4), créé par l'auteur, 2023).	150
Fig. 79 : Des hypothèses avancées par le module ACV Equer (Pleiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	152
Fig. 80 : diagramme de Givoni de la zone étudiée (Pleiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	156
Fig. 81 : Besoin d'énergie annuelle pour le refroidissement et le chauffage de la chambre dans son cas initial (Pleiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).....	157
Fig. 82 : Consommation d'énergie mensuelle pour le refroidissement et le chauffage de la chambre dans son cas initial (Pleiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).....	157
Fig. 83 : Eco profil de la chambre étudiée (Pleiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).....	158
Fig. 84 : Besoin d'énergie annuelle pour le refroidissement et le chauffage de la chambre lors du changement du vitrage (Pleiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	161

Liste des figures

Fig. 85 : Comparaison des impacts environnementaux du scénario initial et lors de changement de menuiserie (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	161
Fig. 86 : (a) Coefficients de conductivité thermique et (b) l'impact carbone de différents matériaux d'isolation (Anchisi, 2020).....	162
Fig. 87 : comparaison des besoins en énergie entre l'isolation des murs extérieurs en fibre de bois et en laine de chanvre (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	163
Fig. 88 : Comparaison des impacts environnementaux du scénario initial, d'isolation des murs extérieurs en fibre de bois et d'isolation des murs extérieurs en laine de chanvre (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	164
Fig. 89 : Comparaison des besoins en énergie (a) et des impacts environnementaux (b) du scénario initial et la variante d'amélioration au niveau de toiture (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	165
Fig. 90 : Comparaison entre la consommation électrique et la production photovoltaïque des panneaux (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).....	166
Fig. 91 : Comparaison des impacts environnementaux du scénario initial et de la variante d'intégration des PV (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	166
Fig. 92 : Diagramme de Givoni du scénario optimal de cas d'étude (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).....	167
Fig. 93 : Besoin d'énergie annuelle pour le refroidissement et le chauffage de la chambre dans son cas optimal (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	168
Fig. 94 : Consommation d'énergie mensuelle pour le refroidissement et le chauffage de la chambre dans son cas optimal (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).....	168
Fig. 95 : Comparaison des impacts environnementaux totaux du scénario initial et du scénario optimale (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	169
Fig. 96 : Résultats détaillés pour chaque phase de l'analyse du cycle de vie pour les deux cas (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	170
Fig. 97 : Résultats détaillés pour chaque phase d'utilisation de l'analyse du cycle de vie pour les deux cas (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).....	171
Fig. 98 : Thermo-Hygromètre HANNA 9564.	203
Fig. 99 : Anémomètre à hélice BA16.	204

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tab. 1 : les événements et les définitions clés liées au développement durable depuis 1972 jusqu'à 2021 (auteur, 2024).	13
Tab. 2 : Les enjeux environnementaux associés au bâtiment touristique (Kaoula, 2017) inspiré du modèle de (Mandallena, 2006).	25
Tab. 3 : importance de l'évaluation environnementale des bâtiments	29
Tab. 4 : classification de liste des méthodes de contrôle (André et al., 1999).	31
Tab. 5 : Classification des matrices (Cherqui, 2005).	31
Tab. 6 : Les diverses problématiques de l'aide multicritères (Roy & Bertier, 1971).....	34
Tab. 7 : Usage des diverses méthodes d'évaluation (Kaoula, 2017).	35
Tab. 8 : Différents critères pour sélectionner une méthode d'évaluation (Kaoula, 2017).	36
Tab. 9 : les différentes législations et décrets liés au secteur de l'énergie en Algérie.	58
Tab. 10 : DTR de l'Algérie et leurs descriptions.	59
Tab. 11 : les normes ISO relatives à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et leurs descriptions respectives.	73
Tab. 12 : les critères définissant l'unité fonctionnelle d'un bâtiment.....	78
Tab. 13 : contributeurs représentant différentes sources d'impacts.	81
Tab. 14 : Les bases de données utilisées dans les études ACV des bâtiments	87
Tab. 15 : Défis et Facteurs Influençant l'ACV dans la Construction	92
Tab. 16 : les conclusions et recommandations des études sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans le secteur du bâtiment (Auteur ; 2024).	93
Tab. 17 : Zones Hydrogéologiques de la Wilaya de Guelma.	102
Tab. 18 : Température moyenne maximale et moyenne minimale à Guelma (Weather Spark, 2023).....	104
Tab. 19 : La quantité mensuelle d'énergie solaire prévue pour la ville de Guelma (Weather Spark, 2023).	105
Tab. 20 : La Pluviométrie mensuelle moyenne à Guelma (Weather Spark, 2023).	107
Tab. 21 : Calcul de l'indice d'aridité de la ville de Guelma (Auteur, 2024).	110
Tab. 22 : Description des scénarios d'usage.....	123
Tab. 23 : Echantillon de la fiche de mesures (Auteur, 2022).	133
Tab. 24 : Bases des données pour la simulation thermique et environnementale du bâtiment.	140
Tab. 25 : Éléments Influençant sur l'Adaptation et l'Efficacité de la Configuration d'un Bâtiment.	143

Liste des tableaux

Tab. 26. Composition murale (Auteur, 2023).....	145
Tab. 27 : Propriétés de la menuiserie de la chambre d'étude (Auteur, 2023).	146
Tab. 28 : États de surface des murs de la chambre d'étude (Auteur, 2023).	146
Tab. 29 : Données Extraites de la Simulation Thermique Dynamique.	151
Tab. 30 : hypothèses du module ACV Equer.....	152
Tab. 31 : Comparaison des menuiseries	154
Tab. 32 : Résultats ACV et valeurs de référence pour les différents indicateurs environnementaux (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).	159
Tab. 33 : Impacts environnementaux lors de la phase d'utilisation du bâtiment (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).....	160
Tab. 34 : Caractéristiques du Thermo Hygromètre HANNA 9564 (Hanna instruments, 2021)	204
Tab. 35 : Les caractéristiques d'anémomètre BA16 (Trotec, 2020).....	205

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

Au cours des vingt dernières années, le changement climatique a mis en question la durabilité du développement global (Seneviratne et al., 2016). Ce sujet est désormais une grande préoccupation pour l'humanité (Ahmed Ali et al., 2020). De nombreux pays ont déployé des efforts considérables pour gérer les émissions de CO₂ afin de combattre le changement climatique, ces émissions étant perçues comme une des principales causes des récentes catastrophes environnementales mondiales (Duan et al., 2019; Xi & Cao, 2022). Le Protocole de Kyoto, sous l'égide de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, reconnaît le dioxyde de carbone (CO₂) comme le principal gaz responsable du réchauffement climatique (Kim et al., 2017). Par conséquent, il est devenu crucial de développer une économie mondiale à faible émission de carbone (Y. Zhang et al., 2019).

Les recherches antérieures ont démontré que la croissance démographique rapide a transformé le secteur du bâtiment en une source majeure d'émissions de carbone et de consommation d'énergie à l'échelle mondiale (Nematchoua et al., 2021). Dans l'Union européenne, ce secteur représente jusqu'à 40 % de la consommation énergétique totale et 36 % des émissions de CO₂ (Pal et al., 2017). L'Algérie ne fait pas l'exception, le secteur du bâtiment étant l'un des plus grands consommateurs d'énergie et s'efforçant de réduire ses émissions de carbone.

Aujourd'hui, les nouvelles exigences environnementales et énergétiques nous obligent à repenser nos modes de consommation et d'utilisation des ressources, en particulier énergétiques (Fenni, 2022), nécessitant l'adoption de politiques énergétiques strictes pour atteindre une croissance durable et responsable (Senouci et al., 2022). En ce sens, le Conseil européen et ses États membres ont adopté un paquet énergie-climat pour 2030, visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40 %, à augmenter la production d'énergie renouvelable de plus de 27 % et à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments d'au moins 27 %, afin d'améliorer l'efficacité énergétique et de diriger ce secteur vers une stratégie bas carbone (Ara, 2014; Nematchoua et al., 2021). Dans le cadre de l'accord de Paris sur le changement climatique, l'Algérie s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 7 à 22 % entre 2020 et 2030 (*COP26: l'Algérie défend le principe d'équité dans l'application de l'accord de Paris, 2021*).

Les politiques énergétiques et environnementales visent principalement à réduire la consommation d'énergie dans ce secteur crucial, à optimiser la gestion énergétique et à

minimiser les impacts environnementaux. Cette étude évalue les performances thermique, énergétique et environnementale des bâtiments, en soulignant le lien entre la consommation d'énergie et la dégradation environnementale. Elle quantifie les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie du bâtiment, fournissant des données essentielles pour aider les décideurs à choisir les systèmes de construction, les matériaux et les équipements, intégrant ainsi une stratégie bas carbone dans le processus de projet architectural.

Problématique

Le changement climatique est devenu une préoccupation majeure pour l'humanité. Les scientifiques estiment que l'augmentation des gaz à effet de serre, en particulier le dioxyde de carbone, joue un rôle crucial dans l'intensification du réchauffement climatique (**Ahmed Ali et al., 2020**). Plusieurs études ont montré que l'action humaine influe significativement sur la nature, représentant la principale cause de certains problèmes environnementaux. En particulier, la croissance démographique rapide entraîne une prévision d'augmentation de 50 % de la demande énergétique d'ici 2035 par rapport à 1990 (**Ghosh, 2020**). En 2013, un rapport des Nations Unies (**Nations Unies, 2013**) a déclaré que près de la moitié de la population mondiale vit en ville, et d'ici 2030 cette proportion augmentera jusqu'à atteindre 80 %. Les villes, qui représentent plus de 70 % des émissions mondiales de CO₂, sont donc des contributeurs majeurs au changement climatique (**Savvides et al., 2019**).

Pour cette raison, il est essentiel de revoir la plupart des activités humaines afin de réduire ces émissions. En particulier, le secteur du bâtiment est l'un des principaux responsables (**Santos-Herrero et al., 2021**), représentant environ 39 % des émissions mondiales annuelles de CO₂ (**Ahmed et al., 2021**). Ces émissions proviennent de toutes les étapes du cycle de vie des bâtiments, de la construction à la démolition, en passant par l'exploitation et la rénovation. Avec l'augmentation de la sensibilisation à ce phénomène, il est crucial de réduire la consommation énergétique des bâtiments pour répondre aux exigences de réduction des impacts environnementaux et des émissions de gaz à effet de serre (GES) énoncées dans le Protocole de Kyoto. Le sommet de Rio de Janeiro en 1992 a également joué un rôle clé en intégrant les préoccupations environnementales dans tous les secteurs économiques, notamment dans le secteur du bâtiment, qui est le plus grand consommateur d'énergie au monde. En 2020, ce secteur a représenté 36 % de la consommation énergétique mondiale et 39 % des émissions de CO₂ (**UNEP, 2021**).

Comme de nombreux pays, l'Algérie n'échappe pas à cette tendance, le secteur du bâtiment se positionnant également comme le plus énergivore, représentant plus de 41 % de la consommation énergétique finale nationale et contribuant à plus de 21 % des émissions de gaz à effet de serre (**Kamouche & Mokrane, 2022**).

D'après les données statistiques, cette spirale étourdissante s'est renforcée de manière plus marquée en 2020, avec 82 % de la population algérienne concentrée dans les zones urbaines. Cela entraîne une augmentation significative du niveau d'urbanisation, exerçant une lourde pression sur l'environnement (**Kaoula, 2017**). Cette urbanisation intense affecte également le tourisme durable, avec les bilans énergétiques révélant que les bâtiments touristiques sont de gros consommateurs d'énergie et émettent des gaz à effet de serre, ce qui a un impact significatif sur l'environnement (**Kaoula & Bouchair, 2009**). Cette situation place le bâtiment touristique face à un double défi : assurer sa propre durabilité tout en contribuant à la préservation de l'environnement.

Cette problématique expose la question fondamentale :

Comment intégrer la réduction de l'impact environnemental dans le processus de projet architectural ?

Et plusieurs autres questions secondaires peuvent avoir lieu :

- Quelle est la stratégie écologique qui conduit à la réduction de ces impacts ?
- En Algérie, le contexte réglementaire et technique est-il favorable pour concrétiser cette stratégie ?

Hypothèses de la recherche

Hypothétiquement, on suppose que :

- Une approche globale ACV facilite une intégration plus efficace de la réduction des impacts environnementaux dans l'ensemble des processus des projets architecturaux.
- La prise en compte de certaines options techniques, telles que les choix de matériaux, d'isolation, de systèmes énergétiques et d'équipements de construction, peut s'avérer une stratégie efficace pour diminuer ces impacts.
- Actuellement, le contexte réglementaire algérien ne favorise pas la mise en œuvre d'une stratégie environnementale. Il est important de réfléchir sur la mise à niveau des règlements et des procédures technico-administratifs relatifs à la production de cadre bâti.

Objectifs de la Recherche

Notre étude se concentre sur l'amélioration de la performance environnementale des bâtiments touristiques en utilisant l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) pour évaluer leurs impacts environnementaux. Cette démarche vise à :

- Développer une approche évolutive et réaliste permettant d'évaluer de manière quantitative et qualitative la consommation d'énergie et la production de dioxyde de carbone tout au long du cycle de vie des bâtiments.
- Mettre en avant l'utilité de l'ACV pour identifier les principales sources d'impacts environnementaux et les réduire afin de créer des bâtiments décarbonés tout au long de leur cycle de vie.
- Comprendre la complexité du secteur de la construction pour concevoir des bâtiments à faible empreinte carbone, en minimisant ses impacts environnementaux.
- Contribuer au développement d'un cadre réglementaire favorable à la concrétisation des démarches environnementales dans le processus de projet architectural.

Méthodologie de la recherche

Ce projet de recherche vise à maîtriser les impacts environnementaux des bâtiments tout en garantissant des conditions intérieures optimales. Il se divise en deux volets principaux.

Notre méthodologie débutera par une étape théorique, qui consiste à analyser les concepts liés à notre sujet de recherche. Dans cette étude approfondie, nous abordons la stratégie bas carbone ainsi que la position de notre pays vis-à-vis de cette stratégie, en détaillant également l'Analyse de Cycle de vie comme une méthode d'évaluation environnementale employée afin d'évaluer les impacts environnementaux du bâtiment.

La deuxième étape pratique, implique des investigations in situ et des simulations. Nous étudierons un bâtiment tertiaire à Guelma, en menant une campagne de mesures sur place et une enquête pour évaluer la satisfaction des occupants. Cette enquête est essentielle pour recueillir des données précises sur l'expérience des usagers.

Puis, nous effectuerons une simulation dynamique sur notre cas d'étude en utilisant le logiciel Pléiades (version 5.23.4.4). Ce logiciel permet de calculer l'inventaire global des entrées et sorties d'un bâtiment. En combinant ces données avec des différents thèmes environnementaux pour nous obtenir un profil environnemental.

Les simulations porteront sur les aspects thermiques, énergétiques et environnementaux à l'aide de l'ACV. Elles commenceront par la modélisation du bâtiment avec le module "moduleur" (anciennement le logiciel Alcyone), la création de scénarios de fonctionnement, et l'établissement de stations météorologiques avec le module STD Comfie.

Après avoir déterminé les besoins énergétiques de notre cas d'étude, nous utiliserons l'outil ACV Equer de Pléiades (anciennement le logiciel NOVA Equer) pour évaluer 12 indicateurs environnementaux. Cette évaluation nous permettra de mesurer les impacts environnementaux initiaux du bâtiment.

Ensuite, nous effectuerons une série de nouvelles simulations pour analyser l'impact des différents composants de l'enveloppe du bâtiment sur ses performances thermiques, énergétiques et environnementales, afin de définir les composants d'une variante bas carbone.

L'utilisation de ces outils est stratégique. Ils fournissent une aide précieuse à la prise de décision pour les acteurs impliqués à chaque étape du cycle de vie d'un bâtiment. Ils permettent également de lier l'analyse énergétique, via des simulations thermiques, à l'analyse environnementale, grâce à l'ACV. Cela permet de réduire les impacts environnementaux du bâtiment tout en maintenant un niveau de confort optimal, atteignant ainsi la meilleure performance énergétique et comportement thermique possible pour un bâtiment bas carbone. Notre objectif final est d'intégrer cette stratégie bas carbone dans le processus de projet architectural.

Structure de la thèse

Pour aborder les questions problématiques de notre thèse, nous avons structuré celle-ci en plusieurs chapitres organisés de la manière suivante.

Le premier chapitre de notre thèse a pour objectif de clarifier le contexte environnemental de notre problématique. Il est essentiel de définir les différentes notions associées à ce contexte, d'analyser les impacts environnementaux des bâtiments, et de se concentrer spécifiquement sur les enjeux environnementaux des bâtiments touristiques, en détaillant leurs émissions et consommations. Ce chapitre se conclura par une discussion sur l'évaluation environnementale et les diverses méthodes employées pour mesurer les impacts environnementaux des bâtiments.

Pour répondre aux divers enjeux et impacts environnementaux étudiés précédemment, de nombreux pays ont mis en place des mesures visant à réduire l'empreinte environnementale

des bâtiments et à protéger l'environnement. En France, par exemple, la loi de la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), adoptée en 2015, fournit des directives pour développer une stratégie bas-carbone, circulaire et durable dans tous les secteurs d'investissement. Le chapitre suivant se concentrera sur l'environnement, les objectifs et les principes de la stratégie bas-carbone, en particulier dans le secteur du bâtiment, afin de réduire sa consommation d'énergie et ses impacts environnementaux. Il mettra également en lumière la position de notre pays par rapport à cette planification.

Pour déployer efficacement une stratégie bas carbone et atteindre les objectifs fixés, il est essentiel de mesurer et de quantifier les impacts environnementaux d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie. Cela comprend l'extraction des matières premières, la construction, l'exploitation et la démolition. Cette évaluation globale est réalisée à l'aide de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Le troisième chapitre portera sur cette méthode d'évaluation environnementale, qui aide à la prise de décision en fournissant une évaluation précise des impacts environnementaux. Cela permet aux acteurs de la construction de faire des choix éclairés en fonction de leurs objectifs. Ce chapitre sera divisé en deux sections : la première abordera l'ACV des produits, tandis que la seconde examinera son application dans le domaine du bâtiment.

Le quatrième chapitre sera consacré à la présentation du contexte de notre étude, débutant par une description de la ville de Guelma, incluant sa localisation géographique, son histoire et son climat. La compréhension des conditions locales est cruciale pour élaborer des stratégies adaptées qui optimisent l'utilisation des ressources naturelles disponibles.

La deuxième section de ce chapitre explore les opportunités touristiques de la ville de Guelma en examinant ses divers complexes touristiques. Parmi eux, le complexe « EL Baraka » est choisi pour notre étude en raison de critères spécifiques. Une description détaillée de ce complexe est essentielle, incluant ses matériaux de construction, ses équipements, les systèmes HVAC et de ventilation, ainsi que ses différents scénarios d'utilisation. Ces informations serviront de base pour une simulation réalisée à l'aide du logiciel Pléiades. La troisième section se focalise sur le logiciel Pléiades, expliquant pourquoi il a été choisi pour cette simulation et détaillant ses modules et fonctionnalités.

Étant donné que notre cas d'étude se concentre principalement sur l'accueil et l'hébergement des usagers, il est impératif de garantir des conditions favorables pour les occupants tout au long de leur séjour et pendant toute la durée de vie du bâtiment. À cet égard, le cinquième

chapitre se penchera principalement sur les exigences et le bien-être des utilisateurs dans leurs chambres. La première section de ce chapitre détaillera la campagne d'enquête et de mesures, incluant le protocole suivi, les résultats obtenus, et leur interprétation.

La deuxième section de ce dernier chapitre se concentrera sur l'évaluation thermique, énergétique et environnementale du cas d'étude à travers plusieurs séries de simulations. Ces simulations viseront à répondre à la problématique précédemment posée et à développer une variante avec un bilan énergétique et environnemental nettement amélioré, autrement dit, une variante bas carbone. Les résultats de ces simulations seront présentés dans la dernière section, débutant par l'analyse du bâtiment dans son état initial et explorant chaque niveau d'amélioration proposé.

Dans la dernière partie de cette étude, une conclusion générale synthétisera les concepts abordés, la méthodologie employée et l'application de l'analyse du cycle de vie (ACV) au bâtiment, tout en résumant nos résultats. Cette conclusion inclura également une discussion sur les difficultés rencontrées et les limites de la recherche, ainsi que des suggestions pour les recherches futures.

Introduction générale

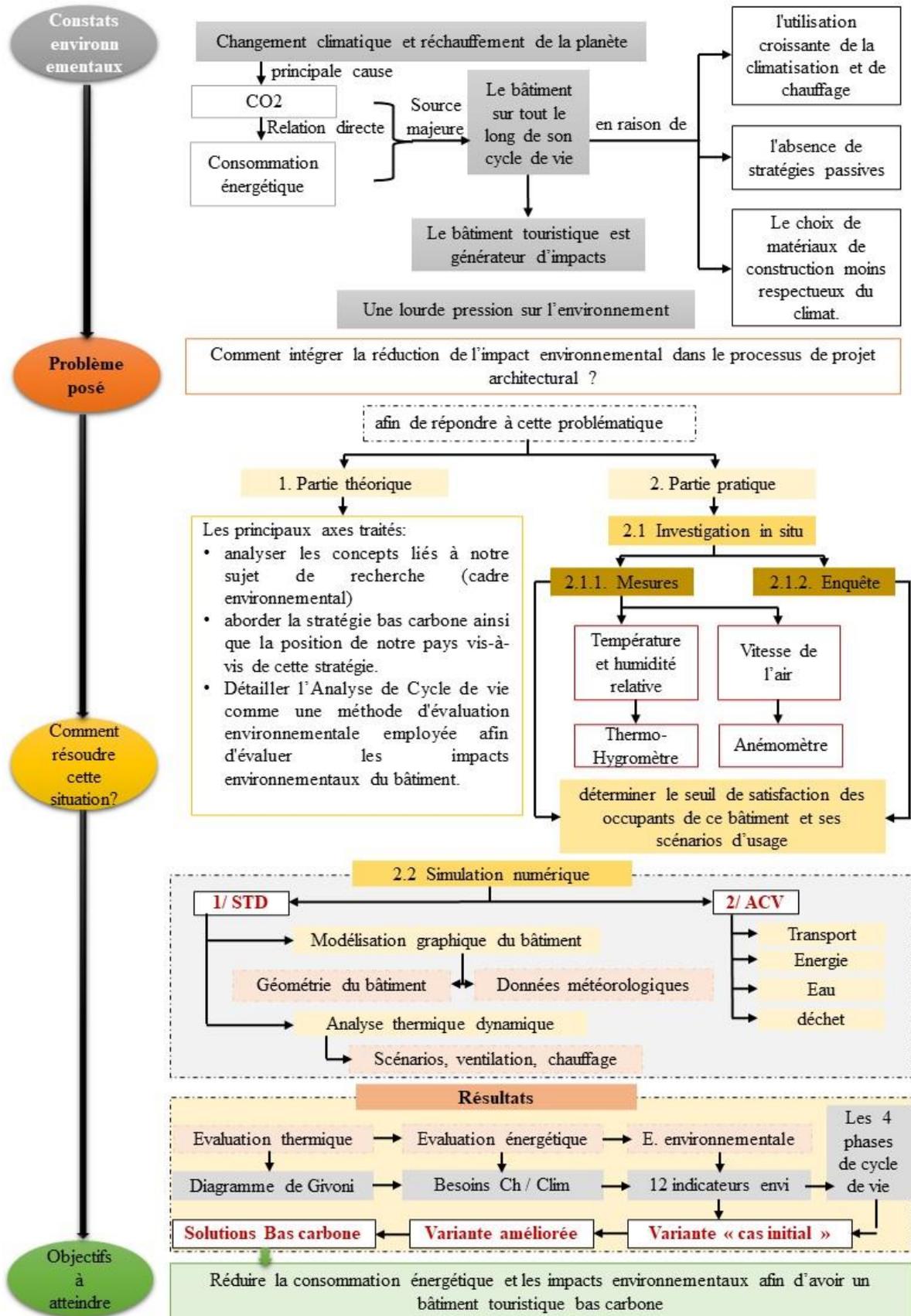


Fig. 1 : Récapitulation de la problématique posée et la méthode d'évaluation utilisée (Auteur, 2024).

**CHAPITRE I : ENVIRONNEMENT ET DEVELOPPEMENT DURABLE : IMPACTS
ET ENJEUX DES BATIMENTS TOURISTIQUES**

Introduction

L'environnement est devenu un enjeu majeur à l'échelle mondiale, ce qui a incité à l'émergence de nouvelles stratégies visant à intégrer davantage le concept de développement durable. Le présent chapitre abordera la question de l'environnement, en mettant l'accent sur les impacts environnementaux et le concept de développement durable. Cette notion en évolution constante dépasse le cadre environnemental, le secteur du bâtiment étant devenu un élément essentiel de cette démarche. Suite à l'analyse de ces divers concepts environnementaux, ce chapitre se concentrera sur les impacts environnementaux et les enjeux spécifiques aux bâtiments touristiques. Pour conclure, nous examinerons l'évaluation environnementale ainsi que les différentes méthodes employées pour évaluer ces impacts.

1. La notion du développement durable, environnement et impact environnemental

La situation actuelle à l'échelle mondiale est non seulement insatisfaisante, mais également de plus en plus préoccupante et alarmante, caractérisée par un climat instable, une surexploitation des ressources, des pollutions persistantes, et d'autres défis majeurs. Le concept de développement durable a été considérablement étendu afin de promouvoir une approche alternative. Néanmoins, malgré sa popularité, la compréhension précise de cette notion reste complexe en raison de la diversité des définitions découlant de perceptions variées et subjectives (**Kaoula, 2017**).

Dans ce contexte, notre objectif dans cette section initiale sera de définir de façon objective ce concept central de notre étude, en utilisant une approche holistique.

1.1 La notion du développement durable

Les problèmes environnementaux contemporains se distinguent par plusieurs caractéristiques, dont la sensibilisation a pris forme après la Seconde Guerre mondiale. Dominique Bourg en recense quatre principales (**Bourg, 2002**):

- À l'échelle planétaire, les impacts sont considérés comme universels et potentiellement réversibles.
- L'invisibilité caractérise la plupart des impacts environnementaux, qui sont immatériels et non perceptibles visuellement.
- Les risques différés cumulatifs globaux, selon Dominique Bourg, résultent de la complexité et des interactions au sein de l'environnement naturel, rendant ainsi leur anticipation difficile en raison de leur imprévisibilité (**Bourg & Ermine, 2002**).

- L'inertie se manifeste par le fait qu'une diminution brusque des émissions entraînerait des perturbations à diverses échelles, comparables à un déséquilibre climatique induit par une réduction immédiate et significative des émissions de gaz à effet de serre.

Les problèmes environnementaux en constante augmentation de nos jours trouvent leur source dans une rupture fondamentale entre l'humanité et la nature, une division dont les prémices remontent à plusieurs siècles. Cette séparation a progressivement influencé et modelé les interrogations qui ont abouti à l'émergence du concept de développement durable aux alentours de 1980 (**Kaoula, 2017**).

D'un point de vue sémantique, le concept anglophone de "Sustainable Development" a initialement été rendu en français par les termes "Développement Soutenable" ou "Développement Viable". Toutefois, c'est le Canada qui a introduit le terme "Développement Durable". Au fur et à mesure de l'évolution temporelle et des progrès réalisés dans le domaine de l'écodéveloppement, de multiples définitions ont été formulées, améliorées et complétées (**Bengana et al., 2019**). La définition la plus remarquable est celle exposée dans le rapport Brundtland de 1987, intitulé 'Notre avenir à tous', incluse dans le tableau 1.

Le concept de développement durable englobe la transition et les ajustements requis afin de permettre à notre planète et à ses habitants de coexister dans un environnement plus équitable, sain et respectueux de l'écosystème. Ceci présente une nouvelle perspective économique qui prend en compte de manière holistique la planète Terre et son évolution, en incorporant les dimensions environnementales et sociales dans le cadre économique. Le développement durable est un processus visant à concilier les aspects sociaux, économiques et environnementaux, instaurant ainsi une synergie entre ces trois dimensions. Son objectif est de favoriser un développement économique efficient, socialement équitable et écologiquement durable. Ce concept prend en considération la préservation des ressources naturelles et des écosystèmes, garantit une efficacité économique et se focalise sur des objectifs sociaux tels que la réduction de la pauvreté, des inégalités et de l'exclusion, tout en visant à favoriser l'équité (**Dakhia, 2019**).

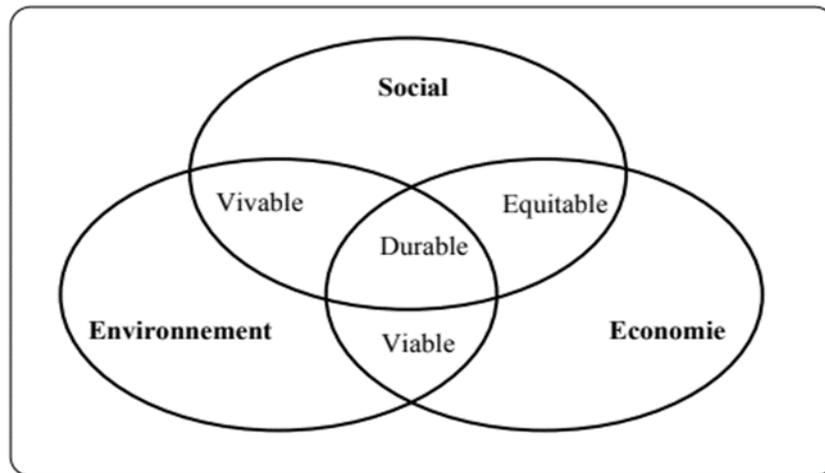


Fig. 2: Le développement durable est au centre des trois domaines principaux : l'économie, la société et l'environnement (Safer, 2016).

Da Cunha (Da Cunha, 2005) propose une vision du développement durable qui se distingue par son rejet d'un modèle utopique figé et prédéfini, privilégiant plutôt une approche axée sur l'identification et la mise en place de solutions aux défis sociaux et environnementaux contemporains.

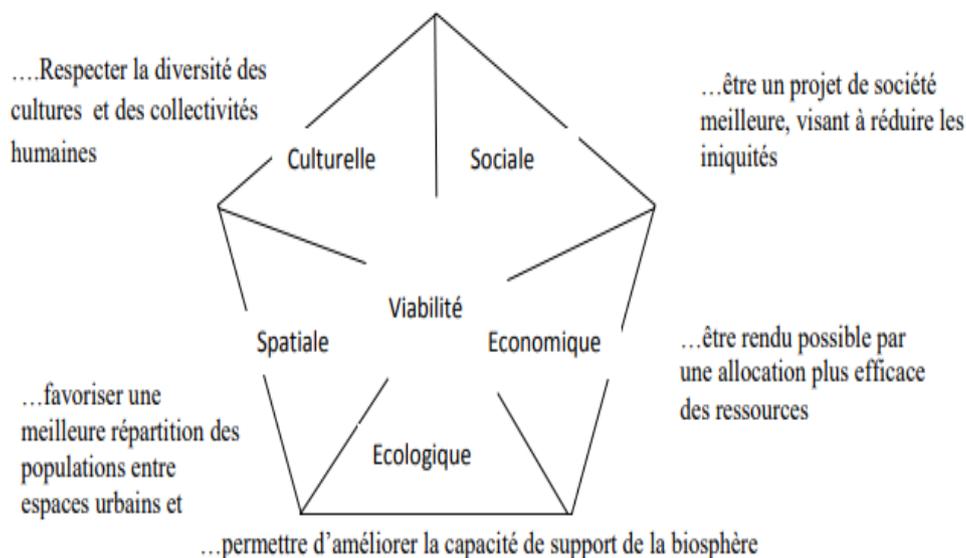


Fig. 3: Le concept de développement durable repose sur cinq dimensions selon Sachs (Sachs, 1993).

Cependant, il est important de noter que plusieurs variantes du concept de développement durable ont été proposées. Le modèle présenté dans la figure 3 offre une perspective plus statique du développement durable par rapport au modèle tripartite classique (fig. 2).

1.1.1 Apparition et genèse de la notion du « développement durable »

Examinons maintenant l'évolution du concept de développement durable, qui a vu le jour au début des années 1970. À cette époque, divers acteurs politiques et scientifiques, préoccupés par des enjeux tels que le changement climatique, la diminution des ressources en énergies fossiles et les inégalités sociales, ont souligné l'importance d'intégrer l'équité sociale et la prudence écologique dans les modèles de croissance économique (Dakhia, 2019).

Les dates clés de cette notion peuvent être résumées dans le tableau 01.

Tab. 1 : les événements et les définitions clés liées au développement durable depuis 1972 jusqu'à 2021 (auteur, 2024).

Année	Événement
1972	Conférence de Stockholm : Première discussion sur l'impact environnemental de l'industrialisation des pays développés ; création de l'UNEP.
1980	Introduction du terme "développement durable" par l'UICN.
1987	Rapport "Notre avenir commun" de Gro Harlem Brundtland introduit le concept de développement durable. Définition par la CMED : "le chemin du progrès humain qui répond aux besoins et aux aspirations de la génération actuelle sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs".
1992	Conférence de Rio (CNUED) : Sommet de la Terre, création de la "Charte de la Terre" et de l'Agenda 21.
1994	Conférence d'Alborg : Développement urbain durable.
1997	Protocole de Kyoto : Engagements pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.
2002	Conférence de Johannesburg : Conservation des ressources naturelles et de la biodiversité.
2004	Adoption de l'Agenda 21 de la culture et introduction du principe de précaution en France.
2005	Ratification du protocole de Kyoto par l'Union européenne ; adoption de la Convention sur la diversité des expressions culturelles par l'UNESCO.
2009	COP 15 à Copenhague : Objectif de limiter le réchauffement climatique à 2°C.
2011	Accords de Durban : Vers un accord universel sur le climat.
2012	Sommet de la Terre Rio+20 : Avancée majeure dans les initiatives mondiales pour la durabilité.
2015	COP21 à Paris : Accord historique pour limiter l'augmentation de la température mondiale à 1,5°C.
2016	COP 22 à Marrakech : Modalités d'application de l'accord de Paris.
2019	Sommet Action Climat de l'ONU à New York : Accélération de l'action climatique mondiale.
2021	COP26 à Glasgow : Mise en œuvre des engagements climatiques nationaux pour l'Accord de Paris.

On peut en déduire que l'apparition de ce concept a été suscitée par une succession de catastrophes naturelles qui ont impacté et mis à l'épreuve la planète. Il est envisageable que ces événements aient représenté une alerte écologique assez significative pour enfin motiver les habitants à réagir (Kaoula, 2017).

1.2 Environnement

La notion d'environnement est polysémique et recouvre une diversité d'aspects, ce qui peut parfois entraîner une certaine ambiguïté dans son emploi. Elle englobe habituellement l'ensemble des organismes vivants (Beldi & Lounis, 2021). De manière générale, l'environnement se réfère à l'ensemble des éléments naturels ou artificiels, qu'ils soient de nature physique, chimique, biologique ou culturelle, au sein desquels les organismes vivants évoluent et se reproduisent, incluant les êtres humains ainsi que les espèces animales et végétales (Safer, 2016).

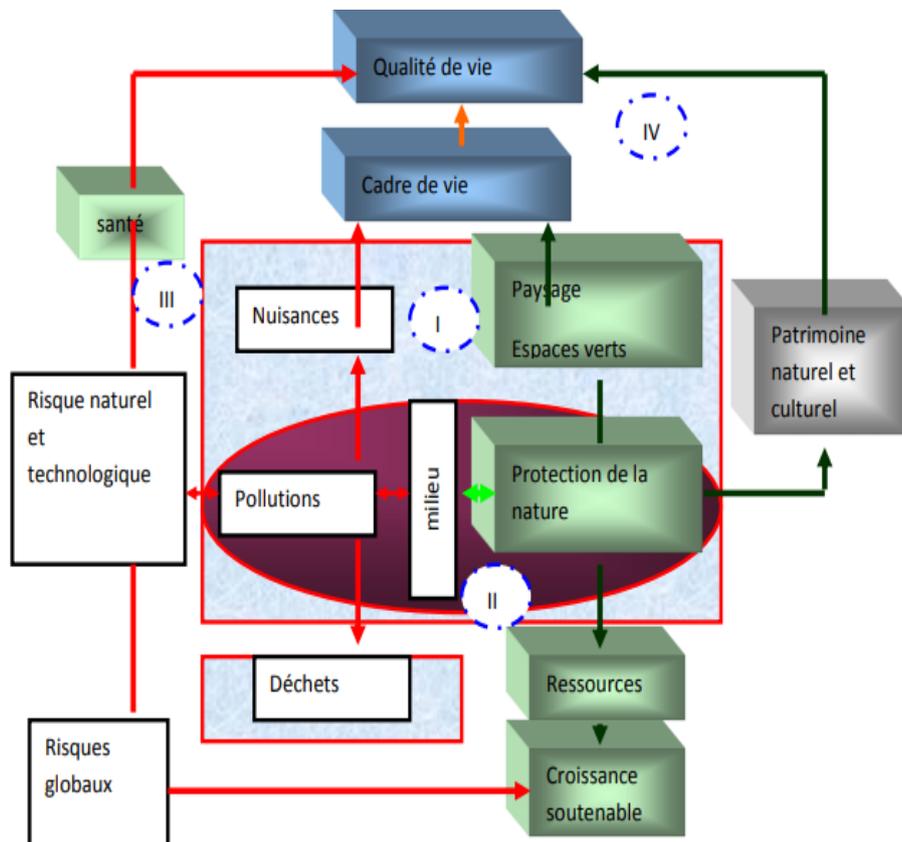


Fig. 4 : Un cadre conceptuel dans le domaine de l'environnement proposé par Theys (Theys, 1993).

De nos jours, la protection de l'environnement est une préoccupation majeure pour les décideurs politiques, les gestionnaires administratifs et les acteurs économiques. Si la problématique de la qualité environnementale a toujours été discutée, elle est à présent devenue concrète (Kaoula, 2017).

En ce qui concerne les bâtiments, il est possible de distinguer deux types d'environnements distincts qui les entourent : un environnement intérieur et un environnement extérieur.

L'environnement intérieur fait référence à l'ensemble des éléments physiques et matériels qui composent l'espace dans lequel vivent ou travaillent les occupants d'un bâtiment. Cela inclut le mobilier, la décoration, l'éclairage, la température, l'acoustique, ainsi que tous les autres aspects qui contribuent à créer une atmosphère particulière à l'intérieur des lieux. Il est essentiel que l'environnement bâti respecte des normes rigoureuses en matière de confort, de santé et de bien-être des occupants. Cela englobe non seulement l'intérieur du bâtiment, mais aussi son environnement extérieur, qui englobe les abords du bâtiment, le site immédiat, la zone environnante et même l'échelle planétaire. Il est impératif de prendre des mesures pour minimiser les conséquences liées au changement climatique (**Peuportier, 2003**).

1.3 Le concept de l'impact environnemental

Il a été observé que l'avènement du concept de développement durable a été motivé par un enjeu crucial découlant d'une succession de catastrophes qui persistent à ravager l'écosystème, épuisant ses ressources et engendrant des dommages irréparables. Ces catastrophes se produisent à diverses échelles (**Benlaria, 2017**). Il est impératif, dans le contexte de cette étude, de souligner les conséquences préoccupantes que l'environnement subit à différentes échelles. Premièrement, il convient d'analyser en détail le concept d'"impact" et sa portée dans le contexte environnemental.

Le concept d'"impact environnemental" englobe l'ensemble des modifications, qu'elles soient favorables ou défavorables, qui se produisent dans l'écosystème en raison d'une initiative, d'une opération, d'une méthode, d'un organisme ou d'un produit, depuis sa conception jusqu'à la fin de sa vie (**Beldi & Lounis, 2021**).

D'après Bliefert et Perraud, ce concept regroupe l'ensemble des facteurs perturbant l'équilibre naturel de notre environnement. Ces altérations surviennent suite à des actions physiques, chimiques, biologiques ou technologiques qui perturbent l'équilibre naturel de l'écosystème. En outre, l'introduction de substances étrangères dans l'environnement, entraînant des dommages, est communément désignée sous le terme de pollution environnementale (**Bliefert & Perraud, 2001**).

L'impact environnemental peut être évalué à l'aide d'un indicateur environnemental, qui permet d'apprécier l'efficacité d'un produit spécifique. Afin d'évaluer cet impact environnemental, il est essentiel d'analyser différents paramètres tels que l'exploitation des

ressources, la consommation énergétique, la génération de déchets et d'émissions (atmosphériques, hydriques et telluriques), ainsi que la gestion des déchets. L'évaluation devrait englober l'intégralité du cycle de vie du produit et être formulée en utilisant des indicateurs des impacts environnementaux potentiels (Menet & Gruescu, 2014).

1.3.1 Spécificité des différents impacts environnementaux

Les données alarmantes et rapidement croissantes mettant en évidence la fragilité de l'environnement due aux activités humaines dans divers domaines nous poussent à examiner cette problématique de manière approfondie et à concentrer notre réflexion sur les facteurs critiques ayant contribué à l'ampleur des dommages alimentant l'actuelle crise environnementale.

Dans cette situation, il est question des répercussions sur l'environnement à divers niveaux, chacun étant lié à un indicateur particulier. Dans ce vaste cadre de recherche, nous examinons spécifiquement les impacts liés au secteur du bâtiment.

1.3.1.1 L'échelle planétaire

1.3.1.1.1 Effet de serre

La Terre reçoit son énergie principalement du soleil. Une partie de cette énergie est absorbée par l'atmosphère et la surface terrestre, tandis que le reste est réfléchi dans l'espace. Pour maintenir des conditions de vie favorables pour tous les organismes vivants et les écosystèmes, l'effet de serre, un phénomène naturel, est crucial. Ce processus consiste en l'absorption d'une portion du rayonnement solaire par l'atmosphère et la surface terrestre, suivie de la rétention de cette chaleur dans la basse atmosphère. Cependant, l'accumulation excessive de gaz à effet de serre pourrait transformer la Terre en un environnement surchauffé (Kirati, 2020).

Les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère forment une barrière naturelle appelée troposphère, qui limite l'émission de rayonnement infrarouge vers l'espace. Sans ce phénomène, la température moyenne de la planète serait de -19°C au lieu des 15°C actuels. Le problème réside dans l'accumulation de ces gaz dans l'atmosphère, provoquant des perturbations climatiques à l'échelle mondiale. Comme illustré dans le schéma (fig. 5), ces gaz affectent le bilan énergétique du système climatique (Kaoula, 2017).

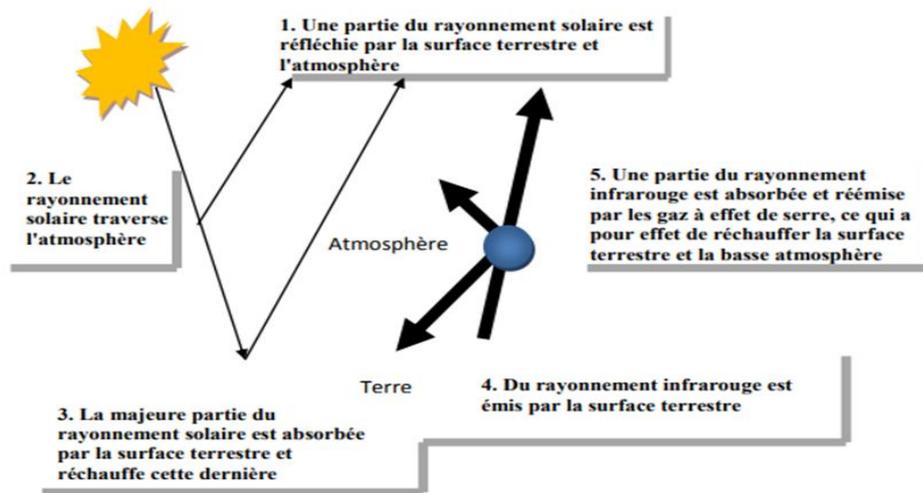


Fig. 5 : Un schéma de l'effet de serre simplifié proposé par Minh (Minh, 1998).

Les projections du GIEC pour divers scénarios de changement climatique jusqu'en 2100, représentées dans la figure ci-dessous (fig. 6), montrent une large gamme de possibles augmentations de la température moyenne globale en fonction des émissions futures de gaz à effet de serre.

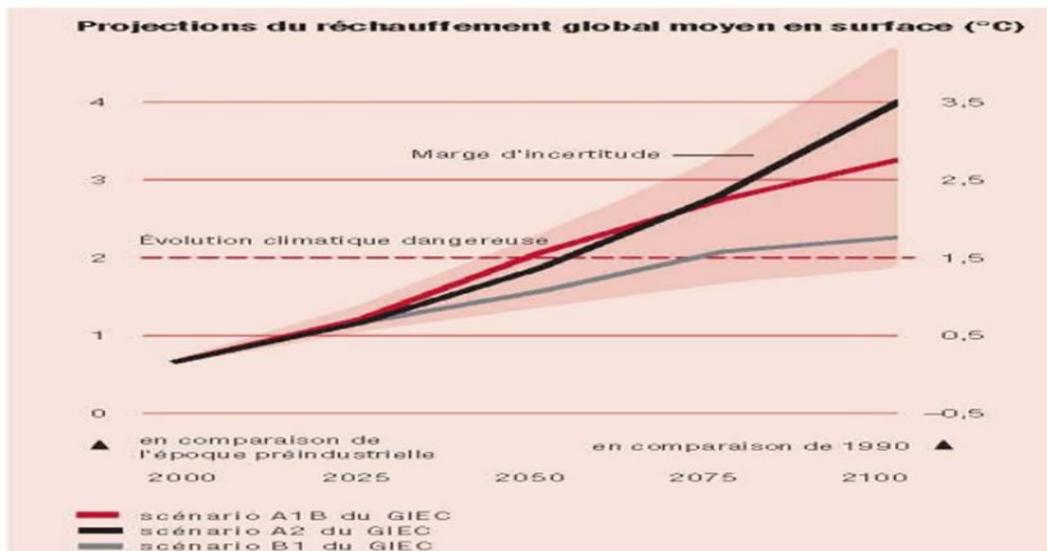


Fig. 6 : Le réchauffement global jusqu'à 2100 selon les scénarios du GIEC (Kaoula, 2017).

1.3.1.1.2 La destruction de la couche d'ozone

Les substances synthétiques émises dans l'atmosphère, telles que les substances qui appauvrissent la couche d'ozone (SAO), jouent un rôle crucial dans la dégradation de cette couche. Les composés chimiques contenant du chlore et/ou du fluor demeurent stables dans la basse atmosphère, perturbant ainsi le cycle naturel de formation et de décomposition de l'ozone dans la stratosphère. Les activités humaines, en particulier l'utilisation passée de

chlorofluorocarbures (CFC) dans les systèmes de réfrigération et les produits en aérosol, ont significativement contribué à cette détérioration.

Lorsque ces gaz parviennent à la couche d'ozone, ils sont décomposés par les rayons ultraviolets solaires, ce qui entraîne la libération d'atomes de chlore. Ces derniers réagissent ensuite avec les molécules d'ozone en leur ôtant un atome d'oxygène, ce processus conduisant à la destruction de l'ozone. Cette séquence se reproduit, entraînant la libération supplémentaire d'atomes de chlore qui persistent dans la dégradation des molécules d'ozone. Cet enchaînement d'interactions joue un rôle majeur dans la diminution de l'ozone stratosphérique (**Kaoula, 2017**).

1.3.1.1.3 Épuisement des ressources

Les ressources naturelles sont essentielles à la survie de l'humanité, fournissant l'eau potable, la nourriture, l'énergie à partir de diverses sources, ainsi que les matériaux nécessaires à la création de produits complexes.

Cependant, il est important de noter qu'une grande partie de ces ressources est catégorisée comme étant « non renouvelables » ou « épuisables ». Cela signifie que la Terre n'est pas en mesure de les régénérer naturellement à un rythme suffisant pour fournir la vitesse à laquelle nous les consommons. En raison de l'accroissement constant de la population à l'échelle mondiale, nous nous approchons à grands pas d'un seuil critique où la perspective de l'épuisement imminent de nombreuses ressources naturelles se fait de plus en plus pressante. Les actions entreprises par l'homme, telles que la construction de bâtiments pour différents usages tels que l'habitation, le commerce ou les loisirs, ainsi que l'exploitation de ces structures pour mener à bien diverses activités, comme le travail ou les loisirs, mettent en lumière de manière tangible cette utilisation intensive des ressources naturelles disponibles sur notre planète (**Crawford, 2011**).

1.3.1.1.4 Pollution et acidification des mers

La pollution atmosphérique est définie par la présence de divers agents chimiques, biologiques ou physiques dans l'air, pouvant causer des effets nocifs. Ces polluants proviennent soit des activités humaines comme l'industrie, les transports et l'agriculture, soit de sources naturelles.

Les conséquences environnementales ne se limitent pas à la pollution terrestre mais incluent également la pollution marine. Celle-ci résulte de divers polluants déversés dans les mers et océans, perturbant ainsi l'écosystème marin et la biodiversité. L'acidification des océans,

causée par l'absorption du dioxyde de carbone atmosphérique par l'eau de mer, perturbe l'équilibre naturel de ces écosystèmes aquatiques, posant une grave menace pour la santé humaine en affectant la qualité des ressources marines consommées. De plus, cette acidification menace la biodiversité marine et nuit à la flore et à la faune qui en dépendent pour survivre. Ces effets cumulés montrent l'urgence d'agir pour réduire l'acidification des océans et protéger ces précieux écosystèmes (Kaoula, 2017).

L'océan joue un rôle crucial en absorbant une quantité importante de dioxyde de carbone (CO₂), ce qui entraîne une augmentation de l'acidification des eaux, représentant une menace considérable pour la survie de toutes les espèces marines. Selon les premières conclusions des observations, recherches et modèles actuels, un environnement à forte concentration de CO₂ présente des tendances et phénomènes spécifiques (Magdelaine, 2022) :

- L'acidification et la stratification de l'océan semblent s'intensifier principalement aux hautes latitudes, ce qui entraîne des conséquences néfastes pour de multiples espèces en modifiant la structure des communautés biologiques de manière encore peu comprise.
- L'élévation des températures, conjuguée à l'augmentation du CO₂ et à la baisse du pH, représente une menace sérieuse pour les récifs coralliens, pouvant même conduire à leur disparition totale.

1.3.1.2 L'échelle régionale

L'échelle régionale, en géographie, représente un niveau d'analyse intermédiaire entre l'échelle locale, qui se concentre sur des territoires restreints tels que des villes ou des villages, et l'échelle nationale ou internationale, qui englobe des territoires plus vastes comme des pays ou des continents. Cette échelle régionale permet d'étudier les phénomènes et les interactions qui se produisent à l'intérieur des régions délimitées, présentant des caractéristiques communes sur le plan géographique, économique, social ou culturel.

Les impacts sur l'environnement d'une région donnée peuvent être très différents les uns des autres, et cela dépend de plusieurs facteurs. En effet, des éléments tels que la situation géographique, la configuration du relief, le nombre d'habitants et les actions entreprises par les populations locales ont tous un rôle à jouer dans la manière dont l'environnement est affecté.

Cependant, il est courant de constater que certains problèmes environnementaux se manifestent à l'échelle régionale.

- La pollution de l'air, phénomène préoccupant à l'échelle mondiale, se caractérise par la présence dans l'atmosphère de divers polluants contribuant à la dégradation de la qualité de l'air. Cette pollution atmosphérique peut entraîner des conséquences néfastes sur la santé publique, augmentant le risque de maladies respiratoires comme l'asthme et la bronchite, ainsi que des maladies cardiovasculaires telles que les crises cardiaques et les AVC.
- La pollution de l'eau, quant à elle, résulte souvent des activités agricoles, industrielles et urbaines, introduisant dans les cours d'eau des substances nocives telles que les excès de nutriments causant l'eutrophisation, les déchets plastiques, les métaux lourds et d'autres polluants.
- La dégradation des sols est également un problème majeur, souvent causé par la déforestation, l'urbanisation, l'agriculture intensive et le surpâturage. Ces pratiques augmentent l'érosion, réduisent la fertilité des sols et diminuent leur capacité à retenir l'eau, affectant la biodiversité, les activités agricoles et la disponibilité des ressources en eau.
- La gestion des déchets en zones urbaines inclut la collecte, le traitement et la gestion des divers déchets, visant à réduire leur production et promouvoir leur recyclage.

Ces défis environnementaux sont interconnectés et leur impact se ressent de diverses manières, notamment sur la santé des populations, l'économie locale, et le bien-être général des habitants. Pour les surmonter efficacement, une collaboration étroite entre gouvernements, collectivités locales, entreprises et organisations non gouvernementales est essentielle. Cette coopération permet de combiner les ressources, les compétences et les expertises pour trouver des solutions durables et adaptées.

1.3.1.3 L'échelle locale

L'échelle locale est un niveau d'analyse qui se concentre sur des phénomènes, des processus ou des interactions se déroulant à un niveau restreint, tel qu'une communauté, un quartier ou une ville.

Il est question des pollutions s'étendant sur une distance d'environ 100 km, ayant un impact prédominant sur trois compartiments environnementaux majeurs : l'atmosphère, les ressources hydriques et les sols (**Beldi & Lounis, 2021**). Selon Peuportier (**Peuportier, 2003**), le bruit, la détérioration des écosystèmes et des paysages, ainsi que les altérations des microclimats sont des impacts environnementaux observés à l'échelle locale.

1.3.1.4 L'échelle du bâtiment

Cela concerne les divers polluants qui ont tendance à s'accumuler à l'intérieur des bâtiments, ce qui peut avoir un impact sur la santé et le bien-être des personnes qui y résident.

1.3.1.4.1 La consommation énergétique des bâtiments

À l'échelle mondiale, le secteur de la construction consomme 60 % des ressources extraites de la lithosphère, avec une forte proportion dédiée aux infrastructures et bâtiments, tandis que le secteur du bâtiment en absorbe 40 % (**Lessard, 2017**).

Une étude menée par l'Agence internationale de l'énergie et le Programme des Nations Unies pour l'environnement révèle que les bâtiments sont responsables de 39 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie et aux processus, et représentent également 36 % de la consommation finale d'énergie (**Chase, 2021**). Cette consommation énergétique couvre toutes les phases du cycle de vie d'un bâtiment (**Beldi & Lounis, 2021**).

1.3.1.4.2 Les déchets des bâtiments

Les déchets produits dans le secteur du bâtiment incluent une large gamme de résidus générés à diverses phases, telles que la construction, l'entretien et la démolition des structures. De plus, ces déchets englobent ceux issus de l'utilisation quotidienne des bâtiments pour différentes activités (**Beldi & Lounis, 2021**).

Selon Hetzel (**Hetzel, 2003**), la répartition des déchets du secteur du bâtiment se présente comme suit :

- Environ 70% des déchets inertes sont constitués de matériaux tels que le béton, la brique, etc.
- Environ 25% des déchets industriels banals (DIB).
- Environ 5% des déchets sont classés comme dangereux, comprenant des produits tels que les peintures, les solvants et d'autres substances.

La durabilité des déchets est directement liée à leur composition, avec certains d'entre eux ayant la capacité de subsister pendant une période allant jusqu'à 4 000 ans. Il est donc primordial de diminuer leur fabrication afin de restreindre leur impact environnemental néfaste (**Kaoula, 2017**).

1.3.1.4.3 Les matériaux et produits de constructions

Les matériaux utilisés dans la construction ont un double impact sur l'environnement des bâtiments. D'une part, les effets indirects se manifestent par des changements dans l'efficacité

énergétique et la consommation d'énergie des bâtiments, principalement lorsque cette dernière a un impact environnemental significatif. D'autre part, les effets directs découlent du choix des matériaux et influencent directement l'empreinte environnementale du bâtiment, notamment lorsque la consommation énergétique est faible (**Lessard, 2017**).

D'après la norme NF P 01-010, il est important de prendre en considération divers éléments pour évaluer l'impact des matériaux de construction sur l'environnement (**Hetzel, 2003**).

1.3.1.4.4 Les chantiers

Lors de sa phase de construction, un chantier engendre différentes perturbations. Il nécessite une quantité significative d'énergie, principalement pour l'eau, et génère une importante quantité de déchets (**Beldi & Lounis, 2021**).

De plus, le processus de construction peut engendrer une pollution atmosphérique due aux émissions de particules et peut aussi entraîner une contamination de la ressource en eau par le rejet de déchets. En outre, elle engendre d'importantes nuisances sonores pour les habitants environnants et dégrade le paysage, ce qui a un impact significatif sur l'environnement (**Unizio, 2019**).

2. Le bâtiment touristique, ses enjeux et ses rôles

Selon la thèse de doctorat de kaoula (**Kaoula, 2017**), qui a porté sur les bâtiments touristiques, elle a évoqué les points suivants :

Afin de comprendre pleinement la notion de bâtiment touristique, il convient tout d'abord de procéder à une définition du concept de bâtiment dans sa globalité, en se basant sur les définitions généralement admises telles qu'elles sont présentées dans les dictionnaires. De manière générale, un bâtiment est une construction élaborée dans le but d'héberger ses résidents ou visiteurs, en leur procurant un refuge et une défense contre les conditions environnementales et climatiques extérieures, tout en établissant un environnement intérieur agréable et relativement préservé des influences extérieures. Par conséquent, on peut définir un bâtiment touristique comme un édifice possédant des attributs historiques et conçu pour servir une fonction particulière dans le domaine du tourisme. D'après sa classification, sa fonction principale consiste à garantir l'hébergement et le logement de ses utilisateurs. Dans notre analyse, notre principale préoccupation réside dans le fait que les bâtiments touristiques peuvent faciliter la circulation de différentes ressources telles que l'énergie, l'eau et les matières premières, engendrant ainsi une diversité d'impacts environnementaux potentiellement dangereux.

Les rôles du bâtiment touristique sont diversifiés et englobent plusieurs domaines interconnectés. Sur le plan économique, il fonctionne comme un établissement commercial. Socialement, il accueille une diversité d'usagers. Culturellement, il revêt une importance en tant que lieu d'hébergement principal et d'autres activités culturelles. Urbainement, il contribue à tisser un réseau urbain cohérent en maintenant la fluidité dans la ville via ses connexions routières. Sur le plan architectural, sa conception peut être symbolique pour un pays.

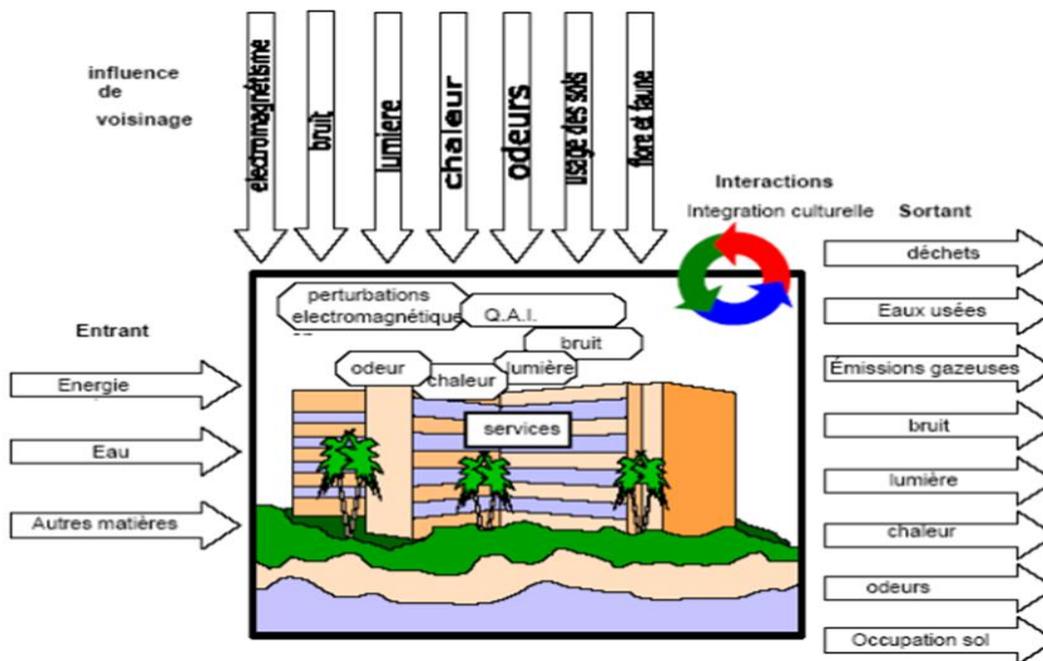


Fig. 7 : Structure des domaines environnementaux dans un bâtiment hôtelier (Kaoula, 2017).

Le bâtiment touristique peut être assimilé à un organisme vivant, recevant des entrées telles que l'énergie et l'eau, et produisant des sorties. Ces flux sont influencés par divers facteurs extérieurs (fig. 7).

Les interactions multiples entre ces perturbations engendrent une organisation structurée complexe au sein du site touristique, où diverses activités touristiques sont mises en place. Cette dynamique, conjuguée à ces activités, engendre des impacts environnementaux négatifs qui compromettent les performances écologiques de l'établissement touristique (Kaoula, 2017).

2.1 Le fonctionnement d'un bâtiment touristique

Pendant ses différentes étapes de vie, le bâtiment touristique exécute diverses tâches, en particulier celle liée à son exploitation. Kaoula (**Kaoula, 2017**) a classé ces fonctions en quatre catégories en fonction du seuil de la qualité environnementale du bâtiment touristique :

- Fonctions de base : Abriter, Protéger, Chauffer, Eclairer.
- Fonctions classiques : Abriter, Protéger, Chauffer, Éclairer, Héberger, Restaurer, Loisirs, Café, Gestion, Respecter les réglementations relatives aux exigences de confort.
- Fonctions d'un bâtiment touristique bioclimatique : Outre les fonctions, ce type de bâtiment optimise : L'énergie solaire, l'éclairage, la ventilation, le confort hygrothermique, l'utilisation des énergies renouvelables.
- Fonctions d'un bâtiment touristique à haute qualité environnementale (HQE) : confort, impacts minimisés, qualité améliorée.

2.2 Les enjeux environnementaux liés au bâtiment touristique

D'après kaoula (**Kaoula, 2017**), le bâtiment touristique, tout comme d'autres types de constructions, exerce des impacts négatifs sur l'environnement. Il puise dans les ressources environnementales et génère diverses émissions, entraînant des dommages souvent irréversibles (fig.8).

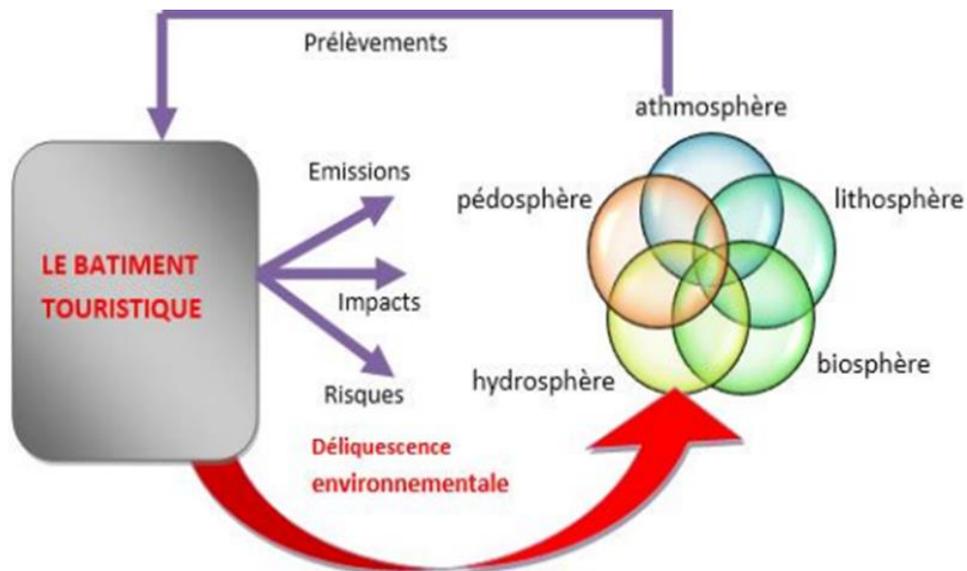


Fig. 8 : Flux entre le bâtiment touristique et les divers compartiments de l'environnement (**Kaoula, 2017**).

Ces enjeux sont nombreux et couvrent la plupart des impacts environnementaux, qui seront étudiés dans le 3eme chapitre (fig. 9).

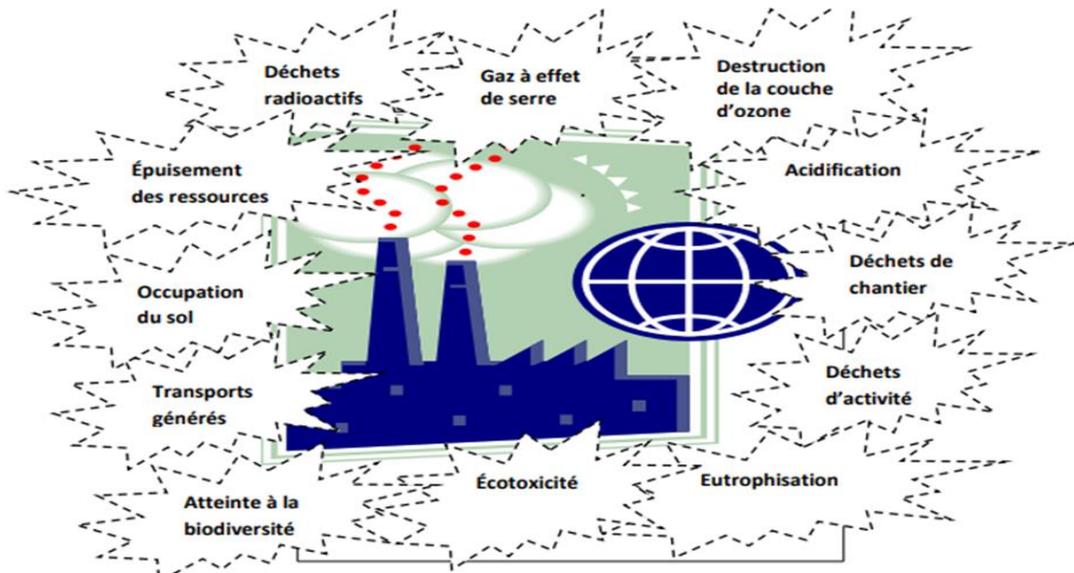


Fig. 9 : Les impacts environnementaux engendrés par le bâtiment touristique (Kaoula, 2017).

Maintenant, nous allons explorer la corrélation entre les défis environnementaux associés aux bâtiments touristiques et leurs répercussions, en soulignant l'impératif d'une gestion responsable de ces édifices. Kaoula (Kaoula, 2017) a synthétisé ces aspects dans le tableau ci-dessous (tab.2).

Tab. 2 : Les enjeux environnementaux associés au bâtiment touristique (Kaoula, 2017) inspiré du modèle de (Mandallena, 2006).

Enjeux environnementaux	Impacts/effets	Sources	Usage responsable dans le bâtiment
Changement climatique	Réchauffement climatique	Emissions de GES	Chauffage par combustion
Atteintes aux différents compartiments d'environnement, eau, air et sol	Contamination potentielle des endroits de stockage, danger de dispersion en cas d'accident majeur. Effet mutagène sur les êtres vivants.	Déchets radioactifs	Chauffage électrique Utilisation de l'électricité
Épuisement des ressources naturelles Atteintes à la biodiversité	Appauvrissement des ressources non renouvelables	Utilisation des matières premières non renouvelables	Fabrication de matériaux
Changement de l'albédo et accentuation de l'effet de serre		Exploitation forestières	
Dégradations des forêts, des sols	Pluies acides	Emission de SOx et Nox	Chauffage par combustion, matériaux, bois
Appauvrissement des ressources en eau potable	Dégradation de la qualité des nappes phréatiques	Polluants chimiques microbiologiques	Lavage, rejets directs des déchets aqueux ou non

2.3 Les émissions du bâtiment touristique

Les hébergements touristiques représentent une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre. En 2005, ces établissements ont généré 274 millions de tonnes de CO₂ au niveau mondial, ce qui équivaut à environ 21 % des émissions totales du secteur touristique et 95 % des émissions globales (PNUE, 2007).

En Algérie, les émissions de CO₂ par habitant ont augmenté de manière significative, passant de 3 tonnes en 1990 à 5,5 tonnes en 2004, soit une hausse de 2,5 tonnes en 14 ans. Les bâtiments touristiques en Algérie ont à eux seuls généré plus de 467,5 milliers de tonnes de CO₂ en 2004 (MEM, 2007).

2.4 Les consommations du bâtiment touristique

Nous analyserons en détail la consommation d'énergie des hôtels, qui se caractérisent par une demande énergétique particulièrement élevée par rapport à d'autres types de bâtiments. Cette consommation couvre un large éventail d'étapes tout au long de la vie d'un hôtel.

La consommation énergétique élevée des hôtels a un impact significatif sur la pollution environnementale et menace la disponibilité des ressources naturelles non renouvelables, de plus en plus rares. Pendant la phase d'exploitation, l'énergie est utilisée pour toutes les opérations de l'hôtel, avec des quantités variables en fonction de la taille et de la capacité de l'établissement. Par conséquent, les espaces réservés à ces différentes activités sont particulièrement surveillés en termes d'efficacité énergétique pour promouvoir une qualité environnementale optimale dans le secteur hôtelier.

3. Portée de l'évaluation environnementale du bâtiment

Pour assurer un avenir durable pour les générations futures, il est impératif d'optimiser les activités humaines, y compris dans le secteur de la construction, connu pour ses impacts environnementaux significatifs. Ce secteur joue un rôle clé dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants, tout en offrant des opportunités substantielles d'économie. Il est donc essentiel de mettre en place un protocole d'évaluation permettant de suivre l'empreinte environnementale d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie (Dakhia, 2019).

3.1 Évaluation

Selon Dakhia (Dakhia, 2019), il est essentiel de mettre en place un processus d'évaluation et de suivi dès les premières étapes de la construction. Ce processus garantit la qualité et la conformité des travaux, en identifiant rapidement les problèmes potentiels et en proposant des

solutions adéquates. Une évaluation approfondie doit examiner tous les aspects du projet, en prenant en compte non seulement les actions individuelles des membres de l'équipe, mais aussi l'interaction entre ces actions, l'impact global sur le projet et la cohérence d'ensemble. Cette évaluation est cruciale pour promouvoir le développement durable, car elle veille à ce que chaque action et programme contribue de manière significative aux objectifs du projet ainsi qu'aux objectifs locaux, régionaux et mondiaux.

Le processus d'évaluation est complexe et comprend plusieurs éléments essentiels illustrés dans la figure 10. Utiliser des méthodes d'analyse rigoureuses pour étudier les flux énergétiques d'un bâtiment et leurs répercussions environnementales est crucial. Cette approche permet une interprétation précise des données et la définition de limites claires pour le projet. Divers outils de calcul, conçus pour répondre à des besoins spécifiques en termes de précision et d'analyse, rendent ces méthodes plus accessibles.

Cette section détaille de manière exhaustive le processus complet d'une évaluation environnementale, soulignant son importance pour des décisions éclairées en matière d'environnement. Elle explore également les différentes typologies d'évaluation environnementale existantes, offrant une vision globale et approfondie de cette pratique essentielle.

Processus d'Évaluation

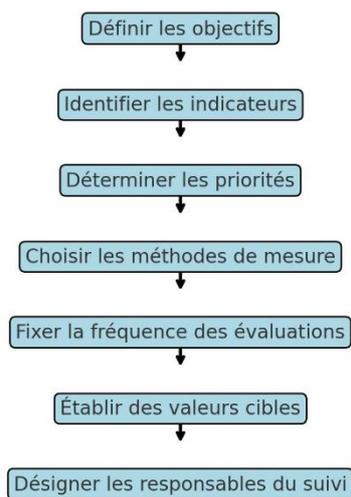


Fig. 10 : les étapes essentielles du processus d'évaluation (auteur, 2024).

3.2 Le cycle d'une démarche d'évaluation environnementale

Le processus d'évaluation environnementale se déroule selon un cycle bien défini, mettant en relation les différents acteurs, les impacts environnementaux, les phases de vie et le

fonctionnement du bâtiment. Ce cycle structure l'approche de l'évaluation environnementale. Les utilisateurs interagissent avec le bâtiment à diverses étapes de son cycle de vie, en respectant les cadres d'utilisation prédéfinis. Ils bénéficient de divers services offerts par le bâtiment, tels que les systèmes énergétiques, aérauliques, sanitaires et de gestion des déchets. Ces services sont ensuite analysés à l'aide d'indicateurs spécifiques pour chaque service, permettant de mesurer les entrées et les sorties du bâtiment (fig. 11).

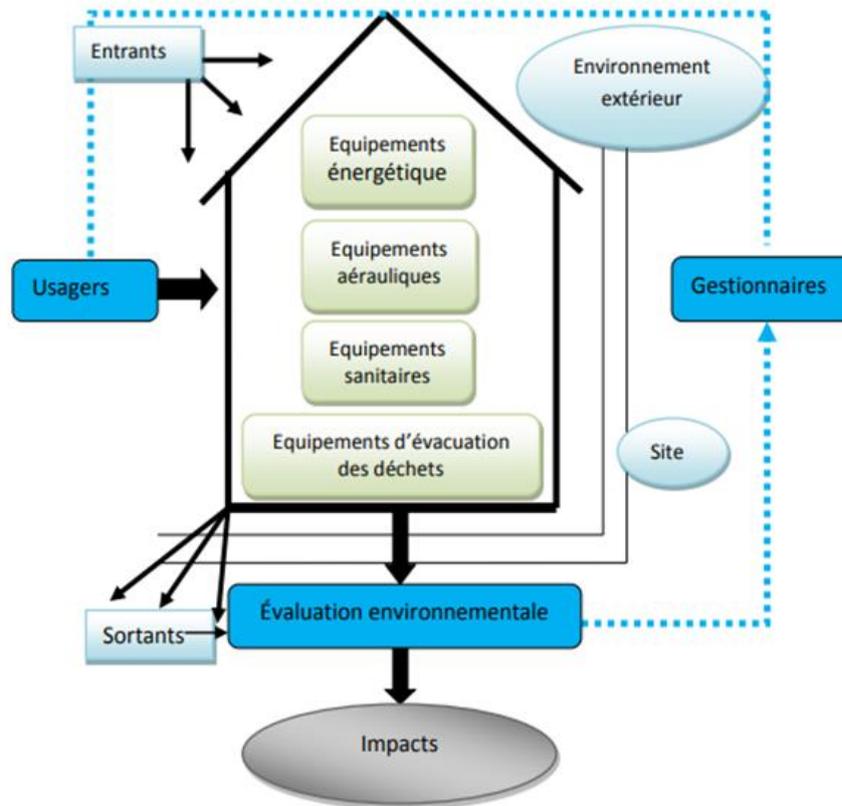


Fig. 11 : Le cycle de la démarche d'évaluation environnementale d'un bâtiment (Kaoula, 2017).

Kaoula a synthétisé les différentes étapes qui composent une démarche d'évaluation environnementale en plusieurs phases distinctes. Dans un premier temps, elle s'est penchée sur l'analyse de la consommation des services offerts par le bâtiment.

Par la suite, une étape cruciale consiste à analyser en détail les données recueillies. Cette analyse se fait en utilisant divers indicateurs pertinents qui permettent d'interpréter les résultats obtenus de manière approfondie. Ces indicateurs, qui sont des outils de mesure spécifiques, sont utilisés pour évaluer de manière précise les différents impacts environnementaux générés par les activités. Une fois ces impacts identifiés, ils sont ensuite communiqués au gestionnaire afin de l'aider à prendre des décisions éclairées pour réduire l'empreinte environnementale du bâtiment. De plus, ces informations sont également utilisées

pour sensibiliser et éduquer les occupants sur les enjeux environnementaux et les inciter à adopter des comportements plus durables au quotidien. Ensuite, une série de mesures est mise en place afin de minimiser les conséquences sur l'environnement. En outre, on encourage activement l'utilisation responsable des services proposés par le bâtiment, pour préserver l'équilibre écologique. Finalement, cette démarche participe activement à la conception d'un bâtiment qui prend en considération les enjeux environnementaux (Kaoula, 2017).

3.3 Importance des méthodes d'évaluation environnementale

L'évaluation environnementale est essentielle dans le secteur du bâtiment, car elle prend en compte l'évolution temporelle, les changements de fonctionnalité, ainsi que les matériaux et techniques utilisés. Cette démarche offre une analyse exhaustive et impartiale des divers aspects. En outre, elle anticipe les modifications potentielles dans l'utilisation ou l'environnement du bâtiment, renforçant ainsi sa capacité d'adaptation au fil du temps (Kaoula, 2017).

On peut résumer succinctement l'importance de l'évaluation environnementale des bâtiments dans le tableau 03.

Tab. 3 : importance de l'évaluation environnementale des bâtiments

Aspect	Description
Réduction des impacts environnementaux	Permet de diminuer significativement les impacts environnementaux du secteur du bâtiment et de réduire la quantité de déchets produits.
Gestion énergétique efficiente	Encourage une gestion énergétique plus efficiente et favorise une conception respectueuse de l'environnement, optimisant les choix de matériaux et de conception.
Analyse des phases de vie	Identifie la phase de vie du bâtiment générant le plus de pollution, permettant de planifier efficacement les interventions pour réduire l'impact environnemental.
Prise de décisions éclairées	Fournit des données détaillées facilitant la prise de décisions éclairées par les divers acteurs du secteur lors de différentes opérations.

Les avantages de l'évaluation environnementale sont nombreux. Bien que les méthodes actuelles présentent encore des défis, il est impératif de réaliser cette évaluation pour atténuer les impacts des bâtiments. Certains outils sont conçus pour toutes les étapes du cycle de vie d'un bâtiment, tandis que d'autres sont spécifiques à certains secteurs. Ces outils seront abordés en détail dans le troisième chapitre.

3.4 Typologie des méthodes d'évaluation environnementale

Dans les paragraphes à venir, nous allons analyser en détail les différentes méthodes fréquemment utilisées pour évaluer les performances d'un projet, en mettant l'accent sur l'évaluation de ses impacts sur l'environnement. Il est important de noter que chacune de ces méthodes peut comporter un système de labellisation ou de notation, comme l'a souligné Kaoula (**Kaoula, 2017**). Le système de labellisation, qui est un processus visant à attribuer des labels ou des certifications à des produits ou des services, définit de manière précise les seuils à atteindre ainsi que les différents niveaux de performance requis. En revanche, le système de notation, quant à lui, établit les critères de mesure qui seront utilisés pour évaluer la performance, et détermine également l'importance relative de chacun de ces critères à travers leur pondération.

3.4.1 Les méthodes de type check-list

Cette catégorie de méthodes, communément désignée sous le nom de méthodes de contrôle, est largement répandue et représente l'approche la plus élémentaire pour évaluer un projet. Ses critères sont généralement présentés sous forme de listes accompagnées de cases à cocher. L'utilisateur attribue un poids à chaque élément du système de notation, ce poids variant en fonction des caractéristiques de chaque élément. Pour obtenir le résultat final, il est nécessaire de pondérer ces notations (**Kaoula, 2017**). Le tableau ci-dessous (tab.04) résume cinq listes établies par André et al (**André et al., 1999**).

Il est essentiel de saisir les avantages et les limites de ces méthodes d'évaluation. Parmi les bénéfices mentionnés figurent la facilité d'utilisation, la flexibilité et la rapidité de réalisation de l'évaluation. Elles offrent également la possibilité d'effectuer des compensations entre les divers éléments de la liste et de se focaliser sur les aspects essentiels de l'évaluation. Toutefois, ces approches comportent également des désavantages, tels que l'impératif de posséder une connaissance approfondie des composantes du projet à évaluer. Le manque d'un référentiel commun et d'une analyse conjointe des éléments peut entraîner des difficultés en termes de lisibilité. L'évaluation peut souvent être sujette à la subjectivité et se baser sur des critères qualitatifs, ce qui ne permet pas d'assurer une objectivité totale pour tous les aspects du projet.

Pour optimiser cette dimension, il est crucial d'utiliser des listes comportant des pondérations, des échelles et des seuils, qui doivent être régulièrement mises à jour pour maintenir leur pertinence. De plus, le nombre d'éléments à évaluer doit être restreint aux impacts essentiels afin de prévenir la complexité et l'ambiguïté lors de l'évaluation (**Kaoula, 2017**).

Tab. 4 : classification de liste des méthodes de contrôle (André et al., 1999).

Type de Listes	Descriptif
Liste simple	Énumération de points de contrôle servant à attirer l'attention du professionnel sur les aspects essentiels.
Liste descriptive	Énumération des éléments à prendre en compte pour renforcer les moyens de contrôle et d'optimisation.
Listes avec seuils	Énumération des points avec des seuils minimales ou maximales qui permettent de les évaluer de manière précise.
Liste avec échelle et pondération	Les indices globaux sont calculés en utilisant des sous-indices pondérés et limités de 0 à 1. En général, les sous indices sont calculés de manière subjective.
Questionnaires	Compilation de questions et de réponses, classées par catégories. Les réponses sont utilisées pour définir les limites de la connaissance et évaluer les éventuelles conséquences du projet.

3.4.2 Les méthodes de labellisation

Ces méthodes, qui sont des référentiels reconnus, sont utilisées pour évaluer et décerner un label à un projet de construction. Ce label est une indication du degré de respect de l'environnement dans la conception et la réalisation du bâtiment. Ce cadre comprend différentes approches, parmi lesquelles on peut citer la démarche Haute Qualité Environnementale (HQE), qui vise à promouvoir la construction et la gestion de bâtiments respectueux de l'environnement (Kaoula, 2017).

3.4.2.1 Les matrices d'impacts

Tab. 5 : Classification des matrices (Cherqui, 2005).

Types de matrices	Caractéristiques
Les matrices simples	Incluent une indication de présence d'interaction ou non.
Les matrices descriptives	Incluent une description de la nature, de la taille, de l'importance ou de la signification de l'impact.
Les matrices numériques	Incluent des chiffres ou des numéros réels qui décrivent l'impact (évaluation et importance).
Les matrices à symboles	Décrivent de manière visuelle la portée de l'impact (mineur, significatif, majeur).

Les matrices d'impact sont des outils d'analyse permettant d'évaluer les conséquences des actions ou des événements sur différents aspects d'un système donné. Elles portent principalement sur les activités effectuées au sein d'un bâtiment et leurs répercussions sur l'environnement, mettant en évidence une relation de cause à effet qui reflète un impact

environnemental. Leopold (**Leopold, 1971**) fut le précurseur de l'application de cette méthode visant à évaluer les impacts d'un projet. Selon Cherqui (**Cherqui, 2005**), les matrices peuvent revêtir un caractère général, sectoriel ou être propres à un projet particulier.

3.4.3 Les méthodes d'aide à la décision

Elles offrent la possibilité de sélectionner une ou plusieurs options liées à certaines particularités du projet, comme sa construction ou sa programmation, ainsi que de prendre une décision finale concernant une alternative parmi de nombreuses autres. Lorsque la solution n'est pas immédiate, ces méthodes présentent l'avantage d'être optimisables. Kaoula (**Kaoula, 2017**) cite un exemple de Brunner et Starkl (**Brunner & Starkl, 2004**) pour illustrer ce point. Cet exemple est basé sur des recherches visant à optimiser les impacts environnementaux et les coûts associés (fig. 12).

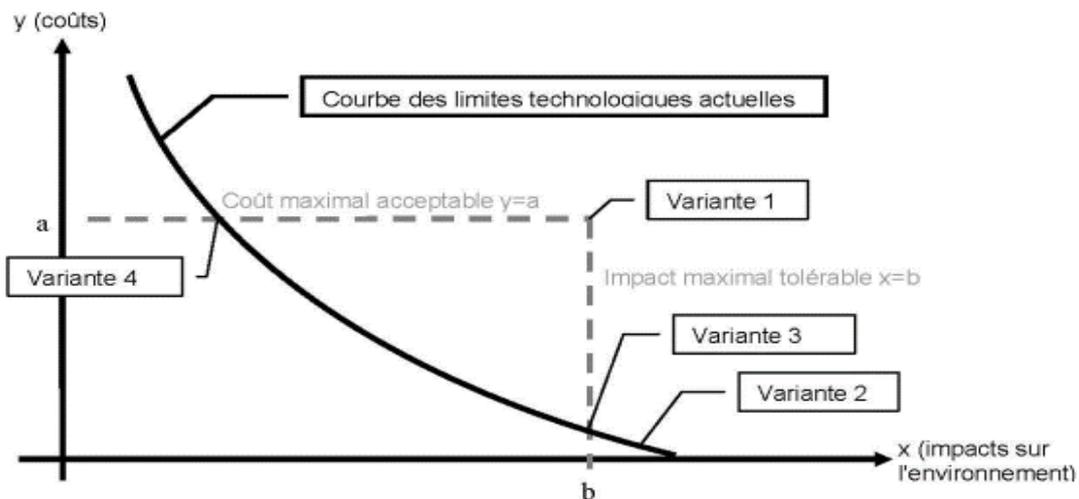


Fig. 12 : Recherche de la meilleure solution (Brunner & Starkl, 2004).

- **Axe des Y (Coûts)** : Cet axe représente les coûts associés aux différentes variantes technologiques, mesurés par une valeur monétaire.
- **Axe des X (Impacts sur l'environnement)** : Cet axe représente les impacts environnementaux des différentes variantes, mesurés par une certaine métrique d'impact environnemental.
- **Courbe des limites technologiques actuelles** : Cette courbe représente la frontière des possibilités actuelles en termes de coûts et d'impacts environnementaux pour différentes variantes technologiques. Toute technologie au-dessus de cette courbe serait moins efficace ou plus coûteuse.

- **Coût maximal acceptable ($y=a$)** : Cette ligne horizontale représente le seuil de coût maximal acceptable pour les technologies considérées. Toute technologie avec un coût supérieur à ce seuil ne serait pas viable économiquement.
- **Impact maximal tolérable ($x=b$)** : Cette ligne verticale représente le seuil d'impact environnemental maximal tolérable. Toute technologie ayant un impact supérieur à ce seuil ne serait pas acceptable du point de vue environnemental.
- **Variantes :**
 - **Variante 1** est située à droite de la ligne verticale, indiquant qu'elle dépasse l'impact environnemental tolérable, bien qu'elle soit en dessous du coût maximal acceptable.
 - **Variante 2** et **Variante 3** se trouvent en dessous de la courbe des limites technologiques actuelles, indiquant qu'elles sont plus efficaces ou moins coûteuses, et en deçà du seuil d'impact environnemental maximal, les rendant acceptables.
 - **Variante 4** est située au-dessus de la courbe des limites technologiques actuelles et du coût maximal acceptable, la rendant non viable à la fois économiquement et technologiquement.
 - **Variantes acceptables** : Les variantes 2 et 3 sont viables car elles respectent les seuils de coûts et d'impacts environnementaux. Ces solutions devraient être préférées dans le contexte actuel des technologies disponibles.
 - **Variantes non acceptables** : La variante 1, bien qu'économiquement viable, ne respecte pas les critères environnementaux, ce qui pourrait entraîner des conséquences négatives à long terme ou des régulations environnementales. La variante 4 n'est viable ni économiquement ni technologiquement et doit être écartée.
 - **Optimisation** : Le graphe met en évidence la nécessité de continuellement améliorer les technologies pour déplacer la courbe des limites technologiques actuelles, réduisant ainsi à la fois les coûts et les impacts environnementaux. Cela pourrait permettre à des solutions actuellement non viables de devenir acceptables à l'avenir.

En conclusion, ce graphe est un outil précieux pour les décideurs, les aidant à identifier quelles technologies sont actuellement viables et où les efforts d'innovation doivent être concentrés pour améliorer les compromis entre coûts et impacts environnementaux.

Les méthodes d'aide à la décision se distinguent par leur capacité à répondre à quatre problématiques distinctes, présentées dans le tableau ci-dessous (Tab. 6) :

Tab. 6 : Les diverses problématiques de l'aide multicritères (Roy & Bertier, 1971)

Problématique	Objectifs	Résultats
P1	Donner une meilleure compréhension de la décision en sélectionnant un sous-ensemble aussi restreint que possible en vue d'une décision finale, ce sous-ensemble comprenant les "meilleures" actions ou éventuellement les actions "satisfaisantes".	Une décision ou un processus de sélection.
P2	Éclairer la décision en effectuant un tri basé sur l'affectation de chaque action à une catégorie, les catégories étant préalablement définies en fonction de normes liées à la suite attendue des actions.	Une procédure de tri ou d'affectation
P3	Mettre en lumière la décision en regroupant toutes ou certaines ("les plus satisfaisantes") des actions en classes d'équivalence, ces classes étant organisées de manière complète ou partielle, conformément aux préférences.	Une organisation ou une procédure de classement
P4	Donner un éclaircissement à la décision en décrivant, à l'aide d'un langage approprié, les actions et leurs conséquences.	Une description ou une méthode cognitive

3.4.4 La méthode d'analyse du cycle de vie (ACV)

Cette méthode d'évaluation des impacts environnementaux d'un objet ou d'un système est un processus analytique qui examine en profondeur diverses catégories telles que le réchauffement climatique, l'acidification et l'eutrophisation. Ces analyses détaillées fournissent des informations précieuses pour une prise de décision éclairée en matière environnementale. L'évaluation des impacts, une tâche complexe, nécessite l'utilisation d'outils et de logiciels spécialisés. Par exemple, le logiciel EQUER, qui utilise des indicateurs pour réaliser cette évaluation, est couramment employé. Ces logiciels exploitent une base de données exhaustive contenant des informations sur les différents matériaux et leurs propriétés spécifiques. Cette base de données comprend également des informations sur les ressources utilisées à chaque étape du cycle de vie d'un bâtiment, permettant ainsi une analyse approfondie et précise de l'ensemble du processus de construction. De plus, il est important de

noter que les méthodes employées pour réaliser une analyse du cycle de vie (ACV) peuvent varier en fonction de la définition du système étudié dans le projet et du niveau de détail des informations disponibles sur les impacts environnementaux du bâtiment (**Kaoula, 2017**).

Nous reviendrons sur cette méthode qui sera examinée en détail dans le troisième chapitre.

3.5 Etat des lieux des différentes méthodes

3.5.1 Usage des différentes méthodes

Il est essentiel de bien appréhender les applications de chaque méthode afin de pouvoir prendre une décision éclairée lors d'une évaluation. Kaoula (**Kaoula, 2017**) a synthétisé les applications des méthodes susmentionnées dans le tableau 7.

Tab. 7 : Usage des diverses méthodes d'évaluation (**Kaoula, 2017**).

Méthode	Usage
Méthodes de type check-list	<ul style="list-style-type: none">• Examiner les impacts d'un projet de construction sur un site.• Guide destiné aux promoteurs et aux concepteurs lorsqu'il y a plusieurs options disponibles.
Méthodes de labellisation	<ul style="list-style-type: none">• Attribution d'une certification ou d'un label à un bâtiment qui correspond à la limite de sa qualité environnementale.
Méthodes des matrices	<ul style="list-style-type: none">• Analyse et évaluation des impacts d'un projet• Exposer les liens entre les activités d'un projet et leurs conséquences éventuelles.
Méthodes d'aide à la décision	<ul style="list-style-type: none">• Répondre aux diverses problématiques présentées dans le tableau 4.
Méthode d'ACV	<ul style="list-style-type: none">• Évaluer des impacts environnementaux.• Elles offrent la possibilité de sélectionner la meilleure alternative parmi tant d'autres.• Identifier la phase de vie du bâtiment qui est responsable des impacts.• Etc...

3.5.2 Critères de choix

Devant la pluralité des méthodes d'évaluation à disposition, la sélection de la méthode la plus adéquate revêt une importance capitale. L'évaluateur ne prend pas de décision de manière aléatoire, mais plutôt en prenant en considération certains critères essentiels. L'évaluation porte principalement sur la convivialité de la méthode, la clarté des résultats produits, sa fiabilité, sa flexibilité pour la mise à jour des données à d'autres fins, ainsi que son exactitude et sa précision dans l'analyse des éléments examinés.

Dans le tableau suivant (tab.8), Kaoula (**Kaoula, 2017**) a synthétisé les principaux paramètres dont dépend l'utilisation d'une méthode d'évaluation.

Tab. 8 : Différents critères pour sélectionner une méthode d'évaluation (Kaoula, 2017).

Critères de choix	Cadre des critères
L'échelle temporelle et spatiale	<ul style="list-style-type: none">• Il est important de préciser l'échelle d'étude, car elle varie d'une méthode à une autre.
La disponibilité et la fiabilité des données.	<ul style="list-style-type: none">• Il sera plus simple d'utiliser la méthode dont les données sont disponibles.
L'objectif de l'évaluation	<ul style="list-style-type: none">• Il est crucial de spécifier la portée de la méthode, qui peut s'appliquer à tous les impacts ou à certains d'entre eux.
Facteurs exogènes liés à l'exploitation de la méthode	<ul style="list-style-type: none">• Le contexte financier, économique et gestionnaire peut rendre la mise en œuvre de la méthode plus facile.

Après une analyse approfondie des approches utilisées précédemment, il apparaît évident que la question que nous avons à traiter nécessite une intégration d'une stratégie visant à minimiser l'empreinte environnementale à chaque étape du processus de projet architectural. Dans le cadre de notre démarche, nous faisons le choix d'adopter une approche qui repose sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) comme pilier central de notre méthode. Cette décision découle des nombreux avantages qu'elle présente ainsi que de ses caractéristiques qui correspondent de manière optimale aux objectifs de notre étude.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les défis environnementaux auxquels nous sommes confrontés en raison des activités humaines et de la construction de bâtiments, qui ont des impacts sur divers aspects de notre environnement, menaçant ainsi la vie sous toutes ses formes. Étant donné l'importance des bâtiments dans la génération de ces impacts négatifs, plusieurs méthodes d'évaluation environnementale ont été élaborées afin d'évaluer leur incidence sur notre planète.

Face à ces défis croissants, des initiatives ont été mises en place afin d'atténuer ces effets néfastes. Dans le prochain chapitre, une analyse détaillée de la stratégie bas carbone sera effectuée parmi ces initiatives, en tant que réponse internationale aux défis environnementaux. Cette analyse mettra en évidence le contexte et les objectifs de la stratégie, dans le cadre d'une vision d'avenir centrée sur des bâtiments à empreinte carbone réduite.

**CHAPITRE II : LA TRANSITION ENERGETIQUE VERS UNE STRATEGIE BAS
CARBONE : UNE REPOSE INTERNATIONALE AUX ENJEUX ET IMPACTS
ENVIRONNEMENTAUX**

Introduction

En réponse aux divers défis environnementaux précédemment évoqués, de nombreux pays à travers le monde ont initié divers programmes et mesures pour réduire l'empreinte environnementale des bâtiments et protéger l'environnement. En France, la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), adoptée en 2015, établit des orientations stratégiques pour promouvoir une transition vers un modèle économique durable, circulaire et respectueux de l'environnement, en visant une réduction substantielle des émissions de carbone dans tous les secteurs d'activité.

Simultanément, l'Algérie s'est engagée à accroître sa capacité de production d'électricité en exploitant des sources d'énergie renouvelables, avec pour objectif d'atteindre 27 % de sa production totale. Le pays prévoit également de réduire sa consommation énergétique de 9 % d'ici 2030 (**Boisgibault, 2015**) et de diminuer ses émissions de gaz à effet de serre de 7 % à partir de 2020 (**Rainfroy, 2015**), dans le but de contribuer à la lutte contre le changement climatique.

Ce chapitre offre une analyse détaillée du contexte de la stratégie bas-carbone, en mettant en évidence ses objectifs et ses principes directeurs. Une attention particulière est accordée au secteur du bâtiment pour mieux comprendre son rôle et son impact dans la mise en œuvre de cette stratégie. L'objectif principal de cette analyse est de réduire la consommation d'énergie et l'empreinte environnementale de ce secteur, tout en évaluant rigoureusement la position actuelle de notre pays par rapport à cette stratégie. Cette évaluation vise à comprendre les progrès réalisés, identifier les défis restants, et formuler des recommandations pour une meilleure intégration des pratiques durables dans le secteur du bâtiment.

1. La transition énergétique

La transition énergétique représente un processus crucial au cours duquel les sociétés cherchent à diversifier leurs sources d'énergie tout en réduisant leur dépendance à l'égard des combustibles fossiles. Cette évolution est essentielle face aux enjeux environnementaux contemporains tels que le changement climatique et l'épuisement des réserves d'énergies fossiles, soulignant ainsi l'urgence de cette transition. Elle vise à orienter nos choix énergétiques vers des sources plus respectueuses de l'environnement, durables et renouvelables, afin de garantir un avenir plus sain pour les générations futures. Ce concept, largement reconnu, implique une transformation progressive visant à réduire la dépendance aux énergies fossiles et, parfois, nucléaires, tout en encourageant le développement des

énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique. En outre, la transition énergétique englobe également des considérations économiques et sociales, visant à établir un système énergétique durable qui soit à la fois écologiquement responsable et bénéfique pour l'économie et la société (**Hamiti & Bouzadi-daoud, 2021**).

L'émergence du concept de transition énergétique en Allemagne dans les années 1980 peut être attribuée à une prise de conscience croissante parmi la population, les décideurs politiques et les experts quant aux défis environnementaux et climatiques majeurs. Cette prise de conscience a progressivement conduit à la nécessité de repenser profondément le modèle énergétique du pays, en mettant l'accent sur le développement de sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement. Initié par l'association allemande Öko-Institut, ce projet avait pour objectif principal de réduire la dépendance aux énergies fossiles en planifiant une transition progressive et actuelle du système énergétique. Ce changement vise à remplacer le modèle existant, largement basé sur des ressources non renouvelables comme les combustibles fossiles, par un nouveau modèle reposant sur l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. Cette évolution est conçue pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre et promouvoir un développement durable et respectueux de l'environnement, marquant ainsi un virage majeur vers une politique énergétique axée sur la satisfaction des besoins sociaux en matière de services énergétiques. Ce changement implique également un passage d'un modèle de production fondé sur des ressources non renouvelables à un modèle basé sur des sources énergétiques renouvelables, comme le souligne Dessus (**Dessus, 2014**).

Selon Sanders (**Sanders, 2014**), la transition énergétique est un processus complexe comportant plusieurs dimensions, chacune visant à promouvoir un nouveau paradigme énergétique distinct de celui en vigueur. Quelle que soit la conceptualisation retenue, l'objectif fondamental de la transition énergétique demeure d'analyser les stratégies permettant de favoriser une évolution vers un système énergétique plus viable et durable (**Hamiti & Bouzadi-daoud, 2021**).

2. Le contexte de la Stratégie Bas Carbone

La France s'est engagée dans une Stratégie Bas Carbone pour participer activement à la lutte mondiale contre le changement climatique. Cet engagement fait partie d'un effort global, initialement structuré par le Protocole de Kyoto en 1997, qui demandait aux nations industrialisées de diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) de 5 % par rapport aux niveaux de 1990, entre 1990 et 2012. Suite au quatrième rapport du Groupe d'experts

intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), un objectif mondial a été établi : limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à 2°C (Ragobert, 2023).

Depuis le début des années 2000, la France a mis en place diverses politiques pour réduire ses émissions de GES. La loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), adoptée en 2015, a été un tournant. Elle a fixé des objectifs précis pour guider le pays vers une économie plus verte, circulaire et durable. Cette loi se concentre sur plusieurs axes : amélioration de la gestion des déchets, rénovation énergétique des bâtiments et promotion de modes de transport plus écologiques. Par la suite, en novembre 2015, la Stratégie Bas Carbone a été mise en œuvre pour organiser ces efforts, en accord avec les objectifs de la COP 21 (Ragobert, 2023).

La Stratégie Bas Carbone est un plan détaillé conçu pour réduire substantiellement les émissions de GES d'ici 2050. Elle inclut des objectifs à court et moyen terme, définis par des budgets carbone. Ces budgets permettent de surveiller et d'évaluer régulièrement les progrès réalisés. L'ambition ultime est d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, ce qui implique une diminution progressive de l'empreinte carbone nationale à travers diverses politiques et mesures visant à limiter les émissions de GES et à encourager des modes de vie plus durables (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2022).

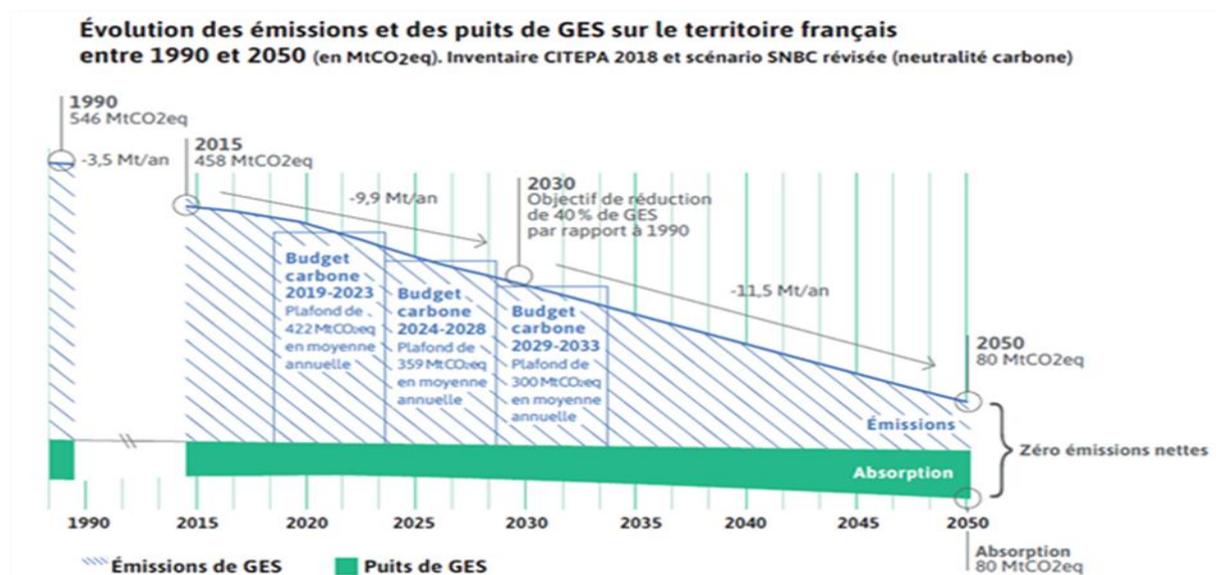


Fig. 13 : Les variations des émissions et des puits de gaz à effet de serre sur le territoire français de 1990 à 2050 (en MtCO₂eq) (Limousin, 2022).

Un autre aspect de la stratégie est la définition de budgets carbone spécifiques à différents secteurs tels que le transport, l'agriculture, les forêts et les sols, la production d'énergie, l'industrie, les déchets et le bâtiment. Ces budgets, qui couvrent la période jusqu'en 2033,

seront révisés tous les cinq ans à partir de 2025 (fig. 13). L'évaluation de la première période (2015-2018) a montré un dépassement de 11 % du budget carbone, révélant que le taux de réduction des émissions était nettement inférieur aux objectifs fixés (**Limousin, 2022**).

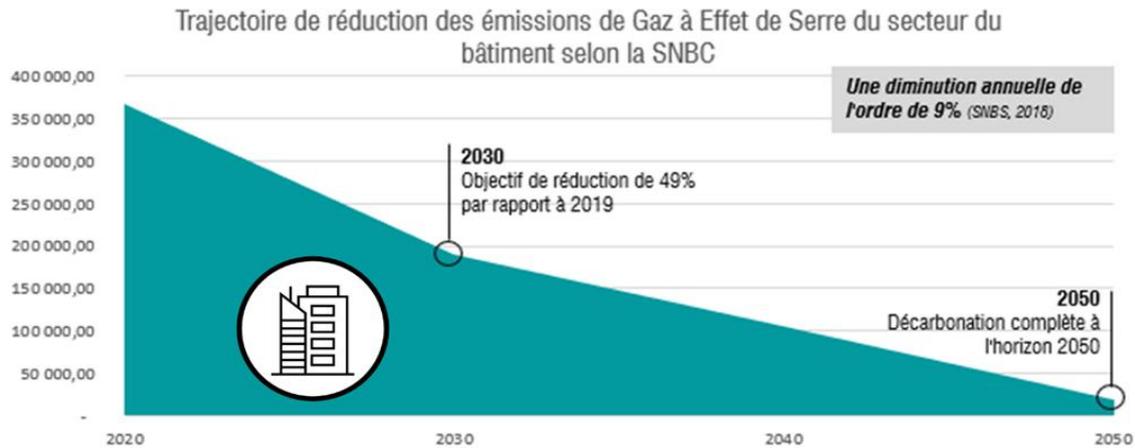


Fig. 14 : Trajectoire de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre du secteur du bâtiment selon la SNBC (**Limousin, 2022**).

La Stratégie Bas Carbone de la France vise à réduire de manière significative les émissions de gaz à effet de serre (GES) en ciblant divers aspects du secteur du bâtiment. Cela comprend la construction de nouveaux édifices, la rénovation des structures existantes et leur utilisation au quotidien. La réglementation environnementale 2020 (RE2020) a été introduite pour remplacer la réglementation thermique RT2012, spécifiquement pour tous les nouveaux bâtiments. Cette nouvelle réglementation cherche à encourager des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement (**Limousin, 2022**).

De nombreux pays européens, tels que l'Allemagne, la Finlande, le Luxembourg, les Pays-Bas, le Portugal et la Suède, ont également mis en place des stratégies spécifiques pour diminuer l'empreinte carbone dans le secteur du bâtiment. Ces initiatives visent à promouvoir la construction de bâtiments à faibles émissions de carbone afin de contribuer à la lutte contre le changement climatique (**Grosjean, 2022**).

En Algérie, la mise en œuvre d'une stratégie pour réduire les émissions de carbone dans le secteur du bâtiment est un défi émergent. Ce défi est soutenu par des engagements nationaux en faveur du développement durable et de la lutte contre le changement climatique.

3. Les objectifs de la Stratégie Bas Carbone

3.1 Atteindre la neutralité carbone

L'Accord de Paris vise à contenir l'augmentation de la température mondiale en deçà de 2 degrés Celsius. Pour atteindre ce but, il est impératif de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre et d'améliorer les capacités de séquestration du carbone. Parvenir à la neutralité carbone d'ici la seconde moitié du XXI^e siècle est essentiel, ce qui implique de ne plus produire plus de GES que ce que nous pouvons absorber. Cet objectif de neutralité carbone est maintenant inscrit dans le plan climatique national pour 2050 (Visier & Laurenceau, 2019).

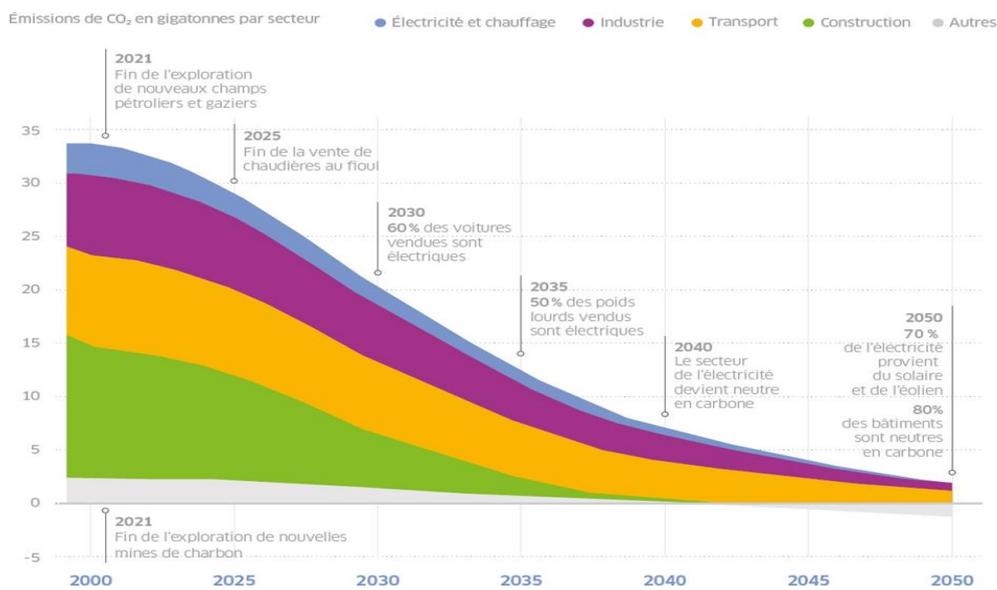


Fig. 15 : Le parcours établi par l'Agence internationale de l'énergie afin d'atteindre la neutralité carbone à l'échelle mondiale d'ici 2050 (Désaunay, 2023).

Face aux défis posés par le changement climatique, il est crucial de viser la neutralité carbone dans le secteur de la construction. Cela signifie réduire au maximum les émissions de GES tout au long du cycle de vie des bâtiments, depuis leur construction jusqu'à leur démolition. Des mesures doivent être mises en œuvre pour réduire ou compenser ces émissions. Promouvoir des pratiques de construction durables, utiliser des matériaux écologiques, optimiser l'efficacité énergétique et adopter les énergies renouvelables sont des actions essentielles pour atteindre la neutralité carbone. Les bâtiments à empreinte carbone neutre visent à minimiser leur impact environnemental à chaque étape de leur existence, incluant la fabrication des matériaux, la construction, l'utilisation et la démolition. Cette transition vers des bâtiments à bilan carbone neutre nécessite une collaboration étroite entre tous les acteurs de l'industrie de la construction, les autorités publiques, les entreprises et la société civile. Les

certifications environnementales, telles que le label BBCA (Bâtiment Bas Carbone), jouent un rôle crucial en établissant des critères pour évaluer la performance environnementale des bâtiments **(Désaunay, 2023)**.

Investir dans la neutralité carbone des constructions représente non seulement une mesure indispensable pour relever le défi du changement climatique, mais également une opportunité de créer des environnements de vie plus sains, économiquement viables et socialement responsables. En adoptant ces approches, il est possible de contribuer à façonner un avenir où les constructions participent activement à la préservation de l'environnement **(Désaunay, 2023)**.

3.2 Réduire l'empreinte carbone

La notion d'empreinte carbone d'un bâtiment mesure les émissions de gaz à effet de serre générées tout au long de son cycle de vie, de la conception à la démolition **(Atmaca & Atmaca, 2022)**. Elle se divise en deux principales composantes : les émissions directes (CO₂ opérationnel) et les émissions indirectes (CO₂ incorporé) **(Filimonau et al., 2011)**. Les émissions opérationnelles proviennent de la consommation d'énergie sur place et de l'utilisation du bâtiment, tandis que les émissions indirectes sont générées par l'extraction, la production, le transport et la démolition des matériaux de construction **(Gao et al., 2014; Huang et al., 2017; Labaran et al., 2021)**.

On peut déduire que, L'empreinte carbone de bâtiment est un concept qui prend en compte tous les impacts environnementaux du CO₂ et des autres GES générés au cours des différentes activités de construction **(Lin et al., 2015)**. Cela comprend tous les impacts des émissions liées aux matériaux utilisés pendant la construction des projets, ainsi que d'autres impacts des émissions liées au processus de construction lui-même, à la période de service de la structure, et même aux diverses émissions associées à sa démolition **(Hong et al., 2015; Labaran et al., 2021)**.

4. Les trois piliers de la stratégie bas carbone appliqués au bâtiment

La stratégie bas carbone appliquée au bâtiment est généralement basée sur trois piliers. Ils ont pour but de favoriser la construction et l'exploitation de bâtiments à faible impact environnemental, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.

Le premier pilier de la stratégie consiste à diminuer les émissions de carbone liées aux matériaux de construction. Ceci nécessite une approche coordonnée visant à concevoir de manière plus efficace, en favorisant l'utilisation de matériaux à faible empreinte carbone, en

optimisant l'efficacité énergétique lors de leur fabrication, et en encourageant l'utilisation de sources d'énergie moins émettrices de carbone. Ces matériaux doivent satisfaire à des exigences de performance rigoureuses dans l'ensemble de leurs fonctions, notamment en termes de résistance mécanique, d'isolation et de confort. Il est impératif d'adopter des solutions innovantes à faible empreinte carbone afin de satisfaire à ces exigences.

Les matériaux à empreinte carbone réduite, tels que les isolants biosourcés comme la laine de chanvre, le lin et le coton, apportent des solutions aux défis sociétaux et environnementaux contemporains. Ils proposent une option moins consommatrice d'énergie pour l'extraction, la production et le transport, ce qui favorise des économies d'énergie et de ressources. Ils garantissent également une efficacité thermique optimale. En outre, leur capacité à être recyclés, réutilisés ou réemployés en fin de vie contribue à la réduction de la quantité de déchets générés sur les chantiers. De plus, les produits biosourcés, qui utilisent des matières premières issues de la photosynthèse, jouent un rôle actif dans la réduction de l'impact du changement climatique sur l'environnement.

Le deuxième pilier de la stratégie a pour objectif de diminuer les émissions de carbone provenant du chauffage des constructions en encourageant l'électrification et le recours aux énergies renouvelables. Il est primordial de chercher un équilibre optimal lors de la sélection du mix énergétique. En complément des technologies actuellement disponibles, il est impératif d'explorer les opportunités de production de biogaz, d'hydrogène et de pompes à chaleur hybrides, en soulignant l'électricité comme un partenaire privilégié.

Le dernier volet de la stratégie met l'accent sur la rénovation énergétique, un aspect essentiel pour une réduction significative des émissions dans le domaine du bâtiment. Ce type de rénovation, qu'elle soit partielle ou totale, vise à réduire la consommation d'énergie des bâtiments en réalisant divers travaux d'amélioration de l'isolation et des équipements énergétiques (Guerniou, 2023).

5. Les labels liés aux stratégies bas carbone

5.1 Le label BBCA

Le label BBCA, également connu sous le nom de Bâtiment Bas Carbone, est une certification qui évalue les performances énergétiques et environnementales des bâtiments, comme l'indique le groupe XPair (XPair, 2024). Parallèlement, d'autres certifications telles que le label E+C- (Énergie + Carbone -) promeuvent la construction de bâtiments à énergie positive tout en réduisant leur empreinte carbone du début à la fin du cycle de vie. La certification

HQE (Haute Qualité Environnementale) récompense les constructions durables respectant des critères stricts en matière de qualité de vie, de respect de l'environnement, de performance économique et de gestion responsable. Le label BBC (Bâtiment Basse Consommation) garantit une consommation énergétique minimale et des émissions de CO₂ réduites.

Le label BBCA se distingue par une évaluation détaillée de l'empreinte carbone des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie, utilisant l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) pour mesurer les émissions de CO₂ évitées par mètre carré de surface utile sur une durée de vie théorique. Applicable à toutes les constructions conformes à la réglementation thermique RT2012, il encourage l'adoption de pratiques de construction durable à faible impact carbone. Cela contribue à valoriser les biens immobiliers tout en jouant un rôle significatif dans la réduction des émissions de carbone.

5.1.1 Les critères spécifiques du label BBCA

Le label BBCA valorise les initiatives visant à réduire l'empreinte carbone des bâtiments à travers plusieurs critères :

5.1.1.1 La construction raisonnée

Ce critère porte sur l'analyse des émissions de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie d'un bâtiment, de sa construction à sa démolition. Il met l'accent sur l'utilisation de circuits d'approvisionnement locaux pour minimiser les émissions de CO₂ lors des phases de production, de transformation et de transport des matériaux. La conception intelligente et optimisée joue un rôle déterminant dans cette réduction (XPair, 2024).

5.1.1.2 L'exploitation maîtrisée

Ce critère porte sur les émissions de gaz à effet de serre pendant la période d'utilisation d'un bâtiment. Il recommande d'installer des systèmes de chauffage, de climatisation, de production d'eau chaude et de ventilation fonctionnant avec des énergies renouvelables telles que le solaire, la géothermie, la thermodynamique ou l'éolien domestique. Une bonne isolation, des fenêtres orientées au sud pour maximiser les apports solaires, la réduction des ponts thermiques et un système de ventilation à double flux sont également préconisés pour limiter les pertes énergétiques (XPair, 2024).

5.1.1.3 Le stockage carbone

Le critère de stockage carbone valorise l'utilisation de matériaux recyclés et biosourcés, issus de biomasses végétales ou animales, pour l'isolation des bâtiments. Parmi ces matériaux, on trouve les textiles recyclés, la ouate de cellulose, les bottes de paille, et les laines composées

de fibres végétales ou animales. Les mortiers et bétons peuvent inclure du chanvre, du bois ou du lin, et il est possible de se procurer du béton à faible empreinte carbone fabriqué à partir de résidus industriels. Des panneaux à base de paille compressée ou de fibres végétales sont également utilisés. Le bois, nécessitant peu de transformation, est particulièrement privilégié. En favorisant les circuits courts et les forêts gérées durablement, on peut considérablement réduire l'empreinte carbone des constructions (XPair, 2024).

5.1.1.4 Une économie circulaire

L'économie circulaire propose un modèle visant à maximiser l'utilisation des ressources en privilégiant la réutilisation, la réparation, le recyclage et la valorisation des produits en fin de vie. Ce modèle inclut également la réduction des émissions de dioxyde de carbone lors des phases de construction et de démolition des bâtiments. En élargissant cette approche, l'économie circulaire se concentre sur divers aspects (XPair, 2024) : l'utilisation de matériaux recyclés et réutilisés durant la construction, l'optimisation de l'espace par le partage entre différents bâtiments ou au sein d'une même structure, ainsi que la flexibilité et l'adaptabilité des bâtiments pour répondre à de futurs besoins d'extension.

5.2 Le Label bas carbone

D'après Dervyn (Dervyn, 2023), il existe plusieurs approches pour réduire les émissions de gaz à effet de serre des bâtiments :

- Favoriser l'optimisation des espaces existants et la rénovation des bâtiments actuels afin de limiter la construction de nouvelles structures.
- Mettre en œuvre des pratiques de construction et de rénovation visant à réduire l'empreinte carbone.

Les divers référentiels tels que la Haute Qualité Environnementale (HQE), Effinergie, les démarches de Bâtiment Durable (BD) ou le label Bâtiment Bas Carbone (BBCA) intègrent désormais l'évaluation de l'empreinte carbone des constructions et des rénovations. La transition vers des sources d'énergie à faible teneur en carbone est également cruciale étant donné leur impact significatif sur les émissions de carbone. Même les constructions écologiques produisent inévitablement des émissions de carbone, nécessitant l'adoption de mécanismes pour atteindre la neutralité carbone

La capture du carbone à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, en utilisant notamment des matériaux biosourcés comme le bois, est une stratégie essentielle pour stocker le carbone dans les bâtiments et réduire les émissions de gaz à effet de serre liées à la construction.

Cependant, pour parvenir à la neutralité carbone, il est essentiel de compenser les émissions résiduelles par des moyens tels que le financement de projets de reforestation, souvent regroupés sous le terme de compensation carbone.

La Stratégie Bas Carbone, mise en place par le gouvernement français, vise spécifiquement à réduire les émissions de carbone et à encourager l'utilisation de puits de carbone pour capturer le carbone émis. L'objectif à long terme est d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Le label Bas Carbone joue un rôle central en facilitant la compensation des émissions de carbone dans les constructions. Établi initialement par le décret n° 2018-1043 du 28 novembre 2018, ce label a été révisé en mars 2022 afin de renforcer son efficacité et de l'aligner avec les objectifs globaux de réduction des émissions.

6. Le bâtiment bas carbone

Le concept de bâtiment à faible émission de carbone (LCB) a vu le jour grâce à une initiative du gouvernement britannique en 2003, visant à promouvoir une économie à faibles émissions de carbone. Actuellement, il n'existe pas de définition universellement acceptée dans le domaine académique. La norme utilisée pour évaluer les bâtiments à faible émission de carbone, approuvée par la Commission municipale de développement urbain et rural de Chongqing, définit un bâtiment conçu pour optimiser ses performances en matière de réduction des émissions de carbone. Cette optimisation est obtenue en réduisant les émissions à la source et en augmentant la capacité de stockage de carbone tout au long de son cycle de vie (**L. Zhang et al., 2017**). D'après l'académicien britannique Phil Jones (**Jones & Xiaoxiao, 2008**) les bâtiments à faible empreinte carbone doivent viser à diminuer la demande énergétique des matériaux de construction et à maximiser l'utilisation de sources d'énergie renouvelables et recyclables.

Trois éléments récurrents apparaissent dans les différentes définitions des bâtiments à faible émission de carbone : la diminution des émissions de CO₂, l'amélioration de l'efficacité énergétique, et l'utilisation de matériaux et de techniques à faible intensité de carbone en tenant compte de l'ensemble du cycle de vie (**Li & Ou, 2010; Sartori & Hestnes, 2007; Tian-yan & Min, 2012**). Certains chercheurs soulignent l'importance des technologies à faibles émissions de carbone pour réduire les gaz à effet de serre (**Cuce et al., 2016**). L'exploitation des énergies renouvelables est cruciale pour accroître l'efficacité énergétique parmi les diverses technologies disponibles (**Suh & Kim, 2019**). En intégrant ces méthodes,

on peut réduire les émissions de carbone en diminuant la consommation de combustibles fossiles pendant la phase opérationnelle.

Parmi les nombreuses sources d'énergies renouvelables, l'énergie solaire est particulièrement recherchée en raison de son abondance, de son installation pratique et de sa bonne maintenabilité (Choi, 2022). Plusieurs études montrent l'importance de l'intégration de l'énergie solaire dans les bâtiments (Kirati, Dechaicha, et al., 2023; Kirati, Medjeldi, et al., 2023) insistant sur la nécessité d'une transition énergétique durable en favorisant l'intégration de l'énergie solaire pour concevoir des bâtiments à consommation énergétique réduite. Cette énergie constitue une alternative écologique pour produire de l'électricité sans pollution (Couderc, 2018).

Les constructions à empreinte carbone réduite sont donc particulièrement pertinentes dans le contexte de l'efficacité énergétique et de la réduction des émissions pour relever le défi du changement climatique à l'échelle mondiale (Tian-yan & Min, 2012).

6.1 Exemples des bâtiments bas carbones réalisés

6.1.1 Hôtel de Ville de Chartres

- Localisation : Hôtel de Ville de Chartres, 16 Rue de la Clouterie, 28000 Chartres, France.
- Date de réalisation : Septembre 2017.
- Architectes : Jean-Michel Wilmotte (Président de Wilmotte & Associés).

Le projet de l'Hôtel de Ville de Chartres répond aux exigences du maître d'ouvrage, qui souhaitait une approche éco-responsable privilégiant les énergies renouvelables et un délai de réalisation rapide. Cependant, l'agence Wilmotte & Associés a cherché à surpasser ces attentes en proposant des solutions supplémentaires, telles que l'utilisation d'une structure en acier/bois, une toiture végétalisée, la récupération d'énergie dans les locaux informatiques et l'installation de sondes géothermiques. Ces approches répondent de manière efficace aux besoins énergétiques tout en diminuant la consommation et les émissions de CO₂. Ce projet axé sur l'écologie et l'efficacité énergétique se démarque par l'utilisation de matériaux adaptés et biosourcés, l'intégration de techniques innovantes pour la production et le stockage d'énergie, ainsi que l'adoption de principes constructifs qui facilitent la déconstruction des bâtiments en fin de vie (Sinteo, 2016).



Fig. 16 : Hôtel de Ville de Chartres (Ville de Chartres, 2018).

6.1.2 Bâtiment Max Weber / Université Paris Nanterre

- Localisation : 92000 Nanterre, France.
- Date de réalisation : Février 2016.
- Architecte : Pascal Gontier.



Fig. 17 : Bâtiment Max Weber - Université Paris Ouest Nanterre (Ekopolis, 2023).

Le bâtiment Max Weber de l'Université de Paris Ouest Nanterre, conçue par l'architecte Pascal Gontier, a été honoré du premier prix lors des Trophées Bois Île-de-France 2016 et a été distingué comme lauréat français Bas Carbone des Green Building Awards 2016. Conçu pour héberger des chercheurs spécialisés en Sciences Sociales et Humaines, cet édifice se

caractérisé par son design en aluminium qui s'inspire des constructions avoisinantes, ainsi que par son engagement environnemental de grande envergure (**Ekopolis, 2023**)

Afin de réduire les émissions de carbone, la construction du bâtiment Max Weber a été entièrement réalisée en bois, ce qui a conduit au stockage de 1600 tonnes de CO₂. Sa consommation d'énergie est extrêmement faible, ne s'élevant qu'à 100 MWh par an, et ses émissions annuelles de CO₂ sont neutralisées pour les 70 années à venir. En outre, l'enveloppe de ce bâtiment présente des similitudes avec celle d'une construction passive, et son système de ventilation naturelle assistée joue un rôle dans la diminution de la consommation d'électricité liée à la ventilation (**Sinteo, 2016**).

6.1.3 Résidence au cœur de La Duranne « Aix en Provence »

- Localisation : Aix en Provence, France.
- Date de réalisation : Juin 2016.



Fig. 18 : Résidence au cœur de La Duranne « Aix en Provence » (**Sinteo, 2016**).

Cette résidence est caractérisée par (**Sinteo, 2016**) :

- Une excellente isolation thermique du bâtiment, ce qui permet de dépasser les normes de la RT 2012 d'environ 10 %.
- Un bilan carbone remarquable a été réalisé pendant la phase de construction, s'élevant à environ 240 kg éq. CO₂/m² SD, ce qui représente une performance deux fois supérieure à celle d'une construction traditionnelle.
- Un système de construction hybride combinant le bois et le béton.
- Une conception adaptée aux spécificités des architectures locales.

- Les murs en ossature bois industriels sont pourvus d'une isolation, de menuiseries extérieures et de revêtements de façade de haute qualité.

7. Alignement de la stratégie bas carbone avec la réglementation environnementale 2020

7.1 La réglementation environnementale RE 2020

Entrée en vigueur en janvier 2022, la Réglementation Environnementale 2020 (RE2020) remplace progressivement les initiatives BEPOS et le label E+C- pour les nouvelles constructions résidentielles en France. Contrairement à la RT2012, la RE2020 met un accent particulier sur la réduction de l'empreinte carbone tout au long du cycle de vie des bâtiments. En outre, elle vise à assurer le confort thermique estival par l'utilisation accrue des énergies renouvelables (Arce, 2022).

La RE2020 se distingue en tant que première réglementation française, et l'une des pionnières à l'échelle mondiale, à incorporer des critères de performance environnementale basés sur une évaluation détaillée du cycle de vie des bâtiments (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, 2024).

7.2 Le contexte de mise en place de la RE2020

Dès janvier 2019, un vaste processus de consultation a été lancé par divers professionnels de la construction et de l'urbanisme. Cette initiative visait à soutenir les travaux des experts en thermique ainsi que d'autres spécialistes du secteur du bâtiment. Cette collaboration a permis d'identifier plusieurs points de convergence qui ont servi de base à l'élaboration de la Réglementation Environnementale 2020 (RE2020). Cette nouvelle réglementation vise progressivement à transformer les méthodes de construction des nouveaux bâtiments, ainsi que les filières industrielles et les solutions énergétiques, dans le but d'améliorer la gestion des coûts de construction en mettant un accent particulier sur l'efficacité énergétique, l'amélioration du confort des bâtiments et la réduction de leur empreinte carbone. La RE2020 s'applique spécifiquement aux maisons individuelles, aux logements collectifs, aux bureaux, aux bâtiments d'enseignement primaire et secondaire, ainsi qu'à certains bâtiments du secteur tertiaire comme les hôtels et les commerces (Lefebvre Dalloz, 2023), suivant un calendrier d'application et de publication présenté dans la figure 19.

Depuis plusieurs années, de nombreuses lois ont été adoptées pour traiter les problèmes environnementaux liés à la construction neuve et pour établir des objectifs ambitieux. Depuis le choc pétrolier en 1973, diverses normes thermiques ont été instaurées en France. Suite à

cette crise, il est désormais évident que l'énergie et son économie revêtent une importance cruciale. La deuxième crise pétrolière de 1979 a conduit à l'adoption de la Réglementation Thermique de 1982. Au fil des années, ces normes ont été progressivement renforcées pour améliorer les performances, comme l'exigence de confort estival introduite par la réglementation thermique de 2000. Par la suite, la réglementation thermique RT2005 a marqué des avancées en matière de consommation et d'efficacité énergétique. Le Grenelle de l'Environnement a ensuite fixé l'objectif de réduire la consommation d'énergie des nouvelles constructions, objectif concrétisé par la réglementation thermique RT2012. Son niveau d'exigence a augmenté en s'appuyant sur les principes du bâtiment passif, exigeant ainsi une expertise significative en construction (Arce, 2022).

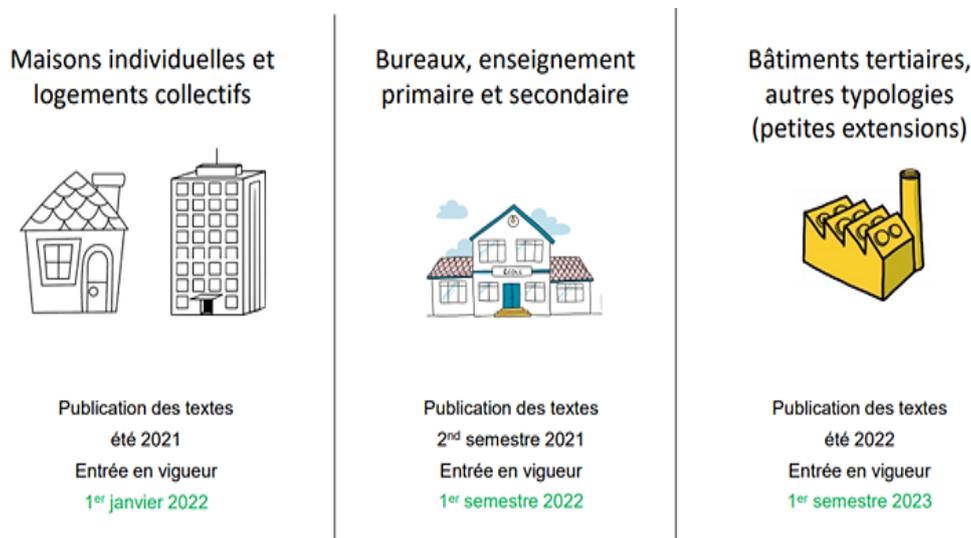


Fig. 19 : Calendrier d'application et de publication (Chauvin & Palis, 2021).

Le rétablissement de cette réglementation a facilité l'élaboration de la RE2020. Cependant, l'expérimentation E+C- s'est intercalée entre ces deux réglementations. Le label E+C- (Energie Positive et Réduction Carbone) permet d'évaluer la performance énergétique et environnementale à l'aide d'une diversité d'indicateurs. Elle a sensibilisé et renforcé les compétences des professionnels concernant les problématiques liées au dioxyde de carbone et à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). De surcroît, cela a contribué à une meilleure appréhension du processus d'évaluation des indicateurs énergétiques et environnementaux. Elle a mis en avant la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le domaine de la construction neuve pour parvenir à la neutralité carbone. Dernièrement, la récente réglementation RE2020 va au-delà en imposant l'obligation d'incorporer des matériaux biosourcés et de générer de l'énergie renouvelable. Ceci entraîne une hausse des coûts pour le producteur et le potentiel acheteur (Arce, 2022).

En conclusion, une véritable politique visant à réduire l’empreinte carbone a vu le jour dans le secteur du bâtiment. La RE2020 remplace la réglementation précédente en ajoutant des nouvelles modifications. Il est également nécessaire de modifier la façon dont la construction est réalisée en utilisant des nouvelles techniques pour adapter les matériaux biosourcés utilisés auparavant aux nouvelles exigences, ce qui a un impact sur le coût de construction des réalisateurs (Arce, 2022).

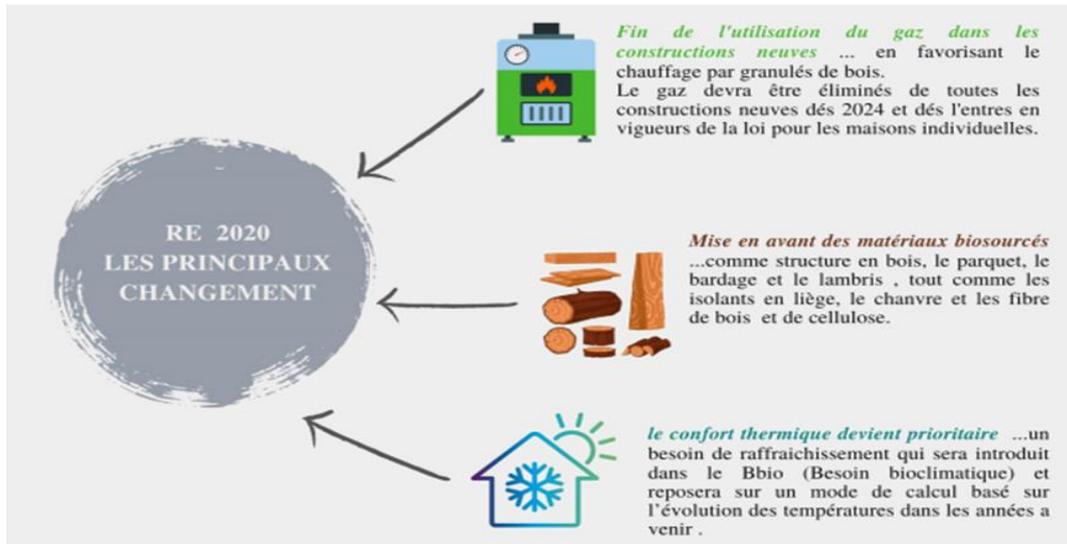


Fig. 20 : Les principaux changements de la RE 2020 (Arce, 2022).

7.3 Objectifs de la RE2020

La Réglementation Environnementale 2020 (RE2020) représente une évolution continue des normes de construction visant à réduire l'empreinte carbone, s'inscrivant ainsi dans la lignée de la stratégie bas carbone. Selon le rapport "RE 2020 : Éco-construire pour le confort de tous" du ministère de la Transition écologique, la RE2020 vise trois objectifs principaux : améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de carbone dans le secteur de l'énergie, diminuer l'empreinte carbone des constructions, et assurer le confort thermique en périodes de chaleur intense.

La réglementation qui succède à la RT2012 renforce les exigences, notamment en matière d'isolation, avec une augmentation de l'indicateur de besoin bioclimatique (Bbio), indépendamment du système de chauffage utilisé. Elle encourage également la décarbonation des sources d'énergie en favorisant des solutions comme les pompes à chaleur et la biomasse, afin de réduire la dépendance aux combustibles fossiles dans le secteur du chauffage résidentiel.

Un point crucial de cette réglementation est l'intégration complète des émissions de carbone tout au long du cycle de vie des bâtiments, dès leur phase de construction, étant donné que celles-ci représentent une part significative de l'empreinte carbone totale sur 50 ans selon la RT2012. Pour réduire cet impact, la RE2020 promeut l'utilisation de méthodes de construction à faible empreinte carbone, en mettant particulièrement l'accent sur les matériaux biosourcés comme le bois, capables de stocker le carbone tout au long de la durée de vie du bâtiment.

Ces nouvelles normes imposent une transformation profonde des pratiques de construction à tous les niveaux de la chaîne d'approvisionnement du secteur du bâtiment (**Ministère de la transition écologique, 2023**).

Enfin, la RE2020 vise à améliorer le confort des occupants des bâtiments neufs en les rendant plus adaptés aux conditions climatiques changeantes, particulièrement aux périodes de chaleur accrue susceptibles d'augmenter avec le changement climatique (**Lefebvre Dalloz, 2023**).

7.4 Les 6 indicateurs faisant l'objet d'exigences dans la RE2020

Ces indicateurs présentés dans la figure ci-dessous (fig.21) sont au cœur des exigences de la RE2020. Ils visent à promouvoir des constructions à faible impact environnemental et énergétique.

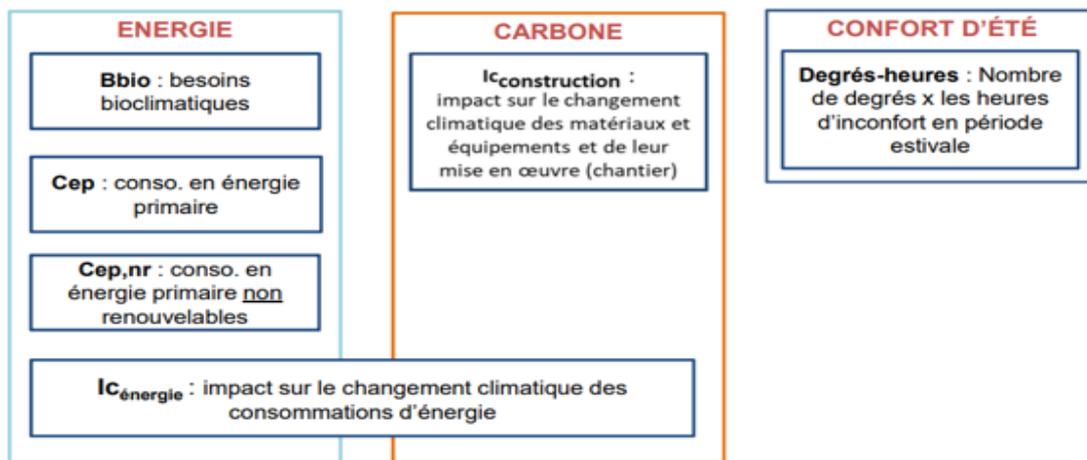


Fig. 21 : Les 6 indicateurs faisant l'objet d'exigences dans la RE2020 (**Chauvin & Palis, 2021**).

7.4.1 Exigences relatives à la thématique du carbone

Pour évaluer l'impact environnemental d'un bâtiment, l'analyse du cycle de vie (ACV) est indispensable. La réglementation environnementale 2020 (RE2020) établit cinq étapes principales, comme le montre la figure 22, englobant également le transport. Grâce à cette méthode, les effets environnementaux sont évalués à chaque étape en se basant sur cinq

catégories : les composants, l'énergie, l'eau, le chantier et la parcelle. En utilisant les données spécifiques au projet et les informations environnementales, il est possible de calculer les impacts à chaque phase de la construction en appliquant des unités fonctionnelles. Par exemple, pour déterminer l'empreinte environnementale d'un mètre cube de béton destiné aux fondations, on utilise une unité fonctionnelle que l'on multiplie par la quantité totale de béton utilisée afin d'obtenir l'empreinte globale des fondations (Arce, 2022).



Fig. 22 : Principe de l'ACV (Arce, 2022).

Performance environnementale du bâtiment sur son cycle de vie						
	Phase de production (étape 1)	Phase de Construction (étape 2)	Phase d'exploitation (étape 3)	Phase de fin de vie (étape 5)	Bénéfices et charges : valorisation en fin de vie et export d'énergie (étape 5)	
Contributions	Composants	✓	✓	Entretien et maintenance ✓	✓	
	Énergie		✓			
	Eau			✓		
	Chantier		✓			✓
	Parcelle	✓	✓	✓	✓	✓

Fig. 23 : Contributions aux impacts sur le cycle de vie du bâtiment (Arce, 2022) .

La RE2020 régle 27 critères environnementaux, en mettant en avant l'impact du changement climatique mesuré par l'ACV. Cet impact est principalement quantifié en considérant les contributions des différents éléments tels que les composants, l'énergie, l'eau et le chantier, et est exprimé en kgCO₂eq/m², désigné par « IC construction » avec une unité de mesure en

kgCO₂eq/m². Les indicateurs spécifiques « IC énergie » et « IC construction », qui englobent les contributions des composants et du chantier, sont particulièrement encadrés par la RE2020 (Arce, 2022).

7.4.1.1 IC construction

L'indicateur "IC construction" agrège les contributions des indices de composants (IC composant) et du chantier (IC chantier). Cet indicateur permet de mesurer l'impact environnemental des produits de construction ainsi que de leur installation, particulièrement en ce qui concerne le changement climatique. Cette méthode offre un cadre d'évaluation cohérent pour les produits préfabriqués et autres matériaux de construction, en prenant en compte simultanément les effets des composants et du processus de mise en œuvre (Arce, 2022).

En intégrant ces différentes contributions, l'approche permet non seulement d'évaluer de manière globale l'impact des bâtiments sur le climat, mais également de fournir une analyse détaillée et spécifique à chaque phase de construction. Par exemple, l'impact environnemental d'un panneau de mur préfabriqué peut être analysé en tenant compte à la fois de la fabrication du panneau et de son installation sur le site de construction. Cela permet de mieux comprendre et d'optimiser chaque étape pour réduire l'empreinte carbone globale du bâtiment.

7.4.1.2 IC énergie : l'impact sur le changement climatique

L'indicateur "IC énergie" mesure l'impact climatique lié à la consommation énergétique des bâtiments pendant leur utilisation. Il met en relation la performance énergétique avec des facteurs de réduction de la consommation d'énergie et l'utilisation de sources d'énergie à faible émission de carbone. Calculé de manière dynamique, il prend en compte la consommation d'énergie finale de chaque vecteur énergétique sur une période de 50 ans, multipliée par le facteur d'émission correspondant. Un coefficient moyen de pondération de l'impact climatique, fixé à 0,79, est ensuite appliqué.

La stratégie bas carbone pour le secteur du bâtiment se concentre sur deux axes principaux : la décarbonation de l'énergie utilisée et l'optimisation des processus de construction. Ces aspects sont mesurés en kilogrammes équivalents de dioxyde de carbone par mètre carré de surface de référence (Arce, 2022).

8. L'Algérie face au changement climatique

L'Algérie s'affirme comme l'un des premiers pays africains à avoir ratifié divers accords internationaux pour la préservation de l'environnement, dont le protocole de Kyoto et la

convention de Barcelone (**Caritas Algérie, 2011**). En dépit d'une exposition croissante aux phénomènes climatiques extrêmes, le pays maintient fermement son engagement envers les initiatives internationales visant à combattre les catastrophes naturelles. Lors de forums climatiques internationaux et régionaux, tels que la COP26 à Glasgow, l'Algérie a régulièrement insisté sur la nécessité de reconnaître la responsabilité historique des pays développés, principaux émetteurs de gaz à effet de serre, tout en prenant en compte les disparités avec les pays en développement (**APS, 2021**).

Sur le plan national, l'Algérie a élaboré un Plan national Climat pour la période 2020-2030, intégrant 155 initiatives visant à diminuer les émissions de gaz à effet de serre, à atténuer les impacts des changements climatiques et à améliorer la gouvernance climatique. Le pays s'est fixé pour objectif de réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 7 % d'ici 2030, avec une possibilité d'atteindre une réduction de 22 % sous réserve de financements adéquats pour soutenir les efforts d'adaptation climatique. Les mesures prioritaires de ce plan incluent la réhabilitation et l'extension du projet du barrage vert, ainsi que l'utilisation de l'énergie solaire pour l'irrigation des terres situées dans le sud et les hauts plateaux. Ce plan constitue un élément fondamental pour la mise en œuvre de la politique nationale de la lutte contre le changement climatique et pour la promotion d'une économie verte et durable (**APS, 2021**).

8.1 La politique énergétique en Algérie

En 1986, le contre-choc pétrolier, qui s'est caractérisé par une baisse significative des prix du pétrole sur le marché mondial, a eu un impact négatif sur l'Algérie. En tant que nation exportatrice de pétrole et de gaz naturel, l'Algérie a été particulièrement touchée par cette situation économique difficile, qui a entraîné des conséquences importantes pour son économie et sa stabilité financière. La diminution des prix du pétrole, en raison de divers facteurs a entraîné une crise économique majeure qui a eu un impact considérable sur les économies des pays dépendant fortement de cette ressource (**Mazari, 2012**). Les autorités algériennes ont pris conscience de l'importance de mettre en place une politique d'efficacité énergétique pour faire face à ce type de situations. Cela s'est concrétisé par la mise en place de différentes lois et réglementations visant à promouvoir une utilisation plus efficace de l'énergie (**Rahmouni, 2020**).

8.1.1 Les textes règlementaires

Pour faire face aux enjeux énergétiques, économiques et environnementaux dans le secteur de la construction, des réglementations spécifiques ont été mises en place à l'échelle mondiale. Ces réglementations visent à équilibrer les trois piliers fondamentaux (Économie, Énergie et

Environnement) dès les premières étapes de la conception des projets de construction. Dakhia (**Dakhia, 2019**) souligne que la réglementation thermique pour les bâtiments a pour but:

- Définir des standards clairs de performance énergétique pour les structures bâties. Cela englobe non seulement l'isolation thermique pour réduire les pertes de chaleur, mais également l'optimisation du coefficient de transmission thermique en tenant compte de l'orientation du bâtiment pour maximiser les gains solaires naturels. Il est primordial de tenir compte de la gestion de l'apport solaire par les fenêtres afin d'assurer une efficacité énergétique maximale.
- Promouvoir la production d'énergie en utilisant des technologies solaires thermiques qui convertissent l'énergie solaire en électricité, ainsi que des technologies photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil en électricité.
- Exiger l'installation de systèmes de chauffage, de climatisation, d'éclairage et de production d'eau chaude sanitaire (ECS) à haute efficacité énergétique.
- Promouvoir la diminution maximale de la consommation d'énergie en kWh/m².an.

Rahmouni (**Rahmouni, 2020**) a synthétisé les lois relatives à la maîtrise de l'énergie comme suit.

Tab. 9 : les différentes législations et décrets liés au secteur de l'énergie en Algérie.

Législation	Description
La loi 09-99 du 28 juillet 1999	Cette loi-cadre vise à réguler le secteur de l'énergie en Algérie, contribuant à la politique énergétique nationale en favorisant une gestion rationnelle de la demande énergétique et en établissant des directives pour la gestion de l'énergie dans le secteur de la construction.
Le décret exécutif n° 2000-90 du 24 Avril 2000	Ce décret concerne la réglementation thermique applicable aux nouvelles constructions résidentielles.
La loi 04 – 09 du 14 Août 2004	Elle traite de la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
Le décret exécutif 04-149 du 19 Mai 2004	Ce décret établit les procédures pour la création du programme national de gestion de l'énergie.
Décret exécutif n° 05-16 du 11 janvier 2005	Il établit des normes spécifiques en matière d'efficacité énergétique pour les dispositifs utilisant l'électricité, le gaz et les produits pétroliers.
Arrêté interministériel du 29 novembre 2008	Cet arrêté définit la classification de l'efficacité énergétique des appareils électroménagers, les soumettant à des normes spécifiques en matière d'efficacité énergétique.

8.1.2 Documents techniques réglementaire

Conformément à cette réglementation, le Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) a développé des documents techniques réglementaires (DTR) pour dynamiser le secteur de la construction (tab.10). Ces DTR ont été introduits par le ministère de l'Habitat et leur mise en application est supervisée par le CNERIB (**Rahmouni, 2020**). Ferradji (**Ferradji, 2017**), précise que ces documents sont spécifiquement élaborés pour les bâtiments résidentiels, en tenant compte des caractéristiques de l'enveloppe des constructions.

Tab. 10 : DTR de l'Algérie et leurs descriptions.

DTR	Description
DTR C 3-2	Définit les procédures de calcul des pertes de chaleur pour les bâtiments résidentiels, visant à réduire la consommation d'énergie de chauffage en hiver en analysant les pertes thermiques et en assurant la conformité des structures des bâtiments.
DTR C 3-4	Se concentre sur le calcul des gains de chaleur en été pour limiter l'utilisation de la climatisation et ainsi réduire la consommation d'énergie estivale.
DTR C 3-34	Porte sur la ventilation des espaces résidentiels et établit les principes de base pour la conception des systèmes de ventilation naturelle.

En Algérie, il n'existe pas encore de réglementation thermique spécifique pour les bâtiments publics. Actuellement, la conformité aux normes thermiques spécifiées dans les différents DTR, tels que le DTR C 3-2, DTR C 3-4 et DTR C 3-34 pour les constructions résidentielles, n'est pas obligatoire. Cette absence de réglementation contraignante contribue à l'inefficacité énergétique dans le secteur de la construction en Algérie, car la majorité des bureaux d'études d'architecture ne sont pas familiarisés avec ces régulations (**Rahmouni, 2020**).

8.1.3 Les dispositifs institutionnels de l'efficacité énergétique en Algérie

L'infrastructure institutionnelle mise en place par l'État algérien a pour objectif de s'assurer que les principaux outils élaborés par les autorités publiques pour promouvoir une gestion optimale de l'énergie soient mis en œuvre de manière cohérente et efficace (**Bouamama, 2013; Ferradji, 2017; Zekraoui, 2017**).

8.1.3.1 Le programme national de maîtrise de l'énergie (PNME)

Ce plan prend en compte les priorités stratégiques du pays pour assurer une gestion efficace et durable de la consommation énergétique. Il intègre les analyses prospectives sur les besoins énergétiques à moyen et long terme, afin de garantir une planification efficace et adaptée aux enjeux actuels et futurs en matière d'énergie. Ces études approfondies permettent d'acquérir

une connaissance approfondie des défis spécifiques rencontrés dans la gestion de l'énergie, ainsi que des différentes opportunités qui se présentent, au sein de divers secteurs économiques. Ce plan détaille de manière précise les orientations à suivre, les objectifs à atteindre et les stratégies clés à mettre en place pour assurer sa pleine réalisation. En créant un tel cadre, il favorise la collaboration entre les différents acteurs économiques et sociaux, qu'ils relèvent du secteur public ou privé (**Rahmouni, 2020**).

8.1.3.2 Le fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNME)

Ce fonds revêt une importance capitale dans le financement des projets visant à encourager l'efficacité énergétique et à favoriser la transition vers des sources d'énergie plus durables. Ce fonds joue un rôle essentiel en apportant des contributions financières pour soutenir les projets qui ont pour objectif de promouvoir l'efficacité énergétique. Il s'implique de manière proactive dans la promotion des pratiques éco-responsables en matière de consommation d'énergie, ce qui aide à préserver l'environnement et à lutter contre le changement climatique.

Pour garantir la pérennité et la disponibilité à long terme des ressources du FNME, il est essentiel de maintenir un financement adéquat. Le fonctionnement de ce fonds est rendu possible grâce à la présence d'une taxe spécifique qui lui est affectée. Cette taxe spécifique assure l'indépendance financière de l'entité par rapport au budget de l'État (**Rahmouni, 2020**).

8.1.3.3 Le comité intersectoriel de la maîtrise de l'énergie (CIME)

Il joue également un rôle crucial dans le développement et la mise en œuvre de projets pilotes, en identifiant les meilleures pratiques et en favorisant leur adoption à grande échelle. Par ailleurs, le CIME encourage la création de partenariats solides entre les secteurs public et privé, visant à mobiliser des ressources et des compétences diverses pour répondre aux défis énergétiques actuels (**Rahmouni, 2020**).

8.1.3.4 Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE)

Sous la tutelle directe du ministère de l'Énergie, l'APRUE est un pilier central pour la mise en œuvre des politiques énergétiques nationales. En tant que principale coordinatrice des initiatives nationales visant à optimiser l'utilisation de l'énergie, l'agence est chargée de superviser et d'assurer une exécution cohérente et efficace de la stratégie énergétique globale.

Son objectif est de garantir que toutes les actions prévues sont réalisées de manière efficiente et alignée sur les objectifs de promotion d'une utilisation plus responsable et durable de l'énergie à l'échelle nationale. Cette politique vise à encourager une approche à long terme,

mettant l'accent sur la rationalité économique et environnementale dans les décisions énergétiques, que ce soit dans l'industrie, le commerce ou d'autres secteurs économiques. La transversalité est un élément clé de cette politique, soulignant l'importance de l'APRUE en tant qu'acteur central facilitant la coopération entre les différents intervenants (**Rahmouni, 2020**).

8.2 Programme national d'efficacité énergétique à l'horizon 2030

Le programme d'efficacité énergétique en Algérie a pour objectif de diminuer la consommation d'énergie de 9 % d'ici 2030, en se concentrant sur des secteurs clés tels que le bâtiment, les transports et l'industrie. Pour atteindre cet objectif, la priorité est donnée à l'intégration de technologies et d'équipements avancés (**APRUE, 2015**).

8.2.1 Secteurs d'intervention de programme

Le programme cible principalement les secteurs de consommation ayant un impact significatif sur la demande énergétique, tels que la construction, les transports et l'industrie (**Rahmouni, 2020**).

- **En ce qui concerne le secteur du bâtiment**

Dans le domaine de la construction, le programme vise à promouvoir l'adoption de méthodes et de technologies innovantes pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Cela inclut l'intégration de solutions adaptées dès les phases initiales de la conception des projets résidentiels, avec une attention particulière portée à l'optimisation de l'isolation thermique. L'objectif est également de favoriser la diffusion d'équipements et d'appareils performants sur le marché local.

Pour encourager et améliorer l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment, il est essentiel de développer une industrie locale dédiée à la conception et à la mise en œuvre de solutions d'isolation thermique. Cette approche vise à améliorer le confort intérieur des logements tout en réduisant la consommation d'énergie. La fabrication locale d'équipements et d'appareils hautement performants est également cruciale pour soutenir cet effort (**Rahmouni, 2020**).

8.2.2 Les axes d'interventions de programme

- **L'isolation thermique des bâtiments**

Le volet du programme relatif aux bâtiments vise à promouvoir l'adoption et la diffusion de pratiques et technologies innovantes en matière d'isolation thermique pour les bâtiments

existants et en construction. Pour ces derniers, des mesures adéquates sont intégrées dès la phase de conception architecturale (**Rahmouni, 2020**).

- **Le développement du chauffe-eau solaire**

Le programme met un accent particulier sur la transition vers l'utilisation du chauffage solaire de l'eau pour satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire, que ce soit à l'échelle individuelle ou collective. Par conséquent, il promeut des actions visant à encourager l'adoption répandue des chauffe-eau solaires, en mettant l'accent sur leur production locale d'ici 2030. Cela nécessite des efforts soutenus pour promouvoir leur adoption en remplacement des systèmes de chauffage traditionnels, afin de favoriser une utilisation des ressources énergétiques plus durable (**Rahmouni, 2020**).

- **La généralisation de l'utilisation des lampes à basse consommation d'énergie**

L'objectif principal de ces initiatives est de promouvoir l'usage généralisé de lampes à faible consommation d'énergie, en remplaçant progressivement les lampes à incandescence. Cette transition commencera par l'arrêt de l'importation et la cessation de la vente de lampes à incandescence. De plus, la promotion de la fabrication locale de lampes à faible consommation est envisagée, ce qui encouragera la collaboration entre les fabricants nationaux et internationaux pour atteindre cet objectif ambitieux (**Rahmouni, 2020**).

8.2.3 Les programmes nationaux pour la maîtrise d'énergie

Dans le cadre de la stratégie nationale de gestion de l'énergie, l'APRUE a mis en œuvre en 2009 six initiatives axées sur la gestion et l'économie d'énergie. Rahmouni a synthétisé ces éléments de la manière suivante (**Rahmouni, 2020**) :

- Le Programme Eco-Lumière a été mis en place afin de garantir un éclairage optimal en utilisant des lampes à faible consommation d'énergie, ce qui permet de réduire l'empreinte écologique tout en assurant des économies d'électricité significatives.
- Le programme Propp-Air a été mis en place pour favoriser l'expansion de l'utilisation du GPL Carburant, visant une réduction significative des émissions polluantes des véhicules urbains.
- Le Programme Top-Industrie a été mis en place dans le but d'améliorer la compétitivité des entreprises en réduisant les coûts de production grâce à une gestion efficace de l'énergie. En effet, en optimisant la consommation d'énergie et en identifiant les sources de gaspillage, les entreprises participantes peuvent non

seulement réduire leurs dépenses, mais aussi renforcer leur position sur le marché en proposant des produits plus compétitifs.

- Le programme Alsol vise à mettre en place les conditions nécessaires pour développer un marché durable de l'énergie solaire thermique en Algérie. Ce programme facilite la collaboration entre l'APRUE et le FNME pour mettre en place les conditions nécessaires à l'adoption de cette technologie.
- L'initiative Eco-Bât : Ce projet ambitieux vise la construction de 600 logements écologiques et énergétiquement performants à travers diverses régions du pays. L'objectif principal est d'améliorer le confort thermique des habitations tout en réduisant la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation, avec une réduction cible de près de 40 %.

Les logements sont stratégiquement situés dans 11 wilayas, choisies pour représenter une variété de zones climatiques, garantissant ainsi une adaptation optimale aux conditions locales. Cette distribution vise à assurer le confort des résidents tout au long de l'année, indépendamment des variations climatiques.

Le programme offre un soutien exhaustif aux gestionnaires de projets, comprenant un accompagnement technique personnalisé et un appui financier conséquent. Cette aide peut couvrir jusqu'à 80 % des coûts supplémentaires pour l'achat d'équipements énergétiquement efficaces, grâce au financement du Fonds National pour la Maîtrise de l'Énergie.

- Le projet d'isolation thermique visant à rénover 1500 bâtiments existants a pour objectif d'améliorer l'efficacité énergétique dans les secteurs résidentiel et tertiaire, couvrant des lieux tels que les hôtels, les écoles et les établissements de santé. En renforçant l'isolation des structures existantes, ce projet cherche à réduire la consommation d'énergie ainsi que les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à une gestion plus durable des ressources énergétiques et à la lutte contre le changement climatique.

Ce programme, initié entre 2011 et 2013, ambitionne de diminuer la consommation énergétique annuelle de ces bâtiments de 20 à 40 %. La Fédération Nationale des Mines et de l'Énergie (FNME) finance ce projet, en prenant en charge les coûts nécessaires à sa mise en œuvre. Les travaux de rénovation se concentrent principalement sur deux aspects essentiels : le remplacement des fenêtres à simple vitrage par des fenêtres à double vitrage pour améliorer l'isolation, et l'ajout d'une

couche d'isolation thermique sur les toits afin de réduire les pertes de chaleur, augmentant ainsi l'efficacité énergétique globale des bâtiments.

8.3 Les techniques de construction en Algérie

En Algérie, le secteur de la construction se distingue par une adoption généralisée de méthodes standardisées qui visent à accélérer et à simplifier les processus de construction. Les fondations typiques de ces bâtiments reposent sur une structure en béton armé. Cette structure inclut des poteaux et des poutres remplis de briques creuses en terre cuite, éléments clés pour assurer la stabilité et la durabilité des édifices. Les fondations sont souvent constituées de semelles isolées situées sous les poteaux, tandis que les planchers sont composés de poutrelles en béton armé, de hourdis préfabriqués en ciment ou en terre cuite, et d'une couche de béton armé pour assurer une robustesse optimale.

Bien que l'uniformité des matériaux soit une caractéristique marquante à l'échelle nationale, certaines grandes entreprises de construction adoptent des techniques légèrement variées. Par exemple, elles peuvent utiliser des ossatures en béton armé pour les murs porteurs et des planchers massifs d'une épaisseur de 15 cm pour répondre à des exigences spécifiques de stabilité et de sécurité. Cependant, un problème récurrent est l'isolation thermique, souvent négligée dans les projets de construction en Algérie, indépendamment du type de bâtiment. Cette négligence a des implications importantes pour l'efficacité énergétique et le confort des occupants (**Rahmouni, 2020**).

8.4 Les enjeux énergétiques associés à la construction des bâtiments

Les principaux défis pour améliorer l'efficacité énergétique se situent dans les domaines politique, économique et technologique. Le soutien politique au niveau national est souvent insuffisant, et il existe un manque de capacités pour soutenir les initiatives d'efficacité énergétique. Selon Rahmouni (**Rahmouni, 2020**), la gestion énergétique des bâtiments présente plusieurs lacunes. Un déficit en ressources techniques et en équipements empêche l'optimisation de l'efficacité énergétique, notamment dans l'adoption de technologies comme les ampoules à faible consommation et les fenêtres à double vitrage, qui peuvent réduire la consommation d'énergie de 30 % par rapport aux fenêtres à simple vitrage.

Les techniques architecturales actuelles ne sont pas toujours adaptées pour gérer efficacement la consommation énergétique et réduire l'empreinte des énergies fossiles. Des éléments tels que le choix de l'emplacement, l'orientation, la taille et la disposition des surfaces vitrées, ainsi que la sélection des matériaux et la composition des murs, sont essentiels pour améliorer

l'efficacité énergétique. De plus, le manque d'initiatives pour promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables et durables représente un obstacle important.

Les réglementations thermiques dans les pays en développement sont souvent basées sur celles d'autres nations, ce qui peut ne pas être adapté à leur contexte spécifique. En Algérie, par exemple, les réglementations thermiques sont largement basées sur l'ancienne réglementation française. Les fournisseurs d'équipements et de matériaux de construction locaux ne sont pas toujours en mesure de proposer des solutions énergétiques adaptées, telles que des matériaux isolants efficaces et des appareils électroménagers performants.

Enfin, le secteur de la construction souffre d'une pénurie de main-d'œuvre qualifiée pour mettre en œuvre des solutions techniques conformes aux normes, ce qui peut compromettre les performances thermiques prévues, notamment en raison des ponts thermiques laissés par les maçons durant la construction.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la transition vers une stratégie de construction éco-responsable, axée sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment. Cette initiative mondiale a pour but de diminuer drastiquement les émissions de gaz polluants d'ici 2050 afin d'atteindre la neutralité carbone. Cette démarche requiert l'implémentation de technologies innovantes et de pratiques écologiques, telles que l'utilisation de matériaux durables, les sources d'énergie renouvelables, et l'optimisation de la performance énergétique des édifices. Ces actions permettent non seulement de réduire l'empreinte carbone des constructions, mais aussi de garantir un cadre de vie sain et agréable pour les occupants.

En Algérie, bien que les politiques énergétiques et environnementales intègrent ces principes, leur application dans le secteur de la construction reste encore limitée. Pour adopter une stratégie à faible empreinte carbone et atteindre les objectifs fixés, il est essentiel d'évaluer de manière détaillée et quantitative les impacts environnementaux des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie. Cela inclut les phases d'extraction des matières premières, de construction, d'exploitation et enfin de démolition.

C'est dans ce contexte que l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) prend toute son importance. Le chapitre suivant traitera de cette méthode d'évaluation environnementale.

**CHAPITRE III : ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) : UNE METHODE
CRUCIALE POUR EVALUER L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
BATIMENTS.**

Introduction

Le secteur du bâtiment est responsable d'une part significative des émissions globales de gaz à effet de serre, représentant environ 39 % des émissions annuelles de CO₂ (**Santos-Herrero et al., 2021**). Cette contribution majeure au réchauffement climatique résulte principalement de la forte demande en énergie et des émissions de carbone associées, surtout dans les pays développés où l'usage intensif de la climatisation, du chauffage et de matériaux de construction peu écologiques est répandu (**Ahmed et al., 2021**). Pour concevoir des bâtiments avec une faible empreinte carbone, il est crucial de prendre en compte ces facteurs afin de réduire l'impact environnemental.

La méthode présentée dans ce chapitre sert d'outil précieux pour faciliter la prise de décision en offrant une évaluation approfondie des impacts environnementaux. Cela permet aux professionnels du bâtiment de faire des choix éclairés qui sont en adéquation avec leurs objectifs écologiques.

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), à l'origine conçue pour le secteur industriel, vise à évaluer quantitativement les impacts environnementaux associés à un produit, un système ou un service durant l'intégralité de son existence, de la fabrication jusqu'à sa fin de vie (**Dakhia, 2019**). Son application au domaine du bâtiment, à travers des études comme celle de Bekker (**Bekker, 1982**), a permis de mieux comprendre les impacts environnementaux des constructions.

Ce chapitre est divisé en deux sections : la première aborde l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) des produits, et la seconde examine son application dans le domaine du bâtiment.

Section I : L'Analyse de Cycle de Vie

1. Présentation de l'Analyse de Cycle de Vie

L'idée de "cycle de vie" a émergé dans le secteur industriel, intégrant le concept "du berceau à la tombe" (**Kaoula, 2017**).

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode environnementale normalisée qui adhère aux normes ISO 14040 et 14044 (**ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006**). Cette méthode évalue les impacts environnementaux d'un produit, qu'il soit matériel, systémique ou procédural, durant toute sa durée de vie, depuis l'extraction des matières premières, en passant par la production, la distribution, l'utilisation, jusqu'à son élimination finale (fig. 24).

L'objectif central de l'ACV est de repérer les principales sources d'impact environnemental pour les réduire ou les éliminer autant que possible, tout en évitant de déplacer la pollution d'une étape à une autre. Cette approche holistique permet d'anticiper les effets négatifs potentiels sur l'environnement à chaque phase du cycle de vie d'un produit (Dakhia, 2019).



Fig. 24 : Le cycle de vie d'un produit (Dakhia, 2019).

Cette procédure permet d'évaluer l'impact environnemental potentiel d'un objet pour identifier les aspects à améliorer, favorisant ainsi le développement de nouveaux produits (Karatas, 2019).

2. Historique de l'Analyse de Cycle de Vie

En 1969, Coca-Cola a financé une étude novatrice qui a introduit pour la première fois le concept de cycle de vie. Cette recherche visait à comparer l'empreinte écologique, notamment en termes de consommation de ressources et de production de déchets, entre deux types de contenants pour boissons. Aux États-Unis, cette méthode était connue sous le nom d'Analyse des Ressources et du Profil Environnemental (ARPE), tandis qu'en Europe, elle était appelée Ecobilan. Cette initiative a jeté les bases de l'actuelle Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Le développement de cette méthode peut être segmenté en trois phases historiques, illustrées dans la figure 25. Dans les années 1970, l'approche du cycle de vie a été élargie pour inclure des considérations énergétiques, sous l'influence des travaux du Club de Rome sur les limites

des ressources et la crise énergétique. En 1984, la méthode des volumes critiques a été introduite, devenant l'une des premières techniques à caractériser les impacts environnementaux des emballages. Cette avancée a permis d'évaluer les matériaux d'emballage non seulement en termes d'épuisement des ressources énergétiques, mais aussi en prenant en compte d'autres impacts environnementaux (Dakhia, 2019).

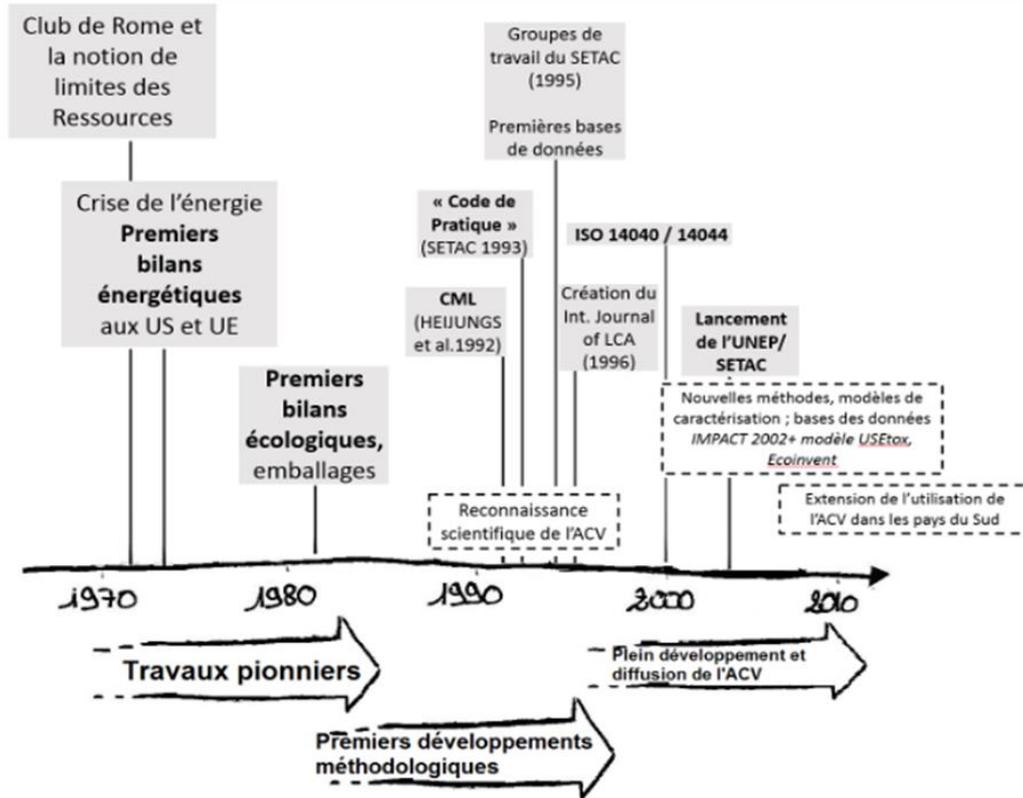


Fig. 25 : Historique et évolution de l'ACV (Le Pôle Eco-conception, 2023).

Aujourd'hui, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est largement reconnue comme l'outil d'évaluation environnementale le plus utilisé à l'échelle mondiale. Son développement et sa standardisation ont impliqué diverses organisations internationales (Joliet et al., 2010).

La décennie de 2000 à 2010 a été cruciale pour le développement de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). En 2002, une initiative majeure pour le Cycle de Vie a été lancée par le SETAC et le PNUE. Au cours de cette période, de nombreuses avancées notables ont été accomplies. Parmi celles-ci, on peut citer la création de la base de données d'inventaire "Ecoinvent", la publication de la seconde version de CML (CML V2) en 2000, et le développement de la méthode "IMPACT 2002+" en 2003. En 2009, l'influence de l'ACV s'est également étendue aux pays du Sud avec l'organisation d'une conférence dédiée à la gestion du cycle de vie en Afrique du Sud.

3. Cadre méthodologique de l'analyse de cycle de vie

La norme ISO 14040 définit l'ACV comme : « *la compilation et l'évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits tout au long du cycle de vie* » (Allacker, 2010). Cette norme définit quatre étapes pour cette méthode (fig. 26), qui seront expliquées en détail dans les sections suivantes :

- 1ere phase : définition des objectifs et du champ de l'étude.
- 2eme phase : inventaire du cycle de vie.
- 3eme phase : évaluation des impacts.
- 4eme phase : interprétation des résultats.



Fig. 26 : Cadre méthodologique de l'ACV (ISO 14040, 2006).

3.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude

Une définition précise du problème est cruciale, incluant le système de produits étudié, sa fonction et son unité fonctionnelle, ainsi que la méthodologie utilisée, tout en délimitant les frontières du système pour intégrer les processus clés (ISO 14044, 2006; Jolliet et al., 2010; Karatas, 2019).

Les objectifs de la recherche doivent être clairement définis, qu'ils visent à améliorer un produit ou à répondre à des enjeux sociétaux, économiques ou politiques. Une définition précise des objectifs permet d'établir les hypothèses fondamentales, de choisir une méthodologie appropriée et de délimiter les contraintes de l'approche. Cela aide également à déterminer le niveau de précision requis pour l'application de la méthode, ajusté selon le public visé (Buyle et al., 2013; Karatas, 2019).

3.2 Inventaire du cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie, selon les standards de l'ISO 14040, consiste à compiler et à quantifier les flux de matières et d'énergie qui entrent et sortent d'un système de produits durant l'ensemble de son cycle de vie, y compris les matériaux utilisés et les émissions produites dans l'environnement (ISO 14040, 2006).

Selon Buyle et ses collègues (Buyle et al., 2013), étant donné que la variabilité et les erreurs des données peuvent provenir de diverses sources, il est essentiel de disposer de données fiables et disponibles à cette étape de l'étude.

La collecte de données est une tâche ardue et complexe. Pour faciliter cette tâche, plusieurs bases de données ont été créées, avec Ecoinvent se distinguant comme l'une des plus renommées. Il est fortement recommandé d'adopter des normes harmonisées pour la collecte de données, comme le standard européen EN 15978:2011, car la diversité des résultats de l'ACV peut influencer significativement l'évaluation des impacts (Karatas, 2019).

3.3 Evaluation de l'impact de cycle de vie

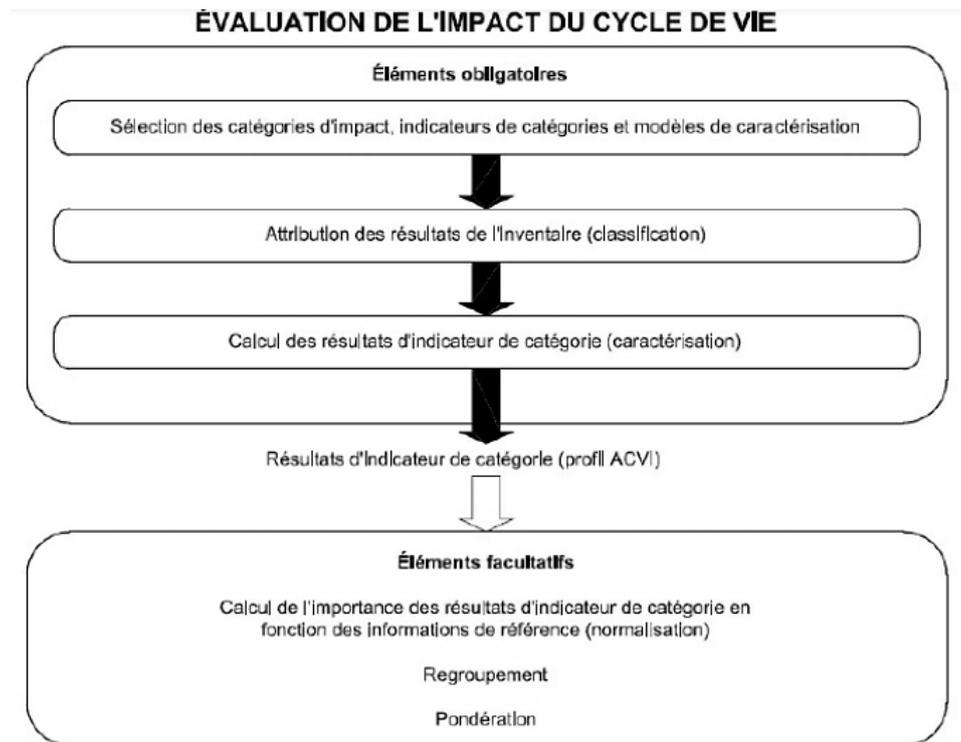


Fig. 27 : Les étapes d'évaluation de l'impact de cycle de vie (Dewandre, 2017).

Cette étape est étroitement liée aux phases précédentes, car elle repose sur les résultats de l'inventaire, qui doivent être interprétés de manière synthétique et explicite en termes

d'impacts environnementaux (**Kaoula, 2017**). Selon Buyle (**Buyle et al., 2013**), cette phase comprend trois étapes essentielles illustrés dans la figure 27.

Des procédures complémentaires, telles que la normalisation et la pondération, peuvent être mises en œuvre. La normalisation facilite la comparaison des impacts d'un système au sein d'une catégorie d'impact spécifique en contextualisant les résultats par rapport aux références ou normes établies. La pondération consiste à attribuer des poids variables aux différentes catégories d'impact, en fonction de l'importance relative de leurs conséquences. Pendant la phase de caractérisation, les émissions de chaque catégorie d'impact sont pondérées selon ces coefficients, ce qui permet d'obtenir une évaluation plus précise et équilibrée des impacts environnementaux (**Karatas, 2019**).

3.4 Interprétation des résultats

La phase d'interprétation du cycle de vie constitue l'ultime étape de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Cette phase cruciale implique une analyse minutieuse des données collectées lors de l'inventaire et des évaluations d'impact, en les alignant avec les objectifs stratégiques et le cadre d'étude prédéfini. L'objectif fondamental est de synthétiser les résultats, de détecter les points cohérents ainsi que les incohérences, et de formuler des conclusions claires et pertinentes. Cette analyse approfondie permet de mettre en lumière les limites inhérentes à l'étude et de proposer des recommandations pragmatiques pour guider les prises de décision dans le contexte spécifique de l'analyse (**Reiter, 2010**). En intégrant ces recommandations, les décideurs peuvent mieux comprendre les implications environnementales et économiques des choix stratégiques, assurant ainsi une gestion plus durable et efficiente.

4. Principaux domaines d'application de l'ACV

Selon De Caemel & Ooms (**De Caemel & Ooms, 2005**), l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est utilisée dans plusieurs domaines cruciaux. Le premier domaine traite de l'évaluation des impacts environnementaux des politiques et des choix stratégiques, ce qui permet de mieux saisir leurs conséquences et de gérer les modifications en comparaison à l'état initial. Le second domaine se focalise sur la comparaison des produits, nécessitant une définition claire de l'unité fonctionnelle pour sélectionner la solution optimale, identifier les lacunes et établir des normes d'écoconception ou des écolabels. Le troisième domaine, quant à lui, vise à améliorer les performances environnementales en mettant l'accent sur l'écoconception des bâtiments et l'adaptation de produits existants afin de les rendre plus respectueux de l'environnement.

5. Normalisation de l'approche analyse de cycle de vie ACV

Dans les années 1990, la normalisation de l'évaluation du cycle de vie (ACV) des produits a commencé, en réponse à une demande croissante pour une harmonisation mondiale des approches, notamment grâce aux avancées conceptuelles de la Société de Toxicologie et de Chimie Environnementales (SETAC).

L'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) a dirigé cette initiative dans le secteur technologique, aboutissant à la publication des normes ISO pour l'ACV entre 2000 et 2002 (ISO 14040 à ISO 14044) (Dakhia, 2019), mentionnés dans le tableau 11.

Tab. 11 : les normes ISO relatives à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et leurs descriptions respectives.

Norme ISO	Description
ISO 14040	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadres.
ISO 14041	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse.
ISO 14042	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Évaluation de l'impact du cycle de vie.
ISO 14043	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Interprétation du cycle de vie.
ISO 14044	Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices.
Directives	Les directives pour la mise en œuvre des ACV sont établies par une première norme ISO 14040.
Normes Complémentaires	Les normes complémentaires (ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043) fournissent des informations détaillées sur les différentes étapes d'inventaire et d'évaluation de l'impact de l'interprétation.

6. Outils d'évaluations et de réalisation d'ACV produits

Divers outils numériques sont disponibles pour évaluer et appliquer l'analyse du cycle de vie (ACV) des produits. Parmi ceux-ci :

1. **SimaPro** : Développé par Pré-Consultant aux Pays-Bas, cet outil scientifique pour l'ACV comprend une bibliothèque contenant plus de 7 000 modules de matériaux et de processus, ainsi que des données sectorielles, notamment pour le secteur électrique-électronique (Dakhia, 2019).

2. **GaBi** : Développé par Sphera, ce logiciel se distingue par ses capacités avancées en matière de modélisation et de génération de rapports pour l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). GaBi est réputé pour offrir plus de 20 bases de données spécifiques à différents secteurs, fournissant des informations environnementales précises et fiables. Ces données permettent une compréhension approfondie des impacts à chaque étape du cycle de vie des produits (**Sphera, 2024**).
3. **OpenLCA** : En tant que premier logiciel open source pour l'ACV, OpenLCA se distingue des outils commerciaux comme SimaPro et GaBi grâce à ses caractéristiques uniques et son accessibilité (**openLCA, 2024**).

7. Des bases de données d'ACV de produit

Les bases de données (BDD) sont des systèmes structurés permettant de collecter, gérer et mettre à jour efficacement des informations au sein d'un cadre de gestion de données. Leur qualité est cruciale pour évaluer les impacts environnementaux des activités sur l'ensemble du cycle de vie des produits ou services via l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), facilitant ainsi la prise de décisions industrielles. Les données, souvent présentées sous forme de tableaux, sont facilement manipulables grâce à des outils informatiques. Elles jouent un rôle vital dans la communication de l'empreinte environnementale des produits, notamment à travers les Déclarations Environnementales de Produit (EPD) (**Dakhia, 2019**).

Parmi les bases de données couramment utilisées pour l'ACV, on trouve :

- **ECOINVENT** :

Cette base de données est largement utilisée, avec plus de 2500 utilisateurs dans plus de 40 pays, faisant d'elle un leader mondial en matière de données d'analyse du cycle de vie. Elle est employée pour l'ACV, les EPD, les bilans d'émissions de CO₂ et d'autres applications. Les données sont disponibles aux formats XML ou Excel (**ESU-services, 2023**).

- **La base INIES** :

Depuis 2004, INIES est reconnue en France comme la principale source d'informations sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction. Elle met à disposition des Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES) conformes à la norme NF P01-010. Cette base de données contient plus de 500 FDES, fournies par des fabricants et des syndicats professionnels. La gestion de la base est supervisée par un conseil

de surveillance et un comité technique, sous la présidence de l'Alliance HQE-GBC (**Vizcab, 2017**).

- **DEAMtm :**

Le logiciel TEAMTM inclut la base de données DEAMTM Starter, avec plus de 300 modules pour modéliser différents systèmes (**Dakhia, 2019**).

8. Limites de la méthode d'analyse du cycle de vie de produit

Bien que l'analyse du cycle de vie (ACV) offre une approche multicritère englobant l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un système, elle présente certaines limitations qui nécessitent d'être clarifiées. Selon Kaoula (**Kaoula, 2017**), la principale contrainte réside dans la tendance à généraliser l'interprétation des résultats, car chaque modèle est unique et les résultats en dépendent. Les décisions et hypothèses prises au début influencent directement les résultats, qui ne sont pertinents que dans le cadre de l'étude initiale. Il est important de différencier la fiabilité, liée à la précision du traitement, de la validité, limitée au contexte défini par les hypothèses initiales.

Les contraintes inhérentes à l'utilisation des indicateurs sont déterminées par les hypothèses de départ. Par ailleurs, toute mise à jour ou modification des bases de données peut altérer l'interprétation des résultats obtenus. Malgré ces défis, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) reste une méthode largement reconnue et normalisée, offrant une évaluation crédible et fiable des impacts environnementaux.

Section II : L'Analyse de Cycle de Vie des bâtiments

1. Analyse de Cycle de Vie des bâtiments

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) a été initialement développée pour évaluer les processus et produits industriels, mais son application s'est ensuite étendue au domaine de la construction (**Chevalier, 2009**). Son utilisation dans le secteur du bâtiment a commencé au début des années 1980, avec la recherche de Bekker (**Bekker, 1982**), qui mettait l'accent sur l'utilisation des ressources renouvelables. Par la suite, de nombreuses études ont été réalisées dans ce domaine (**Adalberth, 1997; Blengini, 2009; Bonamente et al., 2018; Cabeza et al., 2014; Dakhia, 2019; Kaoula & Bouchair, 2018, 2020; Nematchoua et al., 2022; Peuportier & Boonstra, 1997; Stephan et al., 2013**).

L'application de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans le secteur de la construction nécessite une approche rigoureuse en raison des particularités uniques de chaque bâtiment et de leurs interactions spécifiques avec l'environnement et les utilisateurs (**Lasvaux, 2010**). Elle est particulièrement utile pour comparer deux systèmes, évaluer les impacts des différentes phases d'un même système, ou examiner un système par rapport à ses alternatives (**Reiter, 2010**).

Il est crucial d'évaluer l'empreinte environnementale d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie, comme l'a souligné Sevin (**Sevin, 2018**). Cet impact ne doit pas être considéré comme une simple addition des impacts de ses composants. Divers éléments interagissent, comme le rayonnement solaire à travers les vitrages, absorbé par l'enveloppe du bâtiment ou la dalle de plancher, influençant ainsi la demande de chauffage. À l'échelle d'un bâtiment, l'ACV doit non seulement évaluer les consommations d'énergie et d'eau, mais aussi examiner les interactions entre ces éléments, ce qui représente un véritable défi (**Reiter, 2010**).

1.1 Le bâtiment : typologie et composition

L'analyse du cycle de vie (ACV) des bâtiments vise à évaluer et à minimiser l'impact environnemental des projets de construction en explorant différentes variantes et alternatives (**Dakhia, 2019**). Cette méthode se divise en plusieurs phases principales (**Popovici, 2005**), illustrées dans la figure 28.

- **La phase de production** : Cette phase consiste à établir les limites du système par rapport à l'environnement pour inclure divers processus fournissant des intrants en matière et en énergie (**Sevin, 2018**).
- **La phase de construction** : Cette phase débute après l'approbation finale de la conception du projet. Elle comprend l'acheminement des matériaux du site de production au chantier, l'utilisation de ces matériaux pour la construction, la mobilisation de la main-d'œuvre et des équipements nécessaires à l'édification des structures, ainsi que l'installation des systèmes électriques, de plomberie, de chauffage, et autres infrastructures essentielles.
- **La phase d'utilisation** : La phase d'utilisation correspond à la période pendant laquelle le bâtiment est effectivement utilisé à des fins initialement prévues. Elle englobe la consommation d'eau et d'énergie, les activités d'entretien et d'autres aspects liés à l'utilisation du bâtiment.

- **Rénovation** : Au fil du temps, des travaux de rénovation peuvent être nécessaires pour mettre à jour les équipements ou adapter le bâtiment aux besoins changeants de ses occupants. Cela peut impliquer des modifications significatives, telles que l'ajout de nouveaux espaces ou la réorganisation des espaces existants.
- **Fin de vie** : À l'issue de son cycle de vie, le bâtiment est démantelé. Les matériaux recyclables, sont récupérés et revalorisés pour de futures utilisations. Ce processus permet de réduire l'impact environnemental en réutilisant des ressources existantes.

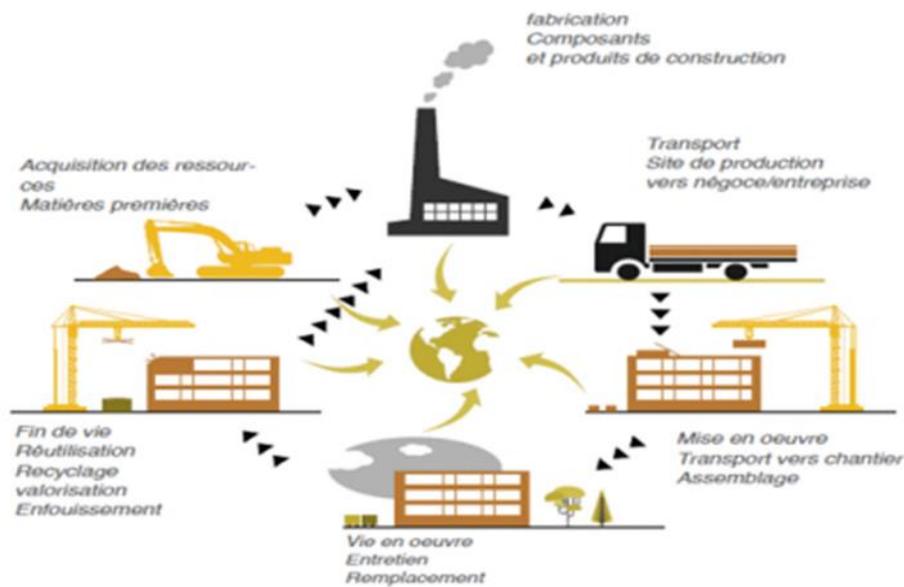


Fig. 28 : Le Cycle de vie d'un bâtiment (Dakhia, 2019).

2. Méthodologie d'analyse de cycle de vie ACV des bâtiments

Les bâtiments, étant des structures hautement complexes, présentent divers phénomènes physiques et comportementaux. Pour une conception respectueuse de l'environnement, il est impératif d'identifier les sources principales d'impacts environnementaux et de proposer des mesures d'atténuation. L'évaluation environnementale des bâtiments, par le biais de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), est généralement effectuée de manière statique (Dakhia, 2019). Cette démarche commence par la définition des objectifs et du cadre de l'étude, ainsi que par la spécification du système à analyser. Il est essentiel de recueillir des informations précises concernant les matériaux, la construction, l'utilisation, la rénovation et la fin de vie d'un bâtiment. Ces données permettent de créer des modèles d'inventaire détaillés pour chaque phase du cycle de vie du bâtiment.

Les indicateurs environnementaux sont ensuite utilisés pour évaluer les impacts potentiels sur les ressources naturelles, l'énergie et les émissions. Les résultats obtenus identifient les

sources d'impact principales et permettent de formuler des recommandations pour orienter les choix de construction vers des pratiques plus durables. Soutenue par une évaluation critique, l'ACV est un outil exhaustif qui guide les décisions éclairées concernant la conception et la gestion des bâtiments.

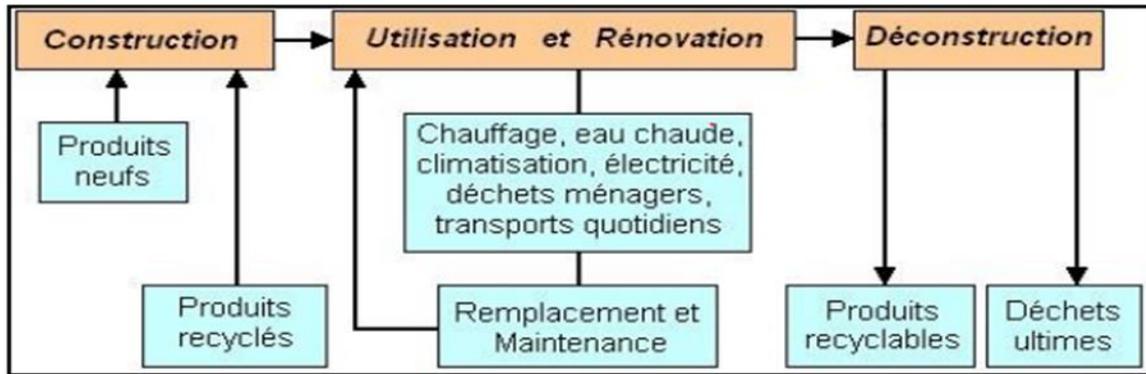


Fig. 29 : Principe de l'Analyse de Cycle de Vie d'un bâtiment (Thiers, 2008).

2.1 Modélisation d'un bâtiment

La fonction du système analysé par le modèle sera déterminée par la définition que l'utilisateur lui attribuera. Toutefois, afin de pouvoir comparer deux variantes (ou davantage), il est essentiel de garantir des fonctions similaires. Par conséquent, les critères définissant l'unité fonctionnelle d'un bâtiment sont multiples (Dakhia, 2019) exposés dans le tableau suivant (tab.12).

Tab. 12 : les critères définissant l'unité fonctionnelle d'un bâtiment.

Aspect	Description
Quantité	Se réfère au nombre d'occupants ou d'utilisateurs présents.
Fonction	Le type de bâtiment (logement, bâtiment tertiaire, etc.).
Qualité de fonctionnement	Niveau de confort : luminosité intérieure suffisante, consignes de températures, ventilation, etc.
Temps	La durée de vie estimée, généralement 80 ans pour un bâtiment neuf.

Les frontières du système sont également déterminées par l'utilisateur en fonction du type d'étude et de ses objectifs. Le bâtiment possède deux types de frontières (Popovici, 2005) schématisées dans la figure ci-dessous (fig.30) :

- La première frontière « **physique** » : englobe l'ensemble des éléments matériels du système, tels que l'enveloppe du bâtiment et les espaces intérieurs.

- Une frontière élargie des « flux » englobe les processus en amont et en aval tels que la fabrication et le transport des matériaux, la production d'énergie, le traitement des déchets, etc.

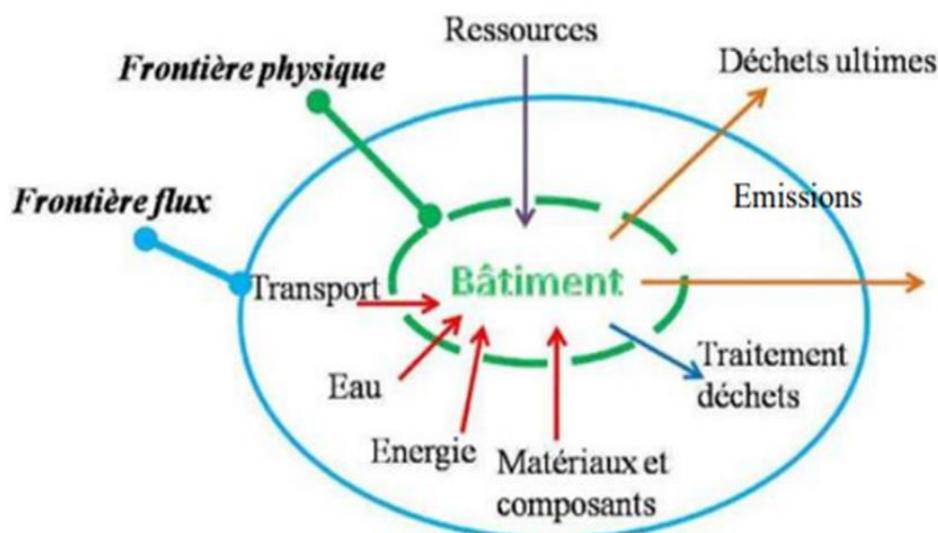


Fig. 30 : Types de frontières du bâtiment (Peuportier, 2008).

Pour garantir une analyse précise, il est crucial d'inclure les infrastructures liées à la fabrication des composants du bâtiment, à la production d'énergie, à l'approvisionnement en eau, et au transport des matériaux dans les calculs des inventaires et des impacts. Cette délimitation permet au système d'interagir avec son environnement externe par des flux essentiels : ressources entrantes et émissions sortantes (liquides, gazeuses, solides) (Dakhia, 2019).

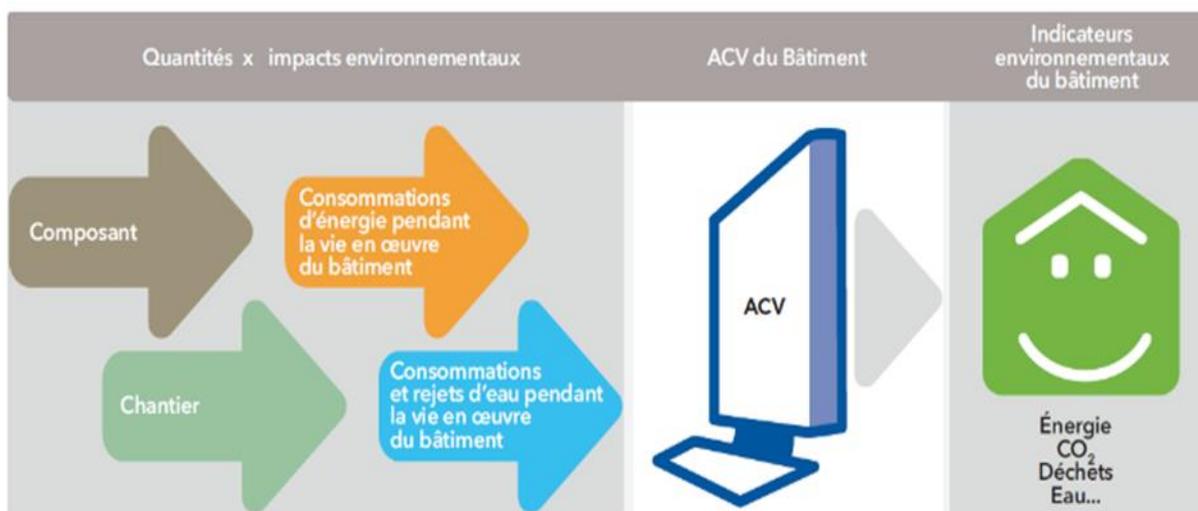


Fig. 31 : La modélisation d'une ACV bâtiment (Inies, 2024).

Pour une évaluation complète, il est indispensable d'inclure les comportements des occupants du bâtiment, tels que la gestion des déchets, le recyclage, ainsi que la consommation d'eau et

d'énergie. Par ailleurs, les caractéristiques du site d'implantation doivent être prises en compte. La modélisation du cycle de vie doit s'étendre sur toute la durée de vie estimée du bâtiment, typiquement 80 ans, avec une évaluation effectuée annuellement (**Trocme, 2009**).

2.2 Indicateurs environnementaux considérés pour le bâtiment

Selon le Petit Robert, un indicateur est une variable destinée à mesurer ou évaluer un état ou une évolution. Mandallena (**Mandallena, 2006**) souligne que l'étymologie du mot "indicateur" correspond parfaitement à sa définition et à ses objectifs dans le domaine des indicateurs environnementaux. En Analyse du Cycle de Vie (ACV), 12 indicateurs d'impact sont évalués tout au long du cycle de vie d'un bâtiment (fig. 32).

N°	Indicateur Environnemental	Unité
1	Demande cumulative d'énergie	GJ
2	Eau utilisée	m ³
3	Epuisement des ressources abiotiques	kg antimoine
4	Déchets produits	t
5	Déchets radioactifs	dm ³
6	Effet de serre (a00 ans)	t CO ₂ eq.
7	Acidification	kg SO ₂ eq.
8	Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq
9	Domage à la qualité des écosystèmes dus à l'écotoxicité	PDF*m ²
10	Domage à la santé	DALY
11	Production d'ozone photochimique	kg C ₂ H ₄ eq
12	Odeur	m ³ air

Fig. 32 : Tableau des 12 indicateurs environnementaux évalués (**Thiers & Peuportier, 2012**).

3. Les outils d'évaluations des bâtiments

À l'échelle internationale, environ quinze outils ont été spécifiquement conçus pour réaliser l'ACV des bâtiments. Les revues bibliographiques récentes fournissent un état de l'art détaillé concernant ces instruments (**Peuportier, 2008**).

3.1 Les outils d'analyse de cycle de vie ACV de bâtiments

Les logiciels utilisés pour l'ACV des bâtiments incluent Equer (nova-Equer), Elodie, Invest, Legep, Eco-Quantum, Team Bâtiment, Impact Estimator, Bees, Ecoeffect, Ecosoft, et Greencalc+ (fig.34). Voici deux exemples détaillés.

Elodie : Elodie est un outil d'aide à la décision lancé en 2008 par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) en France. Le projet est divisé en îlots et zones pour réaliser une Analyse du Cycle de Vie (ACV) avec Elodie. Chaque bâtiment doit inclure six

contributeurs représentant différentes sources d'impacts environnementaux tout au long de son cycle de vie (Dakhia, 2019) (tab.13).

Tab. 13 : contributeurs représentant différentes sources d'impacts.

Contributeur	Description
Composant	Matériaux utilisés et renouvelés pendant la durée de vie du bâtiment.
Énergie	Consommation et renouvellement des matériaux énergétiques.
Eau	Consommation et rejets d'eau durant l'utilisation du bâtiment.
Déplacement	Modes de transport utilisés par les usagers.
Chantier	Impacts des activités de construction.
Déchets	Production de déchets durant la phase d'utilisation.

Indicateur	Unité	Remarque
Changement climatique	[kg équivalent dioxyde de carbone CO ₂]	Potentiel de réchauffement des gaz à effet de serre sur une période de 100 ans.
Acidification atmosphérique	[kg équivalent de dioxyde de soufre SO ₂]	Contribution aux pluies acides et au dépérissement des forêts
Formation d'ozone photochimique	[kg équivalent d'éthylène C ₂ H ₄]	Formation d'ozone dans les basses couches de l'atmosphère liée à la décomposition de composés organiques volatiles
Consommation de ressources énergétiques – énergie primaire totale	[kWh]	Concerne la quantité d'énergie primaire consommée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.
Consommation de ressources énergétiques – énergie non renouvelable	[kWh]	Ne concerne que la part d'énergie primaire consommée pour le cycle de vie du bâtiment qui est issue d'énergie non renouvelable.
Consommation d'eau	[L]	Eau consommée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.
Déchets dangereux éliminés	[kg]	Quantité de déchets dangereux produits sur le cycle de vie du bâtiment.
Déchets non dangereux	[kg]	Quantité de déchets non dangereux produits sur le cycle de vie du bâtiment.
Déchets radioactifs éliminés	[kg]	Quantité de déchets radioactifs produits sur le cycle de vie du bâtiment.

Fig. 33 :Indicateurs environnementaux d'Elodie et ses unités (Pannier, 2014).

Les données des matériaux doivent être saisies manuellement dans le module composant d'Elodie, chaque matériau recevant une FDES. Suite à une simulation thermique dynamique (STD) du bâtiment réalisé avec un autre logiciel, les données pertinentes sont entrées manuellement dans le module énergie. Les FDES fournissent 17 indicateurs d'impact environnemental, mais seuls 9 d'entre eux sont compatibles avec tous les modules d'Elodie (fig.33) (Dakhia, 2019).

Chapitre III

Logiciels disponibles pour l'ACV des bâtiments	Organisme responsable	Pays	Relié à la base de données ACV	Illustration / Site internet
BEES	National Institute for Standards and Technology	Etats-Unis	BEES Industry data	 www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm/
Eco-bat	HEIG-VD Laboratoire de physique du bâtiment	Suisse	Ecoinvent	 www.eco-bat.ch
EcoEffect	KTH / University of Gävle	Suède	?	 www.ecoeffect.se/
ECO-QUANTUM	IVAM	Pays-Bas	MRPI IVAM	 www.ivam.uva.nl/index.php?id=91&L=1
Ecosoft	Institute für Baubiologie and Bauökologie	Autriche	?	 www.ibo.at/en/ecosoft.htm
ENVEST	Building Research Establishment	Royaume-Uni	BRE Profiles	 http://envest2.bre.co.uk/
ELODIE	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)	France	INIES	 www.elodie-cstb.fr
EQUER	IZUBA / Ecole des Mines de Paris	France	Ecoinvent INIES	 www.izuba.fr
GaBi for Building LCA	PE International	Allemagne	GaBi ELCD IBU	 www.gabi-software.com/america/solution/s/building-lca/
GreenCalc+	?	Pays-Bas	?	 www.greencalc.com/
Impact Estimator	Athena Institute	Canada	Athena Database	 http://calculatelca.com/software/impact-estimator/
LEGEP	WEKA GmbH	Allemagne	Ecoinvent Ökobau IBU	 www.legep-software.de/
TEAM Bâtiment	Ecobilan	France	INIES DEAM	 www.teambatiment.com/fr

Fig. 34 : Les logiciels utilisés pour l'ACV des bâtiments à l'échelle mondiale (Lasvaux, 2010).

EQUER (nova-EQUER) :

Cet outil évalue la performance environnementale des constructions, notamment des bâtiments tertiaires comme les écoles primaires. Accessible à tous les acteurs du secteur, il fournit un bilan environnemental détaillé, permettant aux architectes de justifier leurs choix auprès des maîtres d'ouvrage (Dakhia, 2019).

EQUER utilise une approche intégrée en combinant des modules de modélisation énergétique et environnementale. Il calcule les quantités de matériaux nécessaires pour la construction à partir de Pléiades, prenant en compte les besoins en climatisation, chauffage, ECS et génération photovoltaïque. Ces matériaux servent ensuite à quantifier les performances environnementales et à analyser les principaux impacts. EQUER évalue douze indicateurs environnementaux à différentes étapes du cycle de vie (fig.36).

Ces outils démontrent l'importance de la méthodologie ACV dans la prise de décision pour une construction durable et respectueuse de l'environnement.

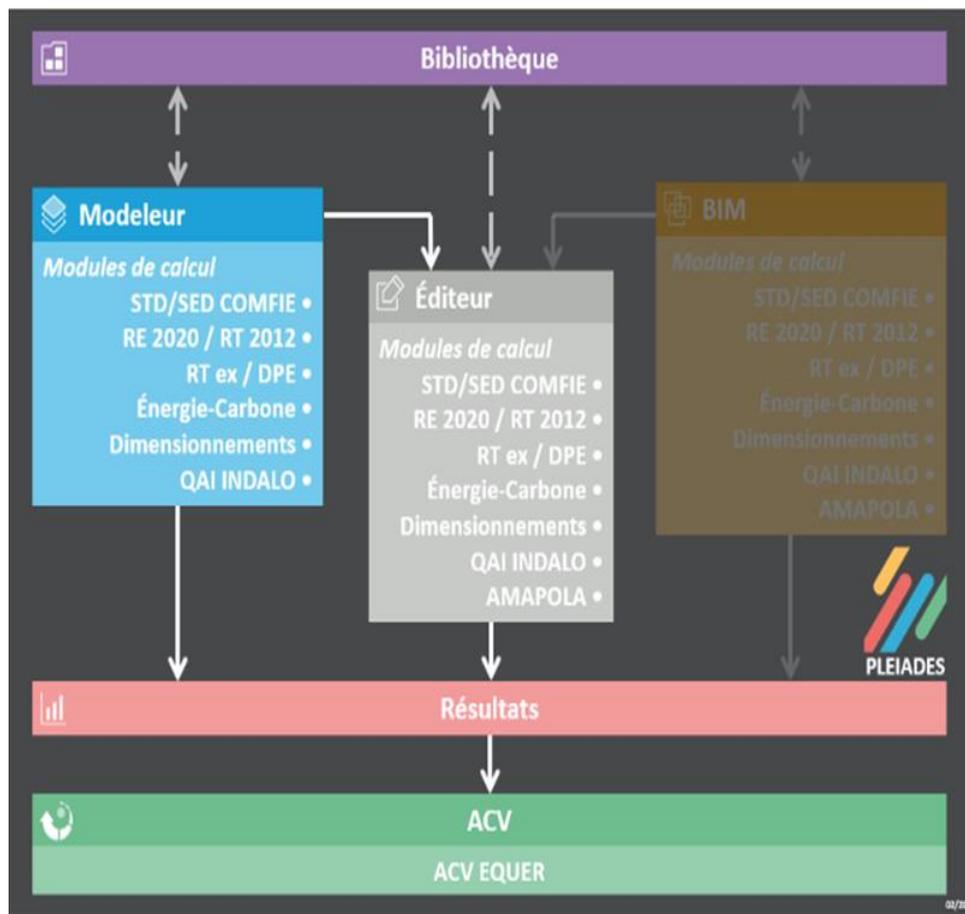


Fig. 35 : Présentation de la structure de pléiades avec ses composants et ses modules (Izuba énergies, 2023).

Indicateur	Unité	Remarque
GWP, Effet de serre	[kg équivalent dioxyde de carbone CO ₂]	Potentiel de réchauffement des gaz à effet de serre sur une période de 100ans.
Acidification	[kg équivalent de dioxyde de soufre SO ₂]	Contribution aux pluies acides et au dépérissement des forêts
Eutrophisation	[kg équivalent de phosphate PO ₄ ³⁻]	Apport de substances jouant le rôle d'engrais dans les eaux de surface
Production d'ozone photochimique	[kg équivalent d'éthylène C ₂ H ₄]	Formation d'ozone dans les couches basses de l'atmosphère lié à la décomposition de composés organiques volatiles
Domage à la biodiversité	[PDF.m ² .an] (Potentially Disappeared Fraction)	Concerne l'atteinte à la biodiversité. Cet indicateur s'exprime en pourcentage d'espèces disparues par m ² et par an.
Odeurs	[m ³ d'air malodorant équivalent à 1kg/m ³ d'ammoniac]	Correspond à un niveau de concentration d'une odeur tel que 50% des individus détectent cette odeur.
Domage à la santé	[DALY] (Disability Adjusted Life Years)	Concerne l'impact sur la santé humaine. Cet indicateur s'exprime en années de vie en bonne santé perdues.
Epuisement des ressources abiotiques	[kg équivalent d'antimoine Sb]	Concerne l'appauvrissement des ressources pouvant devenir insuffisantes dans les 100ans à venir.
Demande cumulative d'énergie	[MJ]	Concerne la quantité d'énergie primaire consommée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.
Consommation d'eau	[m ³ d'eau puisée]	Eau consommée sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.
Déchets	[tonne équivalent de déchets ultimes]	Trois catégories de déchets existent : inertes, dangereux et non dangereux. Un coefficient permet d'adapter la quantité de déchets en fonction de la catégorie.
Déchets radioactifs	[dm ³ de déchets]	Quantité de déchets radioactifs produits sur le cycle de vie du bâtiment.

Fig. 36 : Indicateurs environnementaux d'Equer (Pannier, 2014).

3.2 Caractéristiques des outils d'analyse de cycle de vie ACV des bâtiments

Les outils d'analyse du cycle de vie (ACV) des bâtiments, comme illustré dans la figure 34, ont été développés pour évaluer les impacts environnementaux de l'ensemble du cycle de vie des bâtiments. Bien que chaque outil puisse différer dans sa méthodologie et ses bases de données, ils partagent tous trois caractéristiques principales : les données d'entrée environnementales, les choix méthodologiques spécifiques, et la présentation des résultats pour l'aide à la décision (Lasvaux, 2010) :

- Données d'entrée environnementales (point n°1 sur la figure 37) :
Les données d'entrée sont vitales pour assurer la précision de l'ACV. Elles englobent des informations sur les matériaux, les produits et les procédés utilisés dans la construction des bâtiments.
- Choix méthodologiques spécifiques au logiciel (point n°2 sur la figure 37) :
Les outils d'ACV utilisent différentes approches méthodologiques en fonction de leurs objectifs spécifiques. Certains outils sont conçus pour une évaluation globale, tandis que d'autres se concentrent sur des aspects particuliers. Par exemple, l'outil ATHENA peut utiliser un indice de pollution de l'air, tandis qu'ELODIE peut se concentrer sur la toxicité environnementale. Ces différences méthodologiques signifient que les

résultats de différents outils ne sont pas toujours directement comparables, même pour des catégories d'impact similaires. Cette diversité méthodologique met en évidence la nécessité de normes harmonisées pour l'ACV des bâtiments afin d'assurer une comparaison équitable des performances environnementales.

- Résultats pour l'aide à la décision (point n°3 sur la figure 37) :

Les résultats des outils d'ACV sont présentés sous forme d'indicateurs environnementaux qui aident à la prise de décision. Ces indicateurs peuvent inclure des mesures d'impact sur le changement climatique, la consommation d'énergie, et d'autres critères environnementaux pertinents. La présentation des résultats est essentielle pour une interprétation efficace et une prise de décision éclairée. Par exemple, certains outils comme Invest utilisent un écopoint pour synthétiser divers indicateurs en une seule mesure globale, facilitant ainsi la comparaison et la communication des résultats. D'autres outils, comme EQUER, utilisent des indicateurs normalisés basés sur des équivalents annuels par habitant, ce qui permet une comparaison relative des impacts environnementaux.

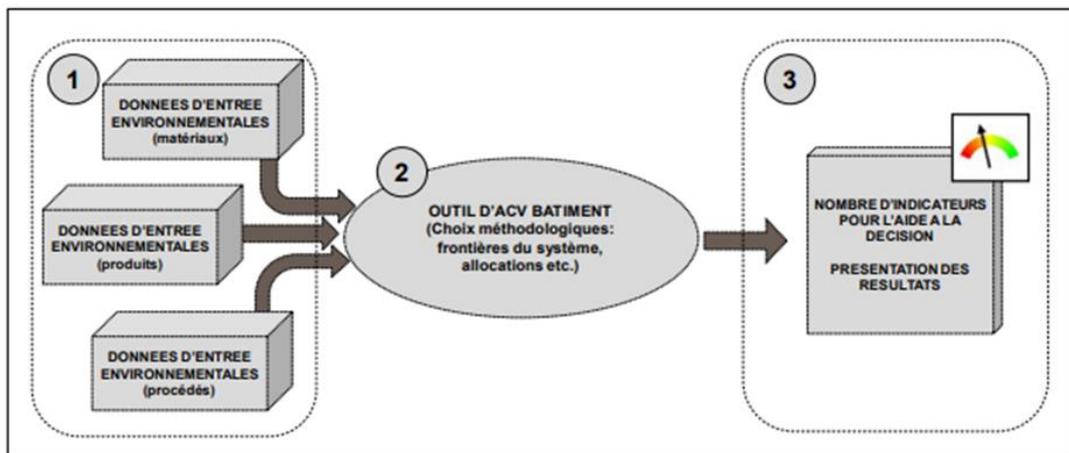


Fig. 37 : Les principales caractéristiques d'un modèle pour l'ACV des bâtiments (Lasvaux, 2010).

4. Projets de recherche et de normalisation sur l'ACV des bâtiments

Au cours des deux dernières décennies, une multitude de projets de recherche à l'échelle internationale ont été réalisés, jouant un rôle crucial dans le développement de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) des bâtiments. Ces recherches ont non seulement permis l'adoption accrue de ces outils par les professionnels de la construction, mais elles ont également facilité la diffusion des connaissances et des meilleures pratiques dans ce domaine. Parmi ces nombreuses initiatives, plusieurs projets importants se distinguent (Lasvaux, 2010) :

- **Projet REGENER (1995-1996)** : Cette initiative a rassemblé huit partenaires européens avec l'objectif d'élaborer une méthodologie commune pour l'ACV des bâtiments. Le projet visait également à développer une boîte à outils pour aider à la conception et à réaliser les premières études méthodologiques.
- **Projet Annexe 31 de l'Agence Internationale de l'Énergie (2001)** : Ce projet avait pour objectif principal d'examiner les impacts environnementaux des bâtiments ainsi que les diverses méthodes utilisées pour ces évaluations, en mettant un focus particulier sur l'application de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).
- **Projet PRESCO (2004-2005)** : Ce projet a comparé les outils d'ACV à l'échelle européenne en confrontant un cube en béton armé à une maison en bois (**Peuportier et al., 2004**).

Ces projets ont été essentiels pour améliorer les pratiques d'ACV dans le secteur de la construction, permettant une meilleure compréhension des impacts environnementaux et aidant à standardiser les méthodes et outils utilisés.

Depuis 2010, de nouveaux projets ont été lancés pour renforcer la fiabilité et l'accessibilité des outils d'ACV (**Lasvaux, 2010**) :

- **Projet ENSLIC-Building** : Ce projet, dirigé par le CIRCE, a porté sur l'évaluation des outils d'ACV pour les bâtiments. Il a examiné les indicateurs environnementaux, les techniques de communication des résultats et les efforts de simplification de l'ACV. Un outil ACV simplifié, axé sur deux indicateurs principaux : l'énergie et le changement climatique, a été développé.
- **Projet LoRe-LCA** : Ce projet visait à comparer les méthodologies d'ACV appliquées aux bâtiments, conformément aux directives du CEN TC 350, et à identifier les lacunes dans les connaissances actuelles. Il a proposé des orientations pour les recherches futures (**LoRe-LCA, 2010**).
- **Projet COIMBA** : L'objectif de ce projet était de créer un outil d'évaluation opérationnel en France en fusionnant les outils EQUER et ELODIE. Ce projet impliquait divers partenaires, dont le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment et IZUBA Energies.

Ces efforts ont été complétés par les travaux des organismes de normalisation tels que l'AFNOR en France, le CEN en Europe et l'ISO à l'international, qui ont élaboré des méthodes d'évaluation environnementale des constructions (**Lasvaux, 2010**).

5. Les bases de données utilisées dans les études ACV des bâtiments

Une base de données, connue sous le terme "database" en anglais, est conçue pour stocker et récupérer des données ou informations liées à un sujet ou une activité spécifique, en les organisant de manière structurée. Elle est essentielle pour les systèmes informatiques utilisés dans la collecte, le traitement, la conservation et l'exploitation des données. Dans le cadre des outils d'analyse du cycle de vie (ACV) des bâtiments, trois types de données sont généralement utilisés (**Dakhia, 2019**), définis dans le tableau 14.

Tab. 14 : Les bases de données utilisées dans les études ACV des bâtiments

Type de données ACV	Description
Données ACV génériques multisectorielles	Informations couvrant divers secteurs industriels, utilisées pour des analyses générales et comparatives.
Données ACV génériques propres au secteur de la construction	Données spécifiques aux matériaux et procédés utilisés dans la construction, adaptées aux besoins du secteur de la construction.
Données ACV spécifiques au format EPD	Données détaillées et spécifiques aux produits, présentées sous forme de Déclarations Environnementales de Produit (EPD), fournissant des informations précises et normées.

5.1 Les données ACV génériques multisectorielles

Les bases de données génériques sont cruciales pour offrir des informations environnementales détaillées couvrant divers systèmes de produits. Elles comprennent des données sur les processus énergétiques, les modes de transport, la gestion des déchets, ainsi que les matériaux et systèmes utilisés. Actuellement, de nombreux outils d'ACV reposent sur ces bases de données génériques largement reconnues (fig.38) (**Dakhia, 2019**).

Ecoinvent est une vaste base de données d'inventaire du cycle de vie contenant près de 4000 processus (**Frischknecht et al., 2007**). Développée avec plusieurs instituts de recherche suisses, elle offre des données représentatives de l'année 2000 avec une couverture mondiale, européenne ou suisse. Les données sont disponibles sous forme de fichiers Excel et Ecospold, organisées par processus unitaires pour minimiser l'agrégation.

Les données Ecoinvent sont largement intégrées dans divers outils d'ACV comme EQUER et LEGEP. Ces outils utilisent les indicateurs environnementaux d'Ecoinvent pour évaluer les impacts des matériaux, produits et procédés, permettant ainsi des analyses précises et complètes pour une prise de décision éclairée dans le domaine de la construction (**Lasvaux, 2010**).

Chapitre III

Base de données génériques	Organisme responsable	Utilisée dans l'outil d'ACV bâtiment...	Type de données utilisées dans l'outil d'ACV bâtiment	Illustration / Site internet
Swiss Life Cycle Inventories database ecoinvent	Centre Ecoinvent (Suisse)	EQUER LEGEF	indicateurs	 www.ecoinvent.ch
European Life Cycle Database (ELCD)	Joint Research Centre (Europe)	GaBi for Building LCA	inventaire de cycle de vie + indicateurs	 http://lct.jrc.ec.europa.eu/
GaBi Database	PE International (Allemagne)	GaBi for Building LCA	inventaire de cycle de vie + indicateurs	 www.gabi.de
Data for Environmental Analysis and Management	Ecobilan (France)	TEAM	inventaire de cycle de vie + indicateurs	 www.ecobilan.com
IVAM Database	IVAM (Pays-Bas)	ECO-QUANTUM	indicateurs	 www.ivam.uva.nl
US LCI Database	National Renewable Energy Laboratory (Etats-Unis)	Impact Estimator	indicateurs	 www.nrel.gov/lci/

Fig. 38 : Bases de données génériques utilisées dans les outils pour l'ACV des bâtiments (Lasvaux, 2010).

En plus d'Ecoinvent, plusieurs autres bases de données jouent un rôle crucial dans l'ACV (fig.38) :

- **ELCD** (European Reference Life Cycle Database) : Fournie par la Commission Européenne, elle propose des informations environnementales harmonisées pour l'ACV des produits et services en Europe.
- **GaBi** : Développée en Allemagne, cette base de données offre des données détaillées pour divers secteurs industriels, souvent utilisée en Europe.
- **DEAM** : Une base de données américaine fournissant des informations sur les processus industriels pour les analyses environnementales en Amérique du Nord.
- **IVAM** : Propose des données environnementales spécifiques aux processus industriels utilisés aux Pays-Bas.
- **US-LCI** : Offrant des données d'inventaire pour les produits fabriqués aux États-Unis.

Ces bases de données génériques sont essentielles pour les analyses ACV, fournissant une base commune et harmonisée pour évaluer les impacts environnementaux de manière cohérente à l'échelle mondiale.

5.2 Les données ACV génériques pour le secteur de la construction

Les bases de données spécialisées dans le domaine de la construction offrent des informations détaillées sur les matériaux de construction, souvent présentées sous forme d'indicateurs (fig.38) (Lasvaux, 2010), par exemple :

Base de données propres au secteur de la construction	Organisme responsable	Utilisée dans l'outil d'ACV bâtiment...	Type de données utilisées dans l'outil d'ACV bâtiment	Illustration / Site internet
ATHENA Life Cycle Inventory Database	ATHENA Institute (Canada)	Impact Estimator	indicateurs	 www.athenasmi.org/tools/databse/index.html
Ökobau	Deutsche G Nachhaltiges Bauen (Allemagne)	LEGEP	indicateurs	 www.nachhaltigesbauen.de/baumstoff-und-gebaeuedaten/oekobaudat.html
KBOB	Office fédéral suisse des constructions et de la logistique (Suisse)	Eco-bat	indicateurs	 www.kbob.ch
Inventory of Carbon & Energy (ICE)	University of Bath	-	indicateurs	 www.bath.ac.uk/mech-eng/serf/embodied

Fig. 39 : Bases de données ACV génériques pour le secteur de la construction utilisées dans les outils pour l'ACV des bâtiments (Lasvaux, 2010).

- **En Suisse** : La base KBOB offre des indicateurs spécifiques sur la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ associées aux matériaux et procédés couramment utilisés dans la construction (KBOB, 2010). Ces données, dérivées principalement d'Ecoinvent, peuvent parfois manquer de détails fins concernant l'inventaire complet du cycle de vie et d'autres indicateurs d'impact environnemental (DGNB, 2010).
- **En Allemagne** : La base de données GaBi, exploitée par Ökobau, fournit des informations génériques sur les matériaux, en accord avec les indicateurs de la norme européenne EN 15804 (Lasvaux, 2010).
- **Aux États-Unis**, L'institut ATHENA a développé une base de données complète qui décrit en détail les processus de fabrication des matériaux de construction. Cette base fournit une analyse approfondie de l'impact environnemental (Hammond & Jones, 2008).

5.3 Bases de données ACV spécifiques aux déclarations environnementales

Les normes ISO 14025 et ISO 21930, qui encadrent les déclarations environnementales des produits, ont conduit à l'émergence de bases de données ACV dans un nouveau format. Ces

Chapitre III

normes régissent l'application de l'ACV, notamment pour les produits de construction sur divers marchés nationaux. Les déclarations environnementales sont cruciales pour la communication entre les acteurs du secteur (Lasvaux, 2010).

Lasvaux (Lasvaux, 2010) a identifié plusieurs bases de données au format EPD (Environmental Product Declarations) développées internationalement, telles que BRE Profiles au Royaume-Uni, IBU en Allemagne, INIES en France, RTS en Finlande, MRPI aux Pays-Bas, et Envirodec en Suède (fig. 40).

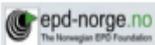
Base de données au format EPD	Organisme responsable	Utilisée dans l'outil d'ACV bâtiment...	Type de données utilisées dans l'outil d'ACV bâtiment	Norme de référence	Illustration / Site internet
BRE Environmental Profiles	Building Research Establishment (Royaume-Uni)	Envest II	indicateurs	ISO 14025	 www.bre.co.uk
IBU Umwelt-Deklarationen (EPD)	Institut Bauen und Umwelt e.V. (Allemagne)	LEGEF	indicateurs	ISO 14025	 bau-umwelt.de
INIES (FDES)	Protocole multipartie (AFNOR, 2008) (France)	ELODIE	indicateurs (selon norme NF P01-010)	NF P01-010	 www.inies.fr
MRPI® (Milieu Relevante Product Informatie)	NVTB (Pays-Bas)	ECO-QUANTUM	indicateurs	ISO 14025	 www.mrpi.nl
RT Environmental Declaration	RTS (Finlande)	?	quelques flux d'inventaire de cycle de vie + indicateurs	ISO 14025	 www.rts.fi
The International EPD® System	The International EPD Consortium (Suède à l'origine)	?	indicateurs	ISO 14025	 www.environdec.com
EPD Norge	The Norwegian EPD Foundation (Norvège)	?	indicateurs	ISO 14025	 www.epd-norge.no

Fig. 40 : Bases de données au format EPD utilisées dans les outils pour l'ACV des bâtiments (Lasvaux, 2010).

En France, les informations de la base INIES sont connues sous le nom de "fiches de déclaration environnementale et sanitaire" (FDES). Ce programme se distingue par l'inclusion de données sanitaires (comme les émissions dans l'air intérieur) et des résultats d'indicateurs d'impacts pour chaque phase du cycle de vie : production, transport, mise en œuvre, utilisation et fin de vie (fig. 41) (Dakhia, 2019).

Flux	Unité	Production	Transport	Mise en œuvre	Vie en œuvre	Fin de vie	Total cycle de vie	
							Par annuité	Pour toute la DVT
Consommation de ressources naturelles énergétiques								
Bois	kg							
Etc.								
Indicateurs énergétiques								
Energie Primaire Totale	MJ							
Etc.								
Consommation de ressources naturelles non énergétiques								
Antimoine	kg							
Etc.								
Consommation d'énergie et de matières récupérées								
Energie récupérée	MJ							
Etc.								
Consommation d'eau								
Eau : lac	kg							
Etc.								
Emissions dans l'air, l'eau et le sol								
Hydrocarbures (non spécifiés)	g							
Etc.								
Déchets valorisés et éliminés								
Déchets dangereux	kg							
Etc.								

Fig. 41 : Le tableau des flux environnementaux reportés pour chaque FDES (Lasvaux, 2010).

6. Les déclarations environnementales

En France, les "Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire" (FDES) sont développées conformément à la norme NF P01-010 pour les déclarations environnementales. Le terme français DEP, signifiant "Déclaration Environnementale de Produit", est l'équivalent de l'EPD en anglais. Pour évaluer les produits de manière pertinente, il est essentiel de les analyser dans le cadre global du bâtiment, afin d'éviter des conclusions biaisées. Le programme français FDES propose deux types de déclarations (Dakhia, 2019) : les FDES individuelles et les FDES collectives.

Les FDES individuelles fournissent des informations détaillées sur un produit ou une gamme de produits, généralement spécifiées par un fabricant sous une référence commerciale précise. En revanche, les FDES collectives regroupent des données représentatives d'un "produit-type", obtenues de différents sites de production sélectionnés pour l'analyse. Ces données combinées aboutissent à une déclaration spécifique pour ce produit-type, souvent associée à un consortium de fabricants ou d'industriels d'un même secteur (comme le bois, la céramique, la peinture, le verre, etc.) (AFNOR, 2004).

7. Limites de la méthode ACV dans le bâtiment

L'intégration des méthodes d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans le secteur de la construction présente plusieurs défis significatifs qui influencent la fiabilité des résultats. Le tableau ci-dessous présente ces derniers.

Tab. 15 : Défis et Facteurs Influençant l'ACV dans la Construction

Catégorie	Défis et Facteurs	Références
Durée de Vie des Bâtiments	- Évaluation complexe des impacts environnementaux sur une longue période - Incertitude sur la durée de vie des composants	Buyle et al., 2013
Incertitude des Paramètres	- Taux de renouvellement des composants difficile à prévoir - Données d'entrée incertaines - Variabilité des conditions d'utilisation et de maintenance	Buyle et al., 2013
Diversité des Matériaux	- Complexité de la standardisation des évaluations - Variété des techniques de construction - Influence des matériaux volumineux et des distances de transport	Servaes et al., 2013
Unicité des Projets	- Chaque projet est unique, rendant l'application uniforme difficile - Variabilité des usages, conditions climatiques, et exigences de confort	Lotteau et al., 2015
Sélection de l'Unité Fonctionnelle	- Choix de l'ensemble du bâtiment vs. surface habitable - Comparabilité difficile avec d'autres études - Influence des unités fonctionnelles sur les résultats	Cuéllar-Franca & Azapagic, 2012
Influence des Bases de Données	- Impact des données de transport et des distances de production - Criticité du choix des bases de données utilisées pour l'ACV	Servaes et al., 2013
Spécificités Régionales	- Diversité des sites et particularités locales - Variabilité des climats, réglementations et habitudes des occupants	Buyle et al., 2013
Données de Maintenance	- Besoin d'intégrer des données détaillées sur la maintenance - Représentation réaliste des taux de renouvellement et de la qualité de construction	Rossi et al., 2012
Utilisation de l'ACV en Conception	- Avantages potentiels en tant qu'outil d'aide à la décision - Complexité d'application lors des étapes de conception	Sevin, 2018

8. Principaux résultats issus de l'état de l'art (ACV de bâtiment)

Dans cette synthèse (tab.16), nous présenterons les conclusions essentielles des articles analysés pour dresser un panorama actuel de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée au secteur du bâtiment.

Tab. 16 : les conclusions et recommandations des études sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans le secteur du bâtiment (Auteur ; 2024).

Points clés	Références
La phase d'utilisation des bâtiments représente 90 % de leur impact environnemental, principalement à cause de la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation.	Byule et al., 2013
Cette prédominance de la phase d'utilisation est constatée dans toutes les ACV des bâtiments, indépendamment des climats.	Byule et al., 2013
Il est essentiel de réduire la consommation énergétique par l'amélioration de l'isolation, de l'étanchéité à l'air et de la régulation de la ventilation.	Byule et al., 2013
L'analyse de deux constructions à haute efficacité énergétique a souligné l'importance du choix du système de chauffage.	Thiers & Peuportier, 2012
Un modèle prévoyant les variations de la demande électrique due au chauffage peut optimiser l'efficacité énergétique en réduisant la surconsommation.	Robillart et al., 2019
L'utilisation d'une pompe à chaleur air/eau double service a été identifiée comme bénéfique pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.	Nematchoua et al., 2022
L'impact significatif du système d'isolation thermique sur la consommation d'énergie a été démontré sur un cycle de vie de 80 ans d'un immeuble de bureaux.	Dakhia & Zemmouri, 2018
Réduire la consommation d'énergie opérationnelle peut entraîner une augmentation proportionnelle de l'énergie grise des matériaux utilisés, dépassant parfois l'impact environnemental de la phase opérationnelle.	Huberman & Pearlmutter, 2008
L'utilisation de structures légères et performantes ainsi que de matériaux recyclés ou locaux à faible empreinte énergétique peut contribuer à minimiser l'impact environnemental global des constructions.	Rossi et al., 2012
Le bois, grâce à son empreinte carbone quasi neutre et à sa facilité de manipulation, est recommandé pour réduire les émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie des bâtiments comparé à des matériaux comme le métal ou le béton.	Böriesson & Gustavsson, 2000
Des études ont également montré que l'impact environnemental élevé de la production de métal et de béton est dû à leur haute énergie grise.	Byule et al., 2013; Cole & Kernan, 1996; Gerilla et al., 2007

8.1 Analyse du cycle de vie des bâtiments hôteliers

Diverses recherches ont étudié les méthodes pour réduire l'impact environnemental des hôtels en régulant leur consommation d'énergie. Une analyse du cycle de vie menée par Kaoula et Bouchair (**Kaoula & Bouchair, 2018**) a évalué les impacts environnementaux de trois types de bâtiments hôteliers, caractérisés par différentes configurations d'enveloppe et matériaux, situés dans des climats variés, notamment en Algérie et en France. Les résultats indiquent que réduire les besoins énergétiques des enveloppes des bâtiments traditionnels et standards en adoptant des scénarios de bâtiments à faible consommation peut améliorer leur empreinte environnementale.

Selon Dascalaki et Balaras (**Dascalaki & Balaras, 2004**), les hôtels, en raison de leurs modes opératoires, catégories d'hébergement et services offerts, présentent des schémas de consommation de ressources spécifiques. Ces structures consomment d'importantes quantités de ressources naturelles telles que l'énergie, l'eau et les matières premières, les rendant parmi les bâtiments commerciaux les plus impactant sur l'environnement, après les établissements hospitaliers. Pour remédier à cette situation, les auteurs suggèrent l'adoption de matériaux écologiques, résistants, recyclés et d'origine locale, afin de réduire les impacts associés au transport. Cette approche environnementale permettrait de diminuer la consommation de ressources, les coûts opérationnels, et d'améliorer le bien-être et l'efficacité des occupants.

Çakmaklı (**Çakmaklı, 2007**) rapporte que le Carbon Trust (2005) a identifié l'exploitation d'un hôtel comme la phase la plus consommatrice de ressources dans son cycle de vie. Les hôtels nécessitent des quantités considérables d'énergie, d'eau et de matériaux pour fournir un service et un confort adéquats à leurs clients. De plus, l'inefficacité des équipements utilisés dans les hôtels engendre un impact environnemental plus important comparé à d'autres structures similaires. En 2002, l'Agence nationale italienne pour la protection de l'environnement a estimé que 75 % des impacts environnementaux des hôtels proviennent de leur consommation intensive de ressources, exerçant une pression significative sur les infrastructures locales, en particulier en ce qui concerne l'approvisionnement en eau et en électricité, augmentant ainsi la consommation d'énergie.

Conclusion

Les décideurs, conscients des enjeux environnementaux, ont initié plusieurs actions visant à intégrer des stratégies bas carbone dans les projets architecturaux. La maîtrise de la consommation énergétique et la réduction des émissions deviennent alors essentielles tout au

long du cycle de vie des bâtiments. Dans ce contexte, l'analyse du cycle de vie (ACV) du bâtiment s'impose comme un outil incontournable, reconnu pour son efficacité scientifique et sa normalisation rigoureuse pour évaluer ces impacts.

Grâce à l'utilisation de bases de données complètes et d'outils numériques avancés, les acteurs du secteur de la construction peuvent désormais effectuer des choix éclairés alignés sur leurs objectifs écologiques. Cette méthodologie permet de décomposer et d'optimiser chaque étape du cycle de vie des bâtiments, en mettant particulièrement en avant la réduction de l'empreinte environnementale.

En outre, cette approche souligne la pertinence de l'énergie dans l'évaluation globale de l'impact environnemental. Elle fournit des orientations précieuses pour le développement et l'évaluation de technologies innovantes, contribuant ainsi à un bilan environnemental plus favorable.

**CHAPITRE IV : EXPLORATION DE GUELMA : CONTEXTE, POTENTIEL
TOURISTIQUE ET PRESENTATION DE L'OUTIL DE SIMULATION CHOISE.**

Introduction

Ce chapitre est dédié à l'analyse du contexte de notre étude. Nous commencerons par une description détaillée de la ville de Guelma, englobant sa position géographique, son passé historique, ainsi que son climat. Nous examinerons divers paramètres climatiques, incluant la température, l'humidité relative, la vitesse du vent, et d'autres facteurs pertinents. Il est essentiel d'appréhender ces conditions locales pour développer des stratégies efficaces permettant l'exploitation optimale des ressources naturelles disponibles.

La deuxième section de ce chapitre mettra en lumière les opportunités touristiques de la ville de Guelma, en mettant en avant tous ses complexes touristiques. Parmi eux, le complexe "EL Baraka" sera sélectionné pour notre cas d'étude en fonction de certains critères. Une description détaillée de la zone d'étude sera fournie, incluant les matériaux de construction, les équipements, le système de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC), ainsi que les différents scénarios d'utilisation.

Ces informations serviront de base à une simulation effectuée à l'aide du logiciel Pléiades. La troisième section de ce chapitre se concentrera sur ce logiciel, en présentant ses modules et ses fonctionnalités.

Section I : la ville de Guelma comme un contexte d'étude.

1. Présentation de la ville de Guelma

La ville de Guelma se trouve au centre d'une étendue région agricole encerclée par des montagnes telles que Maouna, Dbegh et Houara. Sa position géographique lui vaut le surnom de "ville assiette". Les sites naturels de Guelma regorgent de richesses, tels que les plateaux des cônes à Houari Boumédiène, le lac souterrain à Bir Osmane, la grotte de Djebel Taya à Bouhamdane, parmi d'autres. La région est fréquemment le lieu de mise au jour de vestiges romains, témoignant de son riche passé historique.

2. Situation géographique de la ville de Guelma

La wilaya de Guelma se trouve dans le nord-est de l'Algérie, à une altitude de 256 mètres, et est caractérisée par des coordonnées géographiques de latitude 36° 27' 54'' N et longitude 7° 25' 50'' E. Cette localisation géographique privilégiée en fait un point de convergence entre les zones industrielles du nord (Annaba et Skikda) et les hubs commerciaux du sud (Oum-El-Bouaghi et Tébessa), tout en étant à proximité de la frontière tunisienne à l'est (**Direction du Commerce de la Wilaya de Guelma, 2021**).



Fig. 42 : La situation géographique de la ville de Guelma (**Direction du Commerce de la Wilaya de Guelma, 2021**).

La localisation géographique de la wilaya de Guelma est stratégique, étant entourée de plusieurs wilayas importantes : au nord se trouve Annaba, dotée d'un port, d'un aéroport et d'une importante base industrielle, située à environ 60 km ; au nord-ouest se situe Skikda, à moins de 80 km, avec son port et ses installations pétrochimiques ; à l'ouest se trouve Constantine, à 100 km, qui a le potentiel de devenir la capitale de l'est du pays ; au sud se trouve Oum-El-Bouaghi, à 120 km ; à l'est se trouve Souk-Ahras, à 70 km de la Tunisie ; et au nord-est se trouve El Tarf, une région agricole et touristique avec un port de pêche à la frontière tunisienne (**Direction du Commerce de la Wilaya de Guelma, 2021**).

3. Contexte historique de la ville de Guelma

Sayad (**Sayad, 2021**) a synthétisé l'histoire de Guelma, une des cités les plus anciennes d'Afrique du Nord, établie durant le règne de Massinissa sous l'appellation de "Malacca". Désignée sous le nom de "Calama" dans les écrits latins, cette ville a joué un rôle significatif dès le II^e siècle avant J.C., notamment lors des célèbres batailles de Jugurtha contre les Romains en 109 avant J.C. Pendant la période byzantine, la ville de Calama était sous la domination de Genséric, tel que rapporté par Possidius, biographe de saint Augustin. Au IX^e siècle, plusieurs tribus arabes telles que les Banou Hillal avaient déjà colonisé la région, qui, selon Ibn Khaldoun, exerçait une attraction sur différentes civilisations, en particulier la

civilisation arabo-musulmane. Sous la domination ottomane, puis sous la conquête française en 1834, la ville de Guelma a été le lieu de résidence de diverses vagues de colons et de pieds-noirs. La contestation du colonialisme a atteint son paroxysme lors des événements tragiques du 8 mai 1945.

Guelma, au cours de son développement, a été le témoin de l'influence de nombreuses civilisations et formes d'urbanisation, contribuant à façonner la ville telle qu'elle existe aujourd'hui.

3.1 La cité militaire : avant 1850

Les vestiges de la ville romaine témoignent de l'existence d'une agglomération urbaine datant de cette période à l'intérieur des remparts, favorable à l'installation d'une structure militaire ultérieure (**Benzerari, 2013**).

Une cité militaire s'est progressivement développée en fusionnant les éléments caractéristiques de l'urbanisme romain, ce qui a encouragé la cohésion sociale et renforcé l'importance des espaces urbains centraux. Le forum romain, situé à la croisée des deux voies principales, occupait une position centrale de premier plan. Le théâtre romain, en tant qu'espace public multifonctionnel, servait à divers usages tels que la représentation théâtrale et l'exposition (**Sayad, 2021**).

3.2 Guelma la cité coloniale : 1852-1962

L'expansion urbaine pendant cette période a été attribuée à la crise économique des années 1930 (**Mokhnache, 2023**). La restructuration légale et matérielle de la ville de Guelma a été réalisée en conséquence, ce qui a conduit à la mise en place de la réparation par lots selon les plans parcellaires (**Sayad, 2021**).

3.3 Guelma période de logique populaire : 1962-1966

Cette approche a été influencée par les habitants de Guelma ainsi que par ceux des régions rurales avoisinantes. En dépit du maintien de sa dimension coloniale, le développement urbain a connu une croissance non régulée (**Sayad, 2021**).

3.4 Guelma lors de la période de la logique industrielle : 1966-1989

La municipalité algérienne a mis en place une initiative institutionnelle proactive visant à renforcer son indépendance, notamment en prenant en charge les diverses classes sociales à travers le déploiement des programmes ZHUN et des lotissements. Elle a opté pour une approche urbanistique fonctionnelle en incluant des espaces de loisirs à proximité de ses

projets, tout en mettant en avant les espaces publics urbains, parfois sans les concrétiser physiquement (Sayad, 2021).

3.5 Guelma de 1990 jusqu'à l'époque contemporaine

Afin de contrer l'expansion urbaine anarchique, de nouvelles réglementations ont été mises en place, telles que la loi 90-29 du 01/12/1990 relative à l'aménagement et à l'urbanisme, qui a pour objectif de sauvegarder les espaces naturels et de préserver les zones agricoles. La croissance urbaine est restreinte dans les zones sud et est de la ville, tandis qu'un périmètre irrigué dans sa partie nord est préservé pour éviter toute empiétement sur les terres agricoles (Mokhnache, 2023).

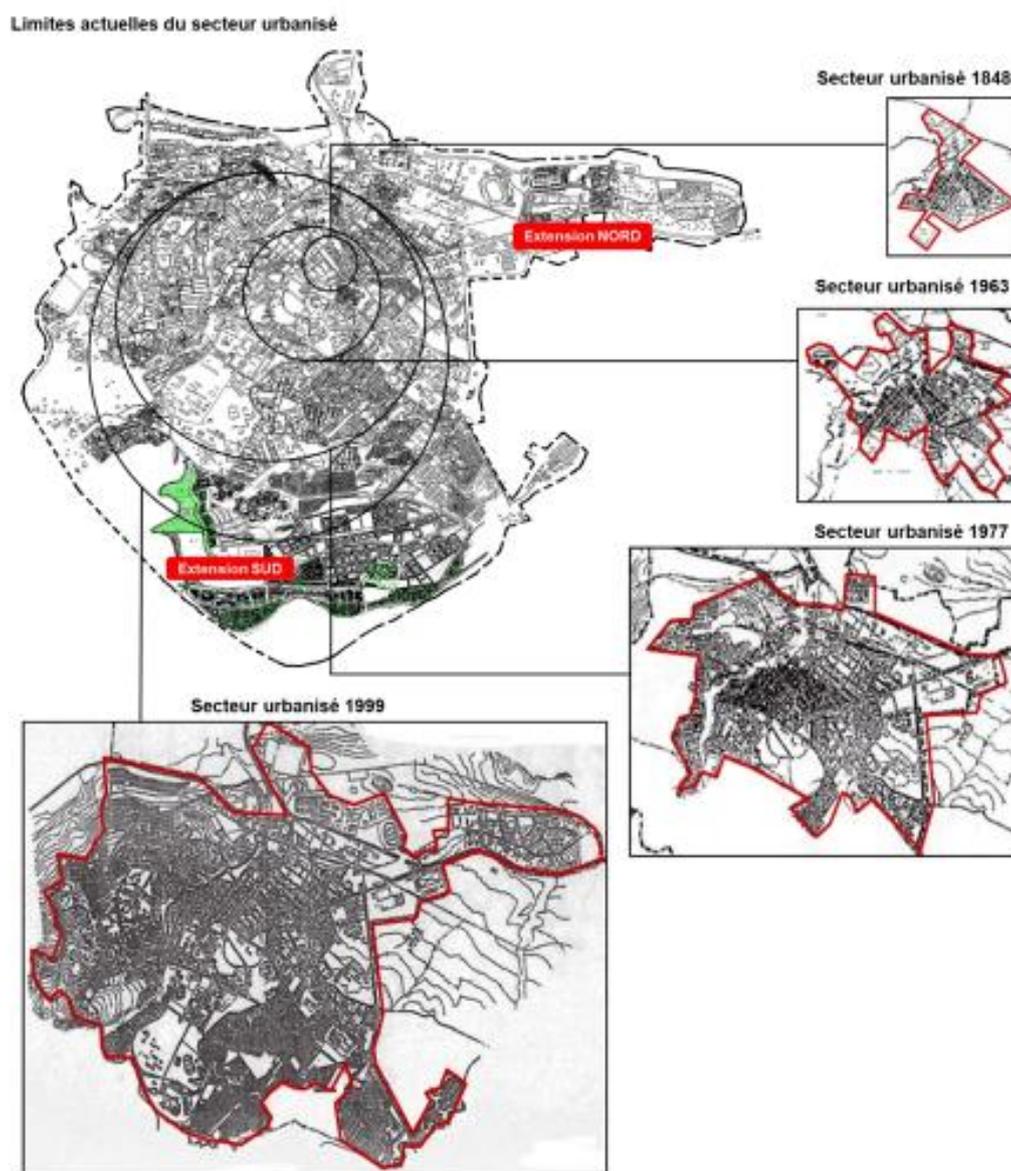


Fig. 43 : La transformation de la structure urbaine de Guelma de 1848 à 2016 (Sayad, 2021).

4. Contexte géophysique de la ville de Guelma

Guelma est organisée en quatre grandes régions géophysiques distinctes : la zone métropolitaine de Guelma, le district de Bouchegouf, l'aire d'Oued Zénati, et la région rurale de Tamlouka (**Direction du Commerce de la Wilaya de Guelma, 2021**).

Chacune de ces régions possède des caractéristiques géographiques et naturelles spécifiques qui influencent leur développement économique et social. La zone métropolitaine de Guelma est le centre administratif et commercial, tandis que le district de Bouchegouf est connu pour ses terres agricoles fertiles. L'aire d'Oued Zénati se distingue par ses ressources en eau, et la région de Tamlouka est caractérisée par ses formations géologiques uniques.

4.1 Relief et topographie

Située au cœur d'une vaste région agricole, la ville de Guelma se trouve à une altitude approximative de 256 mètres. Cette position est renforcée par sa proximité avec plusieurs montagnes de haute altitude, notamment le mont Maouna (1 411 mètres), le mont Dbegh (1 060 mètres) et le mont Houara (1 292 mètres). Ces montagnes contribuent à la diversité du relief de la région, justifiant le surnom de Guelma comme la "ville assiette" (**Mokhnache, 2023**).

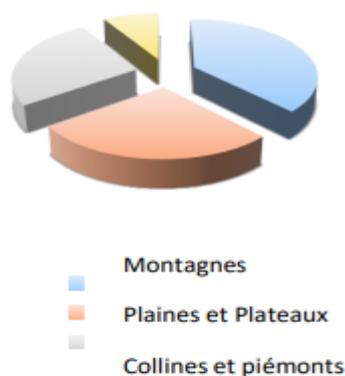


Fig. 44 : La composition du relief de Guelma (**Mokhnache, 2023**).

En outre, Guelma est entourée d'une vaste zone forestière et bénéficie de la présence de la rivière Seybouse, qui constitue une source essentielle d'approvisionnement en eau pour la ville et ses environs. La richesse de son environnement naturel, avec ses forêts et sa rivière, joue un rôle crucial dans le soutien des activités agricoles et contribue à la biodiversité locale.

4.2 Hydrologie

Dans son ensemble, la Wilaya de Guelma est composée de quatre zones hydrogéologiques distinctes, également appelées sous-bassins versants (**Direction du Commerce de la Wilaya de Guelma, 2021**), mentionnés dans le tableau suivant.

Tab. 17 : Zones Hydrogéologiques de la Wilaya de Guelma.

Zone hydrogéologique	Description
Plaines de Guelma et Bouchegouf	Moyenne et basse Seybouse
Djebels au Nord et Nord-ouest	
Plaines et collines de Tamlouka	
Djebels surplombant les Oueds Sedrata et Hélia	

La région de Guelma renferme les plus grandes nappes phréatiques captives du pays, s'étendant sur environ 40 km le long du sous-bassin versant de Seybouse. Ces nappes sont rechargées par l'infiltration et le ruissellement provenant de l'Oued Seybouse, fournissant un débit exploitable de 385 litres par seconde (Sayad, 2021).

5. Potentialités naturelles de la région de Guelma

5.1 Potentialités forestières

La Wilaya de Guelma s'étend sur une superficie de 106 145 hectares, dont 28,79 % sont constitués de zones forestières. Ce paysage forestier, caractérisé par sa fragmentation et sa diversité, s'étend d'ouest en est, avec des forêts importantes situées principalement au sud-est. Ces forêts possèdent un potentiel considérable pour la production de bois de chêne zen et de chêne-liège. Selon les estimations, elles peuvent produire environ 510,10 stères de chêne zen et de chêne-liège, en plus de 345 m³ de bois divers (Mokhnache, 2023). Cette ressource forestière représente une richesse naturelle significative pour la région, contribuant à son développement économique et environnemental.

5.2 Potentialités agricoles

L'agriculture occupe une place prépondérante à Guelma, avec une superficie agricole totale (SAT) de 264 618 hectares, ce qui équivaut à 71,77 % de la superficie totale (Sayad, 2021). La figure ci-dessous (fig. 45) illustre le potentiel agricole de la région.

Culture des céréales	Surface (ha)	Fourrage	Culture maraichère	Surface (ha)	Surface T irriguée
Blé dur	30	Fourrage naturelle	Pomme de terre	02	650 ha
			Tomate maraichère	01	
Blé tendre	3		Salade	0.5	
			Oignon sec	01	
			Piment et poivron	02	
Orge	2		Tomate industrielle	10	

Fig. 45 : Cultures et superficies agricoles pour la ville de Guelma (Sayad, 2021).

5.3 Potentialités hydrauliques

Selon les données récentes, la wilaya de Guelma dispose d'un potentiel hydraulique significatif, évalué à environ 151,81 millions de mètres cubes d'eau mobilisable (Sayad, 2021). Ce volume se répartit entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

Les ressources en eaux souterraines sont réparties dans quatre sous-bassins hydrogéologiques distincts, comprenant un total de 1 620 points d'eau actifs, permettant une mobilisation annuelle de 94,1 millions de mètres cubes. Ces points d'eau jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau pour l'agriculture et d'autres usages (Direction du Commerce de la Wilaya de Guelma, 2021).

6. Le contexte climatique de la ville

À Guelma, la saison estivale est caractérisée par sa brièveté, sa chaleur intense, son aridité et son ensoleillement fréquent, tandis que l'hiver s'étend sur une longue période, marqué par des températures froides, des précipitations abondantes et des périodes partiellement nuageuses. Les températures annuelles oscillent habituellement dans une fourchette comprise entre 4 °C et 35 °C, et rarement chutent en dessous de 0 °C ou dépassent les 39 °C (Weather Spark, 2023).

6.1 Température moyenne à Guelma

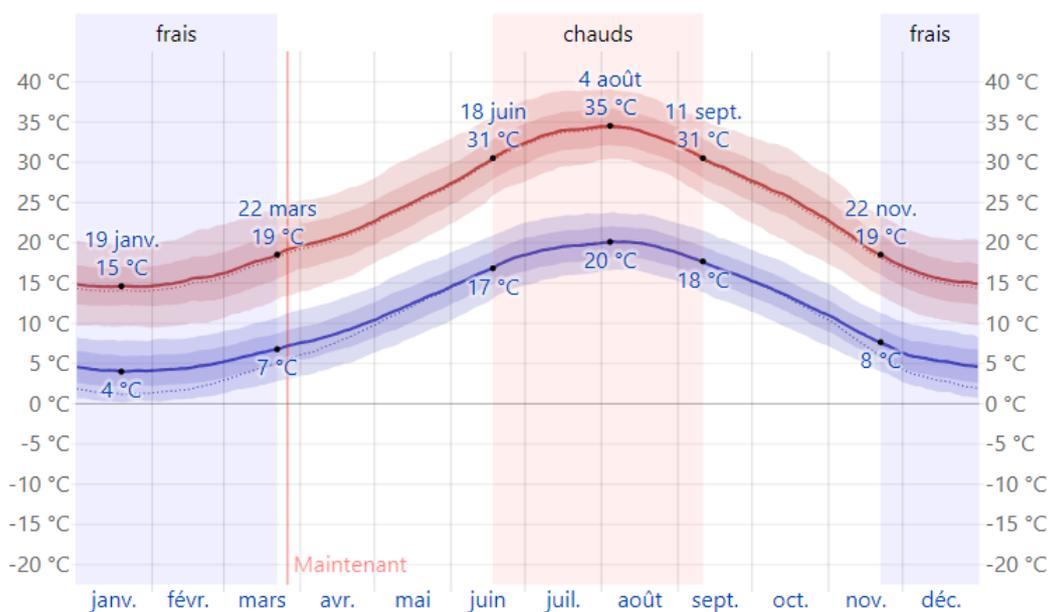


Fig. 46 : La température moyenne quotidienne maximale (ligne rouge) et moyenne quotidienne minimale (ligne bleue) à Guelma (Weather Spark, 2023).

La figure 46 montre les températures moyennes quotidiennes maximales (ligne rouge) et minimales (ligne bleue) à Guelma sur une année, basées sur les données de Weather Spark

(Weather Spark, 2023). Cette courbe permet de visualiser les fluctuations saisonnières des températures et d'identifier les périodes les plus chaudes et les plus fraîches de l'année.

En hiver, les températures minimales tombent jusqu'à environ 4 °C en janvier, tandis que les maximales atteignent environ 15 °C. Cette période fraîche s'étend de décembre à février, avec des températures relativement basses.

Tab. 18 : Température moyenne maximale et moyenne minimale à Guelma (Weather Spark, 2023).

Temp	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Haute	15 °C	15 °C	19 °C	21 °C	25 °C	31 °C	34 °C	35 °C	30 °C	25 °C	20 °C	16 °C
Moyenne	9 °C	9 °C	12 °C	15 °C	19 °C	23 °C	27 °C	27 °C	23 °C	19 °C	14 °C	10 °C
Basse	4 °C	5 °C	7 °C	9 °C	12 °C	17 °C	19 °C	20 °C	17 °C	13 °C	9 °C	5 °C

Au printemps, les températures augmentent progressivement. Fin mars, la température minimale moyenne atteint environ 7 °C, tandis que la maximale se situe autour de 19 °C. Cette période de transition se poursuit jusqu'à juin.

Pendant l'été, Guelma connaît ses températures les plus élevées. Le 4 août, la température maximale moyenne atteint son sommet à 35 °C, tandis que la minimale est d'environ 20 °C. La période estivale, de juin à septembre, est marquée par des températures élevées, avec un maximum de 31 °C en juin et en septembre.

À partir de septembre, les températures commencent à diminuer progressivement. En novembre, la température maximale moyenne est de 19 °C et la minimale est de 8 °C, indiquant le retour de la période fraîche. Les variations de température au cours de l'année sont importantes, avec une période fraîche de décembre à février et une période chaude de juin à septembre. Ces informations sont cruciales pour la planification des activités saisonnières et la gestion des ressources en fonction des conditions climatiques locales.

La figure 47 illustre de manière détaillée les températures moyennes horaires sur une année complète. L'axe des abscisses correspond aux jours de l'année, l'axe des ordonnées aux heures de la journée, et la température moyenne pour chaque heure et jour est représentée par des couleurs distinctes.

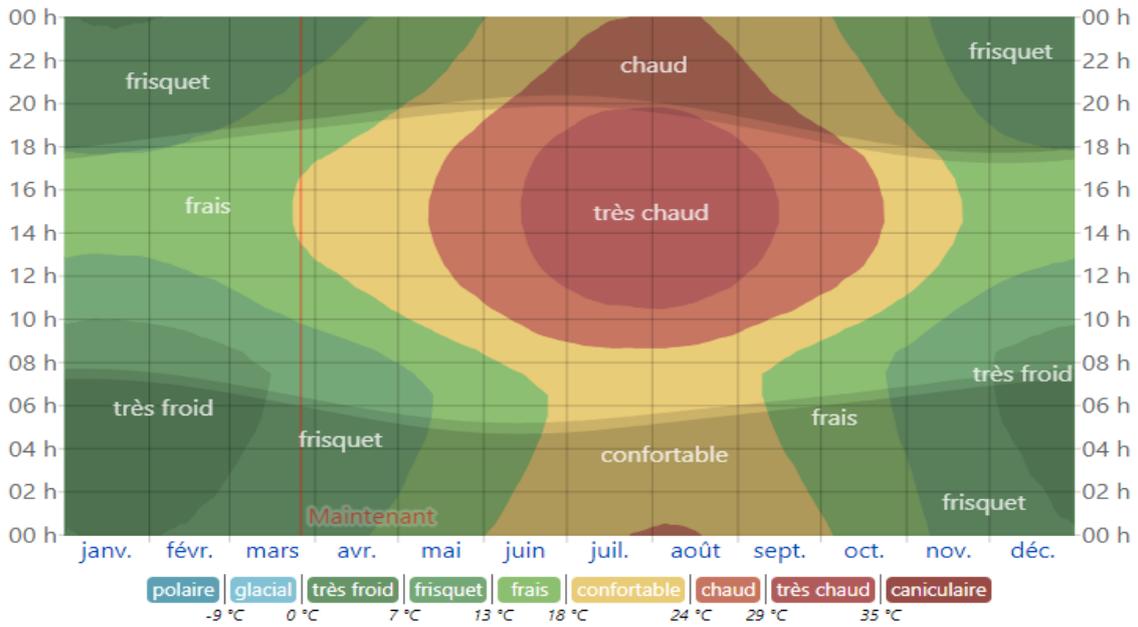


Fig. 47 : La Température horaire moyenne à Guelma (Weather Spark, 2023).

6.2 Rayonnement solaire

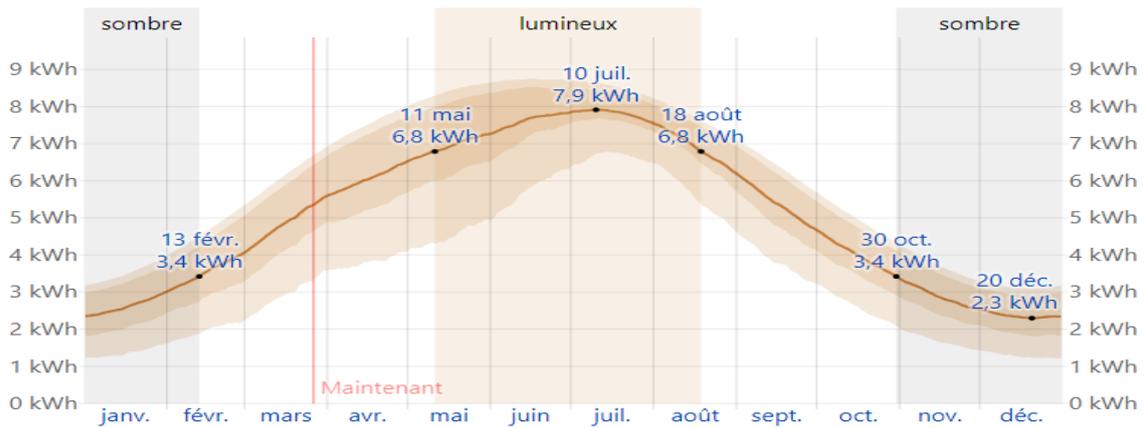


Fig. 48 : Le rayonnement solaire en ondes courtes quotidien moyen atteignant le sol en m^2 (Weather Spark, 2023).

Tab. 19 : La quantité mensuelle d'énergie solaire prévue pour la ville de Guelma (Weather Spark, 2023).

	janv.	févr.	Mars	avr.	Mai	Juin	juil.	Août	sept.	oct.	nov.	déc.
Énergie solaire (kWh)	2.6	3.5	4.9	6.0	6.9	7.6	7.8	6.9	5.4	4.0	2.9	2.4

À Guelma, le taux moyen quotidien de rayonnement solaire incident en ondes courtes varie significativement en fonction des saisons.

La période la plus ensoleillée s'étale sur une durée de 3,2 mois, allant du 11 mai au 18 août, caractérisée par une intensité de rayonnement solaire excédant 6,8 kWh par mètre carré. Le mois de juillet se distingue par sa luminosité, affichant en moyenne 7,8 kWh. En revanche, la période la plus sombre s'étend sur une durée de 3,5 mois, allant du 30 octobre au 13 février,

pendant laquelle le rayonnement solaire atteint un minimum de 3,4 kWh par mètre carré. D'après ces données, le mois de décembre se distingue par sa faible luminosité, avec une consommation moyenne de 2,4 kWh (Weather Spark, 2023).

6.3 Précipitation

La figure 49 présente les précipitations quotidiennes à Guelma sur une année, basée sur les données de Weather Spark (Weather Spark, 2023). La courbe montre des variations saisonnières distinctes, indiquant les périodes humides et sèches de l'année.

En janvier, les précipitations sont relativement élevées, atteignant environ 30 % début février, signalant la saison des pluies à Guelma. À partir de mars, les précipitations diminuent progressivement, indiquant une transition vers une période plus sèche.

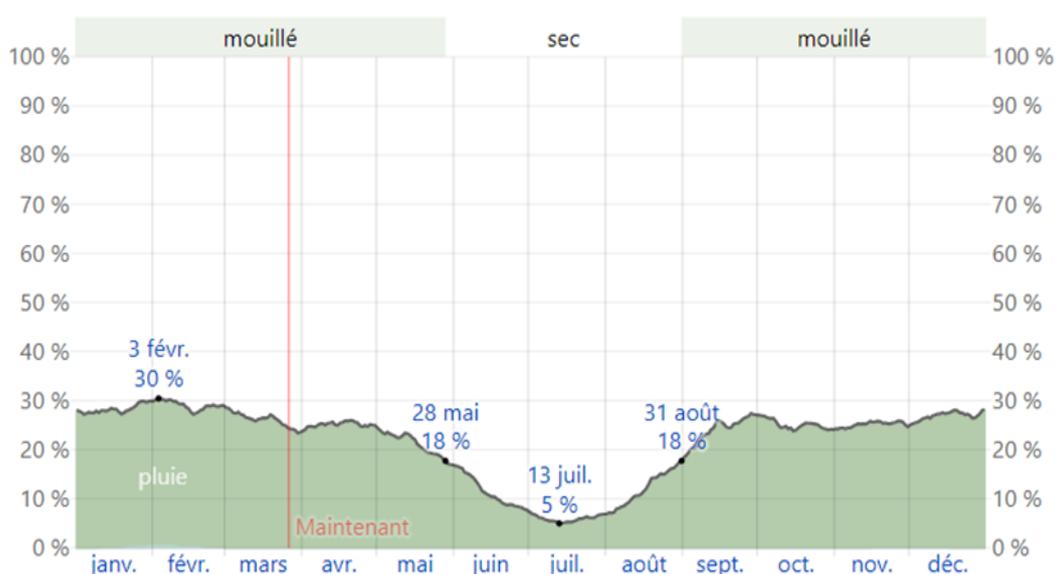


Fig. 49 : La précipitation quotidienne à Guelma (Weather Spark, 2023).

La diminution continue des précipitations atteint un minimum autour du 13 juillet, avec seulement 5 % de précipitations, marquant le pic de la saison sèche. Cette période, de juin à août, est caractérisée par un climat méditerranéen typique, chaud et sec.

À partir de la fin août, les précipitations augmentent de nouveau, atteignant environ 18 %, signalant le début du retour de la saison humide. Cette augmentation progressive se poursuit, avec des niveaux de précipitation plus constants et élevés à l'automne et en hiver.

En résumé, l'illustration souligne le climat méditerranéen de Guelma, avec des hivers humides et des étés secs. La période humide va de novembre à mars, tandis que la saison sèche

prédomine de juin à août. Ces variations saisonnières des précipitations sont importantes pour la gestion des ressources en eau et les pratiques agricoles dans la région.

Tab. 20 : La Pluviométrie mensuelle moyenne à Guelma (Weather Spark, 2023).

	janv.	févr.	Mars	avr.	Mai	Juin	juil.	Août	sept.	oct.	nov.	déc.
Pluie	78,2	66,9	61,3	56,5	42,5	20,8	7,1	17,1	40,4	52,2	64,6	75,2
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m	mm	mm	mm	mm	mm

6.4 Humidité

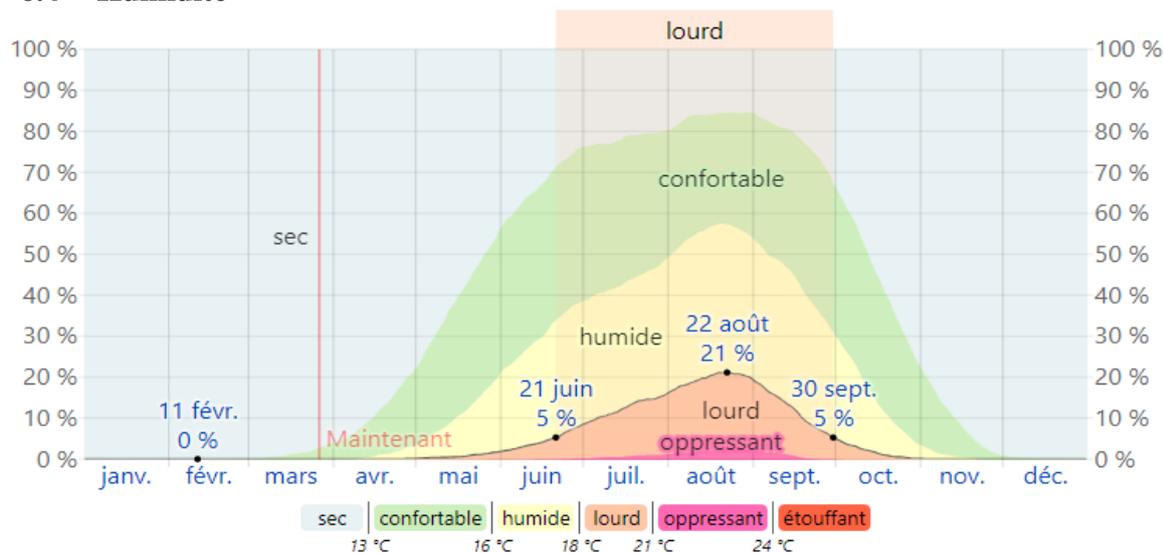


Fig. 50 : Les valeurs d'humidité relative à Guelma (Weather Spark, 2023).

L'étude des valeurs d'humidité relative à Guelma tout au long de l'année, comme illustré dans la figure 50 (Weather Spark, 2023), met en lumière des variations climatiques importantes qui influencent tant le confort thermique des habitants que les conditions environnementales de la région.

- Période Sèche** : De janvier à mars, Guelma traverse une phase relativement sèche avec des taux d'humidité inférieurs à 10 %. Durant cette période, le climat est caractérisé par une faible humidité, créant des conditions favorables pour les activités en plein air et réduisant les risques de moisissure et de détérioration des matériaux de construction. Ces mois sont souvent perçus comme les plus agréables, car les températures modérées combinées à une faible humidité permettent un confort thermique optimal.
- Transition vers une Humidité Confortable** : À partir du mois d'avril, on observe une augmentation progressive de l'humidité, qui atteint un niveau de confort maximal en juin, avec des taux d'humidité variant entre 20 % et 50 %. Cette période est particulièrement propice aux activités agricoles, car les conditions de croissance des

plantes sont idéales. En effet, l'humidité modérée, combinée aux températures printanières, favorise une croissance végétale saine sans trop de stress hydrique.

Le 21 juin marque un pic de confort avec 5 % d'humidité relative, signalant une transition vers des mois plus humides. Entre juillet et août, l'humidité continue de croître, atteignant des niveaux significativement plus élevés. Au 22 août, l'humidité relative grimpe à 21 %, signalant le début de la période la plus humide de l'année.

- **Période d'Humidité Oppressante à Étouffante** : Durant le mois d'août, les niveaux d'humidité atteignent des seuils lourds et oppressants, dépassant fréquemment les 50 %. Combinée à des températures estivales élevées, cette augmentation de l'humidité crée des conditions de chaleur intense et d'inconfort thermique, souvent décrites comme étouffantes. Cette période exige des stratégies de refroidissement efficaces, telles que l'utilisation de climatiseurs et de ventilateurs, pour maintenir un environnement intérieur vivable.
- **Retour aux Conditions Sèches** : À partir d'octobre, l'humidité commence à diminuer, ramenant progressivement les conditions à des niveaux plus confortables avant de retrouver une faible humidité en novembre et décembre. Cette réduction de l'humidité marque le retour des conditions climatiques plus sèches et agréables, typiques des hivers méditerranéens.
- **Implications et Gestion** : Ces fluctuations saisonnières de l'humidité relative à Guelma ont des répercussions importantes sur plusieurs aspects de la vie locale.

6.5 La vitesse de l'air

Cette partie traite du vecteur vent moyen horaire (vitesse et direction) à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol. On observe une variation significative de la vitesse du vent, avec une période de vents plus forts et une période de vents plus faibles (fig.51).

- **Période venteuse** : De novembre à avril, les vitesses de vent sont plus élevées, dépassant les 12,6 km/h. Le mois de décembre est particulièrement venteux, avec une vitesse moyenne atteignant 14,4 km/h.
- **Période moins venteuse** : De mai à octobre, les vitesses de vent diminuent, avec un minimum en août où la vitesse moyenne est de 10,7 km/h.

Cette variation indique que la période hivernale et le début du printemps sont les plus venteux à Guelma, tandis que l'été est caractérisé par des vents plus modérés

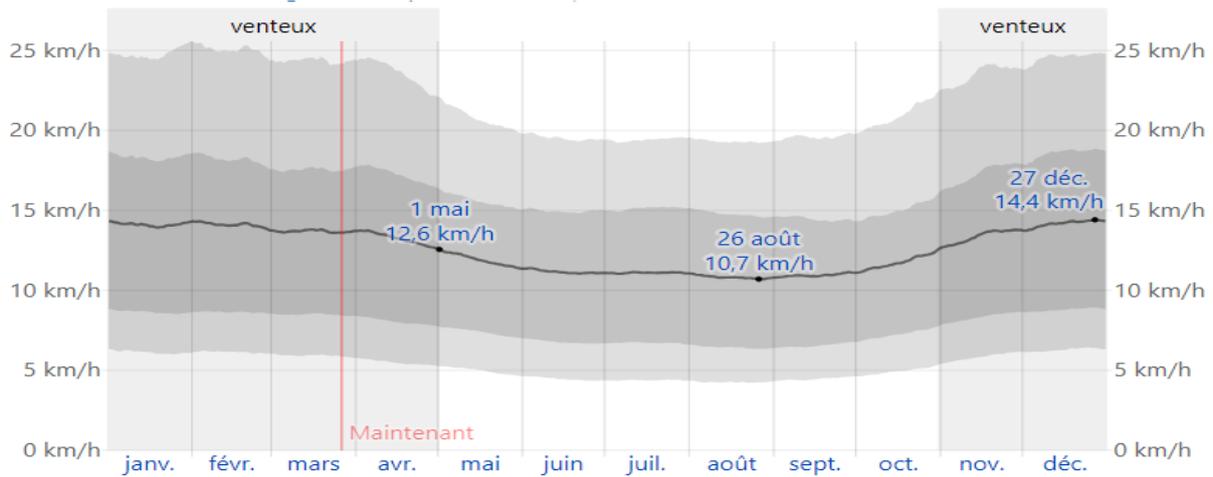


Fig. 51 : La vitesse moyenne du vent à Guelma (Weather Spark, 2023).

L'analyse des directions du vent à Guelma, présentée dans la figure 52 (Weather Spark, 2023) montre des variations significatives tout au long de l'année, influençant les conditions climatiques locales et les activités humaines.

- **Variations Saisonnières :** En janvier, février et mars, les vents dominants proviennent majoritairement de l'ouest. Cette orientation des vents apporte généralement de l'air plus frais et humide, influençant les températures hivernales et contribuant à des conditions plus confortables. La dominance des vents d'ouest durant cette période peut également avoir un impact sur les pratiques agricoles, en favorisant la dispersion des polluants atmosphériques et en améliorant la qualité de l'air.

À partir d'avril et jusqu'à la fin de l'été, les vents commencent à changer de direction. En avril et mai, une transition progressive vers des vents provenant du nord et de l'est est observée. Ces vents apportent souvent de l'air sec et chaud, contribuant à l'augmentation des températures printanières et estivales. Cette transition peut être critique pour l'agriculture, nécessitant des ajustements dans les pratiques d'irrigation pour compenser l'évaporation accrue.

- **Période Estivale :** Durant les mois de juin, juillet et août, les vents de direction est et sud deviennent prédominants. Cette période est marquée par une augmentation notable des températures et des conditions climatiques plus sèches. Les vents de sud, en particulier, sont connus pour apporter de l'air chaud du désert, accentuant les vagues de chaleur et créant des conditions de sécheresse. Pour les résidents et les agriculteurs, cette période nécessite des stratégies de gestion de l'eau efficaces pour atténuer les effets de la chaleur intense et préserver les ressources en eau.

- **Transition Automnale** : En septembre et octobre, une nouvelle transition des vents est observée, avec un retour progressif des vents d'est et de nord. Cette période de transition est caractérisée par une baisse des températures et une augmentation de l'humidité relative, apportant un soulagement après les mois chauds de l'été. Les vents d'est, en particulier, peuvent apporter des précipitations bienvenues, rechargeant les réserves d'eau et soutenant les cultures d'automne.
- **Retour des Vents d'Ouest** : Enfin, en novembre et décembre, les vents dominants reviennent majoritairement de l'ouest, complétant le cycle annuel. Cette réorientation des vents apporte de l'air plus frais et humide, marquant le début de la saison hivernale. Les vents d'ouest jouent un rôle crucial dans la régulation du climat local, en modérant les températures et en améliorant les conditions de vie des résidents.

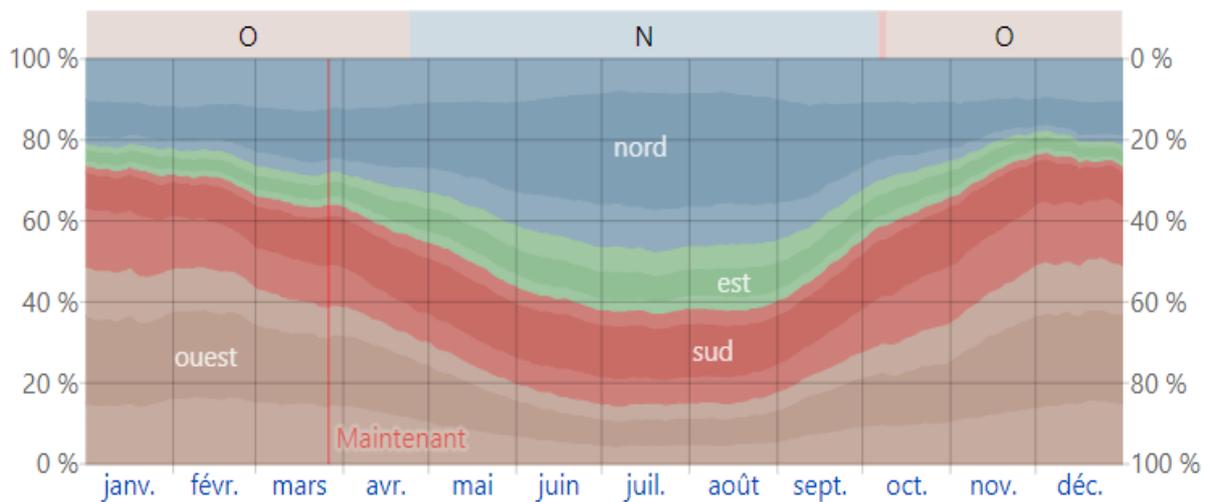


Fig. 52 : La direction du vent à Guelma (Weather Spark, 2023).

En utilisant les informations climatiques antérieures, il est possible de déterminer l'indice d'aridité (I) en utilisant la formule de MARTONNE : $I = P/T + 10$. Avec :

P	La précipitation moyenne annuelle (mm).
T	La température moyenne annuelle (C°).
$I < 5$	Climat hyperaride
$5 < I < 7,5$	Climat désertique
$7,5 < I < 10$	Climat steppique
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$20 < I < 30$	Climat tempère

Tab. 21 : Calcul de l'indice d'aridité de la ville de Guelma (Auteur, 2024).

Température (C°).	Précipitation (mm)	Indice d'aridité	Type de Climat
17.25	48.56	12.81	Climat semi-aride

Section II : Les complexes touristiques de la ville de Guelma

1. Critère de choix de secteur tertiaire

1.1 Tertiaire

Le secteur du bâtiment, en particulier le secteur résidentiel, est le principal contributeur à l'augmentation de la consommation d'énergie, ce qui conduit à une sous-estimation du secteur tertiaire. Cette tendance a provoqué une augmentation significative de la consommation d'énergie dans le secteur tertiaire, où les bâtiments jouent un rôle majeur en tant que grands consommateurs d'énergie et contributeurs importants aux émissions de CO₂. Il est impératif d'engager ce secteur afin de promouvoir une transition vers un modèle de développement centré sur l'efficacité énergétique. Dans cette optique, la LTECV (Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte) exige la supervision et la diminution de la consommation d'énergie des bâtiments à partir de 2021, visant à réduire de 60 % la consommation énergétique d'ici 2050 par rapport à 2010, ce qui encouragera un secteur plus respectueux de l'environnement.

1.2 Les complexes touristiques

Nous avons choisi de promouvoir le secteur touristique en prenant en considération le contexte économique actuel en Algérie, caractérisé par la nécessité de diversifier les sources de revenus au-delà des hydrocarbures, en accordant une attention particulière au développement de l'industrie du tourisme. Cette contribution pourrait jouer un rôle significatif dans l'amélioration du développement économique du pays (Kaoula, 2017). Il est impératif que cette industrie soit en conformité avec les principes de durabilité environnementale afin de devenir une réelle source de profits pour notre pays. C'est dans cette perspective que nous avons sélectionné ce thème, qui vise à intégrer nos équipements touristiques dans une approche environnementale axée sur la réduction des émissions de carbone.

2. Guelma et ses opportunités touristiques et thermales

La région de Guelma offre de vastes opportunités dans le secteur du tourisme qui pourraient potentiellement engendrer des revenus significatifs pour la wilaya. Dans ce domaine, elle présente de multiples opportunités, notamment des activités thermales, historiques et culturelles (vestiges, ruines, monuments, etc.), ainsi qu'un patrimoine naturel abondant et varié.

La Wilaya de Guelma se distingue par sa variété importante de sources thermales exceptionnelles, caractérisées par leur température, leur débit d'eau et leurs propriétés

thérapeutiques. Ces sources présentent une variation régionale en raison de la composition lithologique des formations géologiques qu'elles parcourent.

La circulation de l'eau à travers l'ensemble du territoire de l'État se fait à une vitesse de 127 litres par seconde, avec des variations de température allant de 34 à 97 degrés Celsius.

La Wilaya de Guelma compte officiellement 13 sources thermales, parmi lesquelles 12 sont exploitées selon des méthodes modernes, tandis que les autres sont utilisées de manière traditionnelle. Les cinq municipalités thermales incluent les établissements thermaux suivants : Hammam Ouled Ali à Héliopolis, Hammam Debagh, Hammam de Ain Larbi, Hammam Nbails et Hammam de Bouhachana. Ces plateformes sont spécifiquement élaborées pour la réhabilitation physique, le tourisme médical, la détente, les loisirs et les activités touristiques, entre autres.

Grâce à ces ressources, Guelma s'est affirmée comme un centre majeur de tourisme thermal à l'échelle nationale, attirant chaque année plus de 300 000 visiteurs vers ses stations thermales et ses bains (**portail officiel de la ville de Guelma, 2022**).

2.1 Zone de hammam Debagh et ses complexes

Cet endroit est renommé pour ses sources thermales aux propriétés médicinales, ce qui le rend attractif pour les visiteurs tant nationaux qu'étrangers. Les sources thermales, dont 50% se trouvent au-dessus du plateau de la cascade, fournissent une eau exceptionnellement chaude pouvant atteindre 97 degrés Celsius, ce qui les classe comme les deuxièmes plus chaudes au monde après celles du Geyser en Islande. Depuis les temps anciens, ces ressources ont été utilisées, avec les Romains construisant un complexe thermal connu sous le nom d'Aquae Thibilitanae sur le site. Pendant la période coloniale, la création de la station thermale Hammam Meskhoutine a été entreprise, laquelle incluait un établissement hôtelier, des bungalows, un parc public, un établissement hospitalier militaire et des thermes traditionnels. Suite à l'accession à l'indépendance de l'Algérie, le secteur du tourisme thermal a été développé à travers la mise en place du complexe touristique thermal de Hammam Chellala (fig.53), qui s'est particulièrement spécialisé dans le tourisme médical et de loisirs (**DTA, 2022a**).



Fig. 53 : Le complexe hammam Chellala à Guelma (Douakha, 2022).

Dans la région, on assiste à une dynamique croissante dans le secteur du tourisme avec l'émergence de nombreux complexes touristiques et hôtels privés. Certains de ces établissements sont déjà opérationnels, tandis que d'autres sont encore en phase de construction. Parmi les projets en cours, on peut mentionner le complexe touristique Djihane, qui propose une large gamme d'activités récréatives et de services hôteliers de luxe.

L'hôtel Ben Nadji, un autre projet emblématique, vise à offrir une expérience unique en combinant hébergement de qualité et activités de bien-être. Un projet de résidence touristique comprenant un centre thermal est également en développement, ciblant les visiteurs en quête de relaxation et de soins de santé. En outre, un projet d'hôtel avec un centre thermal intégré est en cours de réalisation, visant à attirer une clientèle intéressée par les séjours de détente et de remise en forme.

Cette expansion touristique illustre non seulement l'attrait croissant de la région en tant que destination touristique, mais aussi l'engagement des investisseurs à diversifier et enrichir l'offre touristique locale. Ces projets sont conçus pour répondre aux besoins variés des touristes modernes, en mettant l'accent sur le confort, le bien-être, et les activités de loisirs.

En conclusion, le développement de ces complexes et hôtels représente une avancée significative pour l'économie locale, créant des emplois et stimulant l'activité économique dans la région. Cette tendance souligne également l'importance de l'investissement dans le secteur touristique pour renforcer l'attractivité de la région et offrir des expériences uniques aux visiteurs.

2.2 Zone de hammam Ouled Ali et ses Complexes

En raison de sa localisation stratégique en bordure d'une chaîne de montagnes pittoresque et de la présence d'eaux fraîches et thermales, cet endroit attire de nombreux visiteurs en

provenance de différentes wilayas du pays, cherchant détente et divertissement. Sa réputation en tant que centre de tourisme thermal de la wilaya est bien établie, notamment durant les saisons hivernale et printanière, qui sont particulièrement favorables au tourisme thermal.

Hamam Ouled Ali compte quatre sources thermales dont la température avoisine les 57°C. Ses propriétés chimiques et physiques ainsi que sa haute teneur en magnésium, sodium, sulfate, calcium et potassium la distinguent.

La région compte des établissements touristiques privés tels que les complexes El-Baraka et Bouchahrine, qui sont reconnus comme étant parmi les principaux centres thermaux du pays. Les visiteurs ont accès à des services de haute qualité dans les deux établissements, comprenant l'hébergement, la restauration, ainsi qu'une gamme de soins thermaux tels que l'hydromassage, la respiration et l'inhalation, les massages, la thérapie mécanique et la thérapie physique.

Le complexe El Baraka est composé d'un hôtel de 90 chambres, offrant une capacité de 167 lits, une piscine, un centre médical, 112 salles de bain, une salle de conférence pouvant accueillir 250 personnes, un restaurant de 200 places, et une extension comprenant un hôtel, des bungalows (33 au total) offrant 116 lits, ainsi qu'un restaurant et une cafétéria (DTA, 2022b).



Fig. 54 : Le complexe touristique El Baraka (DTA, 2022b).

Le complexe Bouchahrine comprend : un hôtel avec 90 chambres, 64 bungalows, 237 lits, un centre médical, 90 salles de douche, une piscine, un restaurant pour 120 personnes, un amphithéâtre pour 300 personnes et un restaurant.



Fig. 55 : Le complexe touristique Bouchahrine (DTA, 2022b).

3. Identification du cas d'étude

Nous avons choisi le complexe touristique « el baraka » qui se compose de deux parties (fig. 56), selon les critères suivants :

- L'implantation : il fallait de choisir un cas d'étude loin des facteurs naturels (cascade) et du transport (voie principale).
- Année de réalisation : dont il était souhaitable d'être construit simultanément avec la loi de la stratégie.
- Les matériaux de construction.
- Le choix d'approvisionnement énergétique.

Les critères précédents sont liés à l'extension de la nouvelle partie (partie B) du complexe El Baraka qui est construite en 2017.

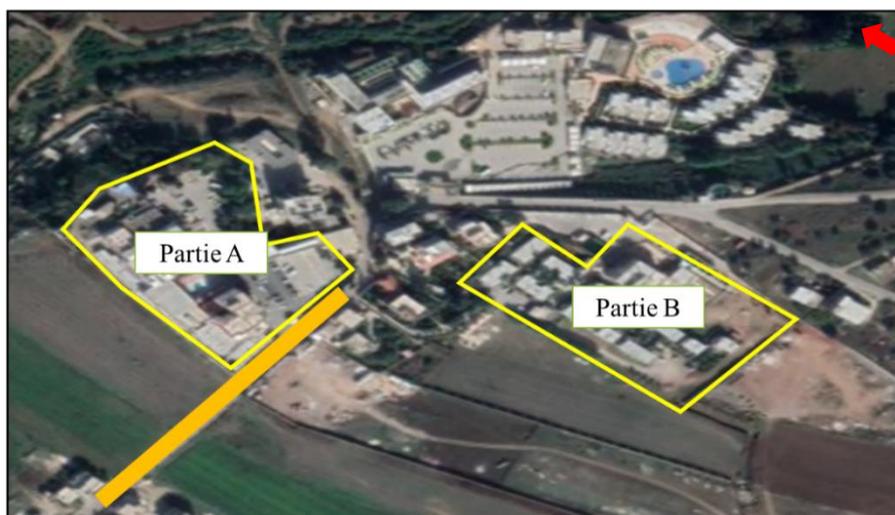


Fig. 56 : Vue aérienne du complexe touristique « El Baraka » (Google Earth, 2002, traité par auteur).



Fig. 57 : L'extension (partie B) du complexe touristique « El Baraka ».

3.1 Localisation de Cas d'étude

Le complexe « El Baraka » se situe à Hammam Ouled Ali qui se trouve à l'ouest de la commune d'Héliopolis, à 17 km au nord-ouest de Guelma, sur la route nationale n°8 qui relie les wilayas de Guelma et Skikda (fig. 58).

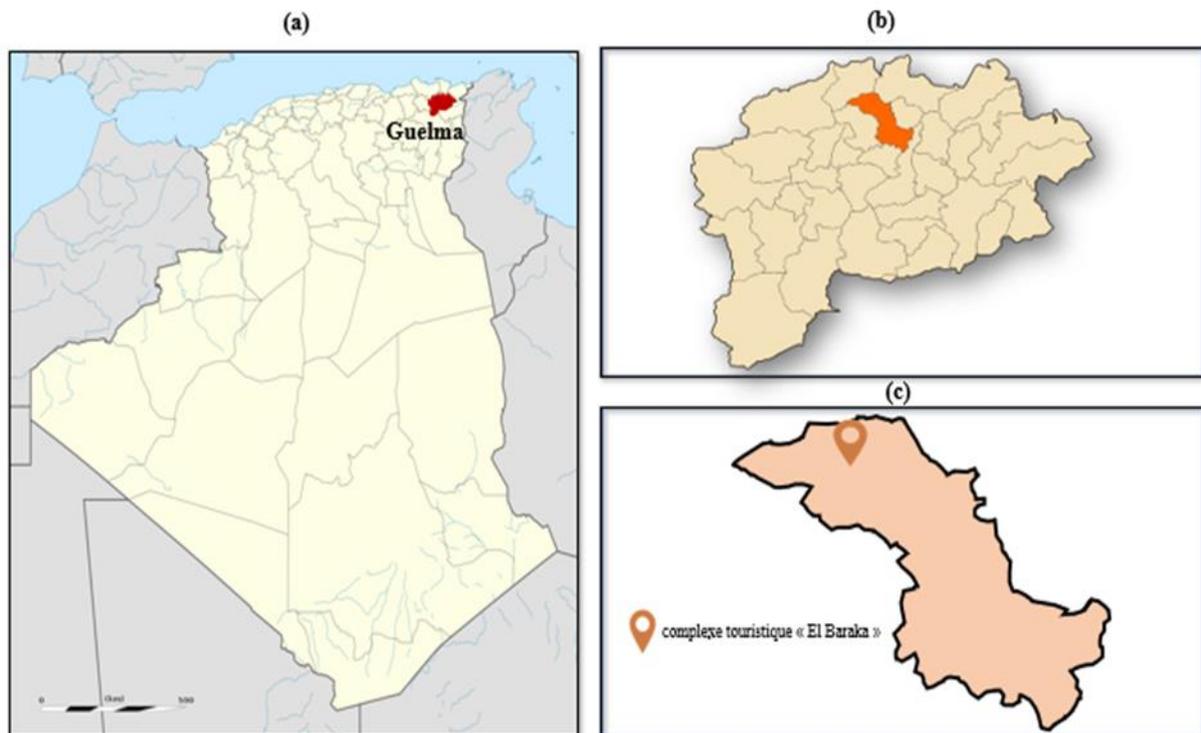


Fig. 58 : (a) situation de la ville de Guelma sur la carte de l'Algérie ; (b) situation de la commune d'Héliopolis sur la carte de la ville de Guelma ; (c) situation du complexe touristique sur la carte de la commune d'Héliopolis.

3.2 Description de Cas d'étude

Selon l'architecte du projet d'extension, le programme de cet ensemble s'articule sur deux points essentiels : le confort et le repos. C'est dans cette optique qu'ils ont projeté des bungalows en deux types : le F3 et le F2 pour répondre à une clientèle diverse tout en proposant des bains sur place sans se déplacer et pour cela ils ont créé des cabines intégrées dans les appartements. La présence d'un hôtel sur les lieux donne le choix aux visiteurs de gérer leur séjour dans les meilleures conditions.

Pour les visiteurs d'une journée une série de cabines individuelles est à leur disposition. Le projet est conçu comme une entité complète et indépendante du complexe.

La composition architecturale du plan d'ensemble a fait ressortir l'hôtel en premier plan avec l'entrée du hammam en cabines qui bénéficie d'un espace vert de détente. En retrait, on trouve l'entrée des bungalows qui gardent le caractère intime de la clientèle.



Fig. 59 : Plan d'ensemble du complexe « El Baraka ».

- **Les cabines de hammam**

Le bloc des cabines de hammam est en forme de L en R+1 avec au rez de chaussée un espace central qui abrite les salles d'attentes et la réception. Les cabines individuelles de hammam occupent les deux ailes avec des sanitaires.

On compte 19 cabines par aile qui fait un total de 38 cabines. Le 1er étage sur la partie centrale uniquement est constitué de chambres pour les personnels et sanitaires pour un total de 06 chambres.

- **Bungalows**

L'intégration des cabines de hammam dans les appartements assurant une cure sur place sans se déplacer est la touche fine du projet qui répond à un besoin réel d'une clientèle diverse. Ainsi des appartements de type F3 et F2 sont regroupés pour former des bungalows (fig.60).

1. **Appartement en F3 (74,17 m²) :**

Il se compose d'un espace central qui fait office de hall d'entrée s'ouvrant sur la cuisine et le séjour. De cet espace on accède aux chambres, au sanitaire et douche ainsi qu'à la cabine de hammam. La présence d'une terrasse et un petit jardin juste à l'entrée du logement offre aux clients un coin de paix et de contemplation. Les appartements en F3 occupent le rez de chaussée des bungalows et sont soit jumelés ou isolés pour un total de 21 F3.

2. **Appartement en F2 (59,17 m²) :**

C'est la projection verticale des F3 avec une chambre en moins. On accède au logement par un escalier individuel qui arrive sur une grande terrasse juste à l'entrée. Les appartements en F2 occupent le 1er étage des bungalows et sont soit jumelés ou isolés pour un total de 12 F2.



Fig. 60 : (a) Appartement en F3 en RDC, (b) Appartement en f2 en 1^{er} étage, (c) Façade principale du bungalow.

- **Hôtel**

L'hôtel est composé d'un bâtiment de trois (03) niveaux et un sous-sol. On trouve au rez de chaussée la réception et la salle d'attente devant l'ascenseur, une boutique à usage multiple,

un restaurant extensible d'un salon d'honneur, des sanitaires hommes et femmes et un coin de prière. Une liaison directe du restaurant au sous-sol qui abrite la cuisine et les dépôts, ainsi qu'à l'extérieur du bâtiment dans sa partie arrière. Le premier étage est conçu de telle sorte que sa partie centrale est vide et sur lequel s'articule un dégagement qui distribue les chambres qui sont au nombre de neuf (09) et deux (02) studios. Sur l'un des côtés du vide ainsi créé, l'ascenseur assure la circulation verticale avec au-devant un escalier qui renforce cette fonction. Le deuxième et le troisième étage sont la réplique du premier pour donner au final un total de 27 chambres et 06 studios.

La proximité d'hôtel et Hammamet donne le choix aux visiteurs de gérer leur séjour dans les meilleures conditions, ce qui rend ce type d'hébergement la partie la plus fréquente du complexe, et ce qui justifie notre choix de cas d'étude.

Parmi les chambres de cet hôtel, nous avons choisi une chambre parmi les plus demandées par les touristes grâce à ses vues panoramiques offertes par les fenêtres des deux côtés permettant aux visiteurs de profiter pleinement de l'environnement extérieur. La chambre d'étude sélectionnée est située au troisième étage et orientée vers le sud-ouest (fig. 61).



Fig. 61 : (a) situation d'hôtel sur le plan de masse du complexe touristique ; (b) plan du sous-sol ; (c) plan du RDC ; (d) plan du 1er, 2eme et 3eme étage ; (e) plan de la terrasse ; (f) façade principale ; (g) façade postérieure

On peut schématiser le processus de tout ce qui est mentionné dans cette partie concernant le choix de cas d'étude comme suit (fig.62).

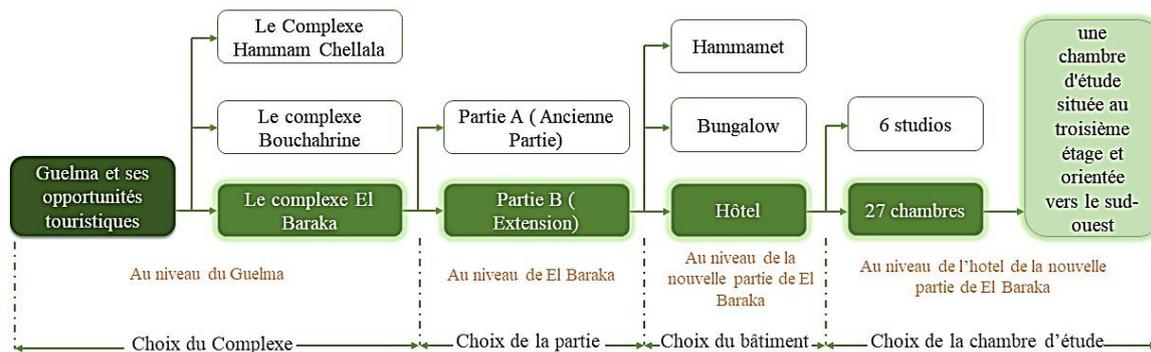


Fig. 62 : schéma récapitulatif du processus de choix de cas d'étude (Auteur, 2023).

Pour commencer, les plans et les détails d'exécution de l'hôtel ont été collectés en collaboration avec le bureau d'études. Par la suite, des visites sur site ont été organisées pour s'assurer de la conformité de l'exécution par rapport aux plans initiaux et aux modifications survenues durant la construction.

Afin d'initier la recherche, un document technique exhaustif concernant le bâtiment de type "hôtel" a été élaboré, comprenant :

3.2.1 Descriptif des matériaux de construction

- **Murs et cloisons**

Les murs extérieurs sont réalisés en briques, la pose de ces éléments est au mortier de ciment à joints alternés dans tous les sens.

Les parois séparatives à l'intérieur sont montées en briques creuses hourdées au mortier de ciment avec joints alternés dans tous les sens. Ces joints entre briques sont pleins sur toute l'épaisseur des assises.

- **Les enduits**

Les enduits sont exécutés soit au mortier de ciment soit au mortier bâtard sur dégrossie au mortier de ciment soit entièrement au mortier bâtard ou au plâtre. D'une épaisseur variante entre 0,015 et 0,02m, ils sont toujours exécutés au moins en deux fois et comporteront : une sous-couche en dégrossie d'une épaisseur égale au 2/3 de l'épaisseur totale et tirée à la règle, une couche de finition parfaitement exécutée.

Les enduits au plâtre sous plafond et sous lattis sont exécutés d'une couche de dégrossie au plâtre gris d'une épaisseur de 2/3 de l'épaisseur totale et une couche de finition soigneusement exécutée au plâtre blanc.

- **La menuiserie**

La menuiserie se compose d'une combinaison de fenêtres en aluminium et de portes en bois.

- **Carrelage**

Les carreaux de granito sont posés en revêtement de sol avec des joints droits dans les deux sens, ne dépassant pas deux (02) mm d'épaisseur, et fixés avec un bain de mortier de ciment. Tous les joints des revêtements sont uniformes et remplis avec un coulis de mortier de ciment de couleur grise, composé d'un mélange de ciment et de sable très fin selon un rapport spécifique.

- **Isolation**

Les façades de l'édifice présentent une uniformité dans leur conception, avec des éléments appliqués de manière homogène sur toutes les orientations. Aucune technique spécifique n'est utilisée pour traiter les orientations défavorables, ce qui simplifie la construction mais peut ne pas optimiser la performance thermique.

Les murs extérieurs se composent de doubles parois en briques creuses. La paroi interne mesure 15 cm d'épaisseur et la paroi externe 10 cm, séparées par une lame d'air de 5 cm. Cette configuration assure une isolation basique.

- **Dalles et planchers**

Les dalles ferrillées reposent sur le sol ont un blocage support de 0,20m, les planchers terrasses sont réalisés au moyen d'hourdis en béton de ciment et de poutrelles en béton armé coulé sur place en même temps que la dalle de compression de 0,05 m d'épaisseur.

- **Etanchéité**

Elle est composée d'une barrière pare-vapeur composée d'un enduit au flintkote, d'enduit d'application à chaud et d'un feutre bitumé 36s. Une isolation thermique composée d'un enduit d'application à chaud et de plaque de liège de 5 cm d'épaisseur. D'une protection d'étanchéité en gravillon de 15/25 sur une épaisseur de 5cm les relevés d'étanchéité sont composés d'une couche de flintkote, d'un E.A.C et d'un paxalumin.

- **Structure de la construction**

La structure de la construction est du type traditionnel. Elle est constituée de poteaux et poutres avec un plancher en corps creux. La stabilité est assurée par des portiques et

chaînages. La liaison entre les différents niveaux est assurée par des escaliers à paillasse à volets ainsi qu'un ascenseur.

3.2.2 Description des équipements

Chaque chambre est pourvue d'équipements tels qu'un système de climatisation, une télévision, un mini-réfrigérateur, un réveil, ainsi que des lampes d'éclairage dont la quantité dépend des dimensions et de la superficie des chambres.

3.2.3 Description du système HVAC

En Algérie, en l'absence de réglementation nationale spécifique, les équipements de climatisation et de chauffage (HVAC) sont principalement régis par les normes internationales en matière de rendement et de puissance. Ces appareils, qu'ils soient importés ou fabriqués localement, dépendent souvent de composants et de moteurs provenant de l'étranger.

Le gaz naturel est largement utilisé comme combustible dans les systèmes de chauffage domestique, principalement en raison de ses performances fiables et de son coût économique. Ce choix est particulièrement avantageux lorsqu'il est combiné à des chaudières à condensation, qui fonctionnent à des températures basses ou moyennes.

Pour optimiser encore plus l'efficacité énergétique, certains systèmes utilisent la technologie DRV (Débit de Réfrigérant Variable) à trois tubes, qui permet la récupération de chaleur lorsque les conditions le permettent. De plus, les climatiseurs de type VRV (Volume de Réfrigérant Variable), souvent installés dans les fenêtres, sont couramment utilisés pour la climatisation en Algérie. Ces systèmes permettent une régulation précise et efficace de la température intérieure, tout en améliorant le confort des occupants.

En résumé, bien que la réglementation nationale sur les systèmes HVAC soit limitée, l'adoption des normes internationales et les progrès technologiques dans ce domaine permettent aux utilisateurs en Algérie de bénéficier de systèmes de chauffage et de climatisation efficaces et économes en énergie.

3.2.4 La Ventilation

L'orientation du bâtiment a été planifiée de sorte qu'il soit soumis aux vents du Sud pendant la saison printanière et estivale, alors que les vents dominants proviennent du Nord-Ouest en hiver. La stratégie de ventilation mise en œuvre repose sur la ventilation naturelle, qui tire parti des mouvements d'air extérieur afin de garantir une circulation efficace à l'intérieur de bâtiment.

3.3 Les scénarios d'usage

Pour construire une base de données complète et détaillée des usages au sein d'un bâtiment tertiaire, il est primordial de recenser exhaustivement tous les usages associés aux occupants des différentes pièces. Cette identification permet de cataloguer précisément les comportements et les habitudes d'utilisation de chaque espace.

Ces usages, qualifiés de « scénarios », sont répartis en six catégories distinctes (tab.22). Ces catégories sont cruciales pour comprendre le comportement énergétique des bâtiments. En effet, elles permettent d'évaluer de manière précise les émissions de polluants et leurs impacts sur l'environnement. L'analyse de ces scénarios aide à mieux gérer la consommation d'énergie et à mettre en place des stratégies d'optimisation pour réduire les émissions et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Tab. 22 : Description des scénarios d'usage.

Scénario	Description
Consigne de température	La température de consigne pour le chauffage et la climatisation est liée à la présence des occupants. Elle représente la plage de température souhaitée pour garantir un environnement confortable et sain, généralement entre 19°C et 26°C.
Taux d'occupation	Ce scénario décrit le nombre de personnes présentes, les conditions et la durée de leur présence dans la pièce étudiée. Il prend en compte les flux internes de chaleur et d'humidité générés par les occupants.
Puissance dissipée par les appareils électriques	L'objectif est de recenser les contributions internes de chaleur des équipements (éclairage, appareils électroniques, équipements informatiques, etc.), en tenant compte de leur puissance et de leur temps d'utilisation. Ce scénario est appelé 'scénario de puissance dissipée'.
Le scénario de ventilation	Le scénario de ventilation, défini par une zone thermique, sert de référence pour la ventilation, qu'elle soit interne ou externe. Il se caractérise par un débit nominal et une modulation horaire de ce débit exprimée en pourcentage.
Niveau d'éclairage	Ce scénario fixe le niveau d'éclairage en lux souhaité sur le plan de travail de base.
Les besoins en eau chaude sanitaire	Ce scénario répartit les besoins hebdomadaires en eau chaude sanitaire en fonction des heures, exprimés en litres d'eau à une température donnée, correspondant à la température moyenne d'utilisation finale. Ces besoins sont déterminés en fonction de la densité d'occupation et de l'utilisation du bâtiment.

Des détails supplémentaires concernant ces scénarios seront fournis dans la section dédiée aux simulations (chapitre V, section II).

Section III : Choix des Outils de Simulation

1. Présentation du logiciel « Pleiades »

Pleiades est un outil intégral destiné à la conception de bâtiments à haute performance énergétique et environnementale. Cet outil polyvalent permet d'effectuer divers calculs à partir de représentations graphiques ou de modèles numériques. Il inclut des fonctionnalités telles que la simulation thermique et énergétique dynamique, l'évaluation de la conformité réglementaire, la conception d'équipements, ainsi que l'évaluation de la qualité de l'air intérieur et l'analyse statistique.

En outre, Pleiades offre la possibilité d'effectuer une analyse du cycle de vie, ce qui permet d'évaluer les impacts environnementaux du bâtiment en complément des considérations énergétiques. Cet outil est reconnu pour sa capacité à fournir des données précises et fiables, facilitant ainsi la prise de décisions informées lors de la phase de conception (**Izuba énergies, 2017**).

Dans cette étude, nous avons utilisé une combinaison de tous les nouveaux logiciels d'énergie IZUBA. En effet, l'interface de la dernière version de logiciel Pléiades (version 5.23.4.4) est divisée en 6 modules : Bibliothèque, Modeleur (appelé ALCYONE pour l'ancienne version du logiciel), Résultats, Editeur (appelé COMFIE-PLÉIADES), BIM, et ACV EQUER (nova-EQUER). Il est important de noter que chacun a une fonction spécifique (fig.63). Selon Salomon (**Salomon et al., 2005**), Le logiciel du simulation Pléiades est fiable dans l'analyse du cycle de vie d'un bâtiment et d'un quartier.

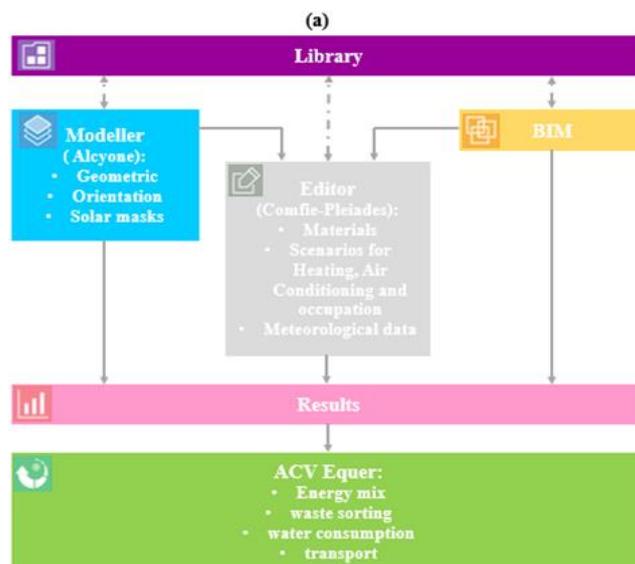


Fig. 63 : Présentation de la structure de Pleiades avec ses composants (auteur, 2023).

1.1.1 Bibliothèque

Ce module permet d'accéder à la bibliothèque complète de Pleiades, c'est-à-dire à tous les éléments utilisables par les différents éléments de Pleiades. Les éléments présents dans cette bibliothèque ne sont pas associés à un projet spécifique, mais peuvent être déplacés vers plusieurs projets ou variations.

L'utilisateur peut personnaliser la bibliothèque de Pleiades en ajoutant de nouveaux éléments au fur et à mesure de ses études. Cette bibliothèque est indépendante et spécifique à l'ordinateur où elle est installée. Ainsi, elle peut servir à créer n'importe quel projet sur l'ordinateur concerné (**Izuba énergies, 2023**).

1.1.2 Modeleur (Anciennement ALCYONE)

Le Modeleur a été développé dans le but de faciliter la modélisation des bâtiments. Grâce à cet outil, il devient envisageable de définir les paramètres géométriques du bâtiment, d'analyser les propriétés thermiques de chaque paroi, d'établir une classification par zones, et de définir efficacement les diverses configurations d'utilisation ainsi que les paramètres requis pour les calculs spécifiques offerts par Pleiades. La saisie peut être effectuée en utilisant un fond de plan (image ou fichier AutoCAD), en important une maquette numérique aux formats gbXML ou IFC (2x3 ou 4), ou en utilisant le plugin Pleiades du logiciel Revit.

Le logiciel de modélisation permet de visualiser en trois dimensions la disposition des éléments et de réaliser des calculs d'éclairage naturel, y compris le Facteur de Lumière du Jour (FLJ), pour les espaces intérieurs des bâtiments modélisés. En outre, il autorise l'initiation des calculs pour la simulation thermique et énergétique dynamique (**Izuba énergies, 2023**).

1.1.3 BIM

Le module Pleiades BIM constitue un instrument permettant l'importation d'un fichier au format gbXML ou IFC 4, sa conversion en un projet éditable dans Pleiades Éditeur, ainsi que l'ajout des détails thermiques (comme le zonage, les scénarios, etc.) avant d'initier les calculs (**Izuba énergies, 2023**).

1.1.4 Éditeur (Anciennement COMFIE- Pléiades)

Le module Editeur nous a permis de réaliser les différentes simulations thermiques et dynamiques du bâtiment (**Colombert et al., 2011; Riera Pérez & Rey, 2013**). Les résultats peuvent être analysés de manière détaillée selon la zone thermique ou la période considérée. Ce module est rarement utilisé de façon autonome, mais plutôt pour vérifier ou compléter une

saisie effectuée dans un logiciel de modélisation ou de maquette numérique (BIM) avant d'initier les calculs (**Izuba énergies, 2023**).

1.1.5 Résultats

Les résultats des calculs réalisés à partir du Modeleur, de l'Éditeur ou de Pleiades BIM sont disponibles dans la section "Résultats".

1.1.6 ACV EQUER (Anciennement nova-EQUER)

Développée en collaboration avec le Centre Efficacité Énergétique des Systèmes de Mines ParisTech, l'outil EQUER est utilisé pour cette évaluation (**Izuba énergies, 2023**).

EQUER permet de traiter les données relatives au chauffage et à la climatisation, qui sont générées par l'éditeur et ensuite transférées vers l'outil. Ce processus nécessite l'inclusion de données complémentaires telles que la composition du mix énergétique, les pratiques de recyclage des déchets, et les modes de transport des usagers.

L'outil effectue ensuite une analyse approfondie du cycle de vie, illustrant les résultats au moyen de graphiques en forme de radar. Ces graphiques facilitent la visualisation des divers impacts environnementaux et permettent une comparaison claire entre les différentes options d'un projet. Cette approche graphique rend les conclusions accessibles et compréhensibles, favorisant ainsi une prise de décision éclairée (**Nematchoua, Orosa, et al., 2019**).

2. Pléiades : un outil de simulation thermique dynamique STD

Les logiciels de simulation thermique dynamique (STD) offrent une évaluation plus précise des exigences énergétiques et du confort thermique des bâtiments comparativement aux méthodes conventionnelles basées sur des calculs mensuels ou écobilans (**Dakhia, 2019**).

Le logiciel Pleiades, anciennement désigné sous le nom de Comfie-Pleiades, a été évalué et validé en se basant sur le comparatif présenté ci-dessous pour un cas d'étude spécifique.

Dakhia (**Dakhia, 2019**) a mentionné que les logiciels présentent des écarts relativement modestes, avec une moyenne de 10 % par rapport à DEO-2 et Serires, et de 16 % par rapport à TRNSYS (fig. 64). Les besoins en climatisation varient de manière similaire (15 %) entre TRNSYS et Serires, alors que DOE-2 affiche des exigences nettement inférieures aux autres logiciels (fig. 65).

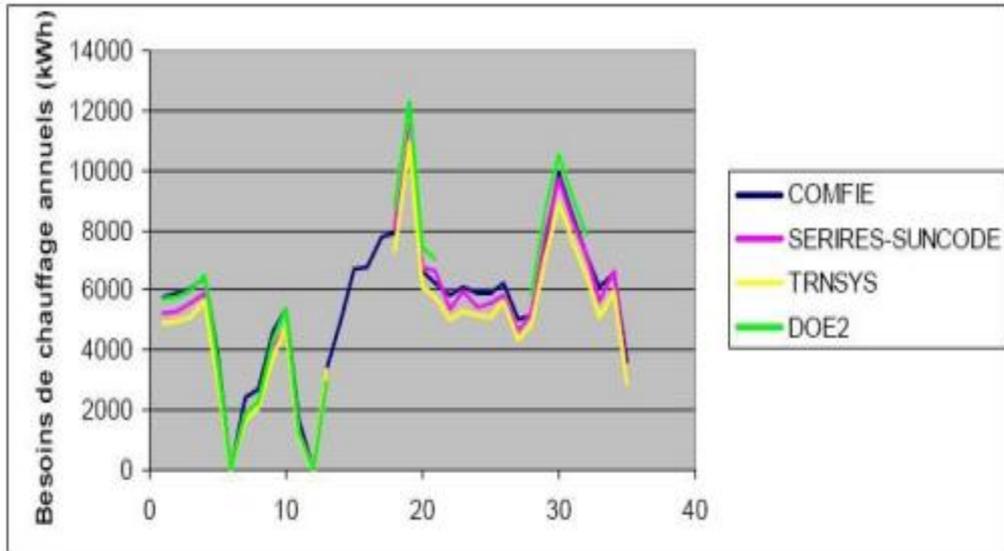


Fig. 64 : Résultats de comparaison des besoins annuels en chauffage (Peuportier, 2005).

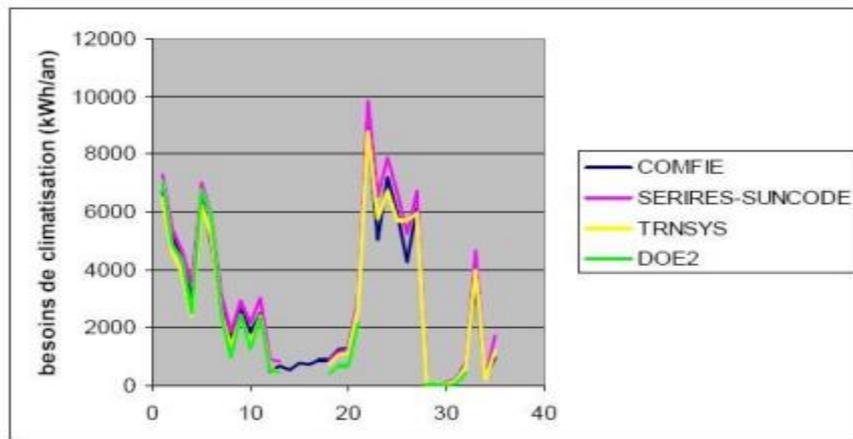


Fig. 65 : Résultats de comparaison des besoins annuels en climatisation (Peuportier, 2005).

2.1 Principe de calcul

La simulation thermique est une approche analytique employée afin d'analyser les fluctuations de température et les exigences énergétiques d'une construction pendant une période spécifique. Dans cette méthode, il est fréquent de subdiviser le bâtiment en zones thermiques, lesquelles se distinguent par une température constante et uniforme. Ces zones sont délimitées par des ensembles de parois pouvant regrouper plusieurs espaces.

2.1.1 Transfert de chaleur dans les parois extérieures

Une analyse thermique réalisée à l'échelle d'une surface absorbante permet de mesurer la quantité de rayonnement solaire absorbée par les parois opaques, en prenant en considération le coefficient d'absorption de cette surface. Cette analyse permet de différencier le rayonnement solaire absorbé qui traverse la surface externe du mur de celui qui est dissipé

vers l'environnement extérieur, par le biais de processus radiatifs et convectifs. Lorsque la paroi est isolée, c'est-à-dire lorsqu'une couche d'isolant est présente, cette quantité est considérablement diminuée.

2.1.2 Coefficients de transfert superficiel (h_{int} et h_{ext})

Les coefficients globaux sont calculés pour chaque paroi en prenant en compte à la fois son angle d'inclinaison et son orientation par rapport au vent pour les phénomènes de convection, ainsi que ses caractéristiques optiques pour les échanges radiatifs. Les coefficients de transfert globaux, qui sont déterminés pour la surface externe des parois, sont évalués selon trois niveaux d'exposition au vent : normal, abrité et sévère.

2.1.3 Calcul des sollicitations de flux solaire

Pour évaluer les flux solaires sur les surfaces de bâtiments, les données climatiques sont analysées en détail, prenant en compte des plans avec des orientations et des inclinaisons spécifiques.

Les obstacles à la pénétration du rayonnement solaire, tels que les bâtiments voisins et la végétation, sont classifiés en deux catégories : les masques "lointains" et les masques "intégrés". Les masques intégrés incluent des éléments architecturaux comme les balcons, les auvents et les avancées de toit, qui peuvent moduler la quantité de rayonnement direct reçu par les surfaces vitrées.

Pour chaque zone du bâtiment, une demande spécifique en fonction du rayonnement solaire entrant est générée. Cela inclut la prise en compte du pourcentage d'occultation des fenêtres, déterminé par un scénario horaire quotidien. Par exemple, pendant les heures de pointe solaire, les éléments d'ombrage peuvent réduire considérablement la charge thermique.

De plus, le coefficient de transmission à travers la végétation est évalué pour comprendre l'effet des arbres et des plantations sur la réduction des gains solaires. Le facteur solaire du vitrage, qui indique la fraction de l'énergie solaire incidente qui traverse le vitrage, est également calculé pour chaque type de fenêtre utilisé dans le bâtiment.

2.1.4 Sollicitation de puissance interne

Les sollicitations internes influencent une multitude de facteurs dans un bâtiment, affectant ainsi les performances énergétiques globales. Ces sollicitations incluent :

- **Systèmes de climatisation et de chauffage** : La demande en puissance de ces systèmes est directement impactée par les sollicitations internes, nécessitant une régulation précise pour maintenir un environnement confortable.
- **Dissipation de puissance à l'intérieur de la zone thermique** : Cette dissipation concerne l'énergie thermique émise par les appareils électriques, l'éclairage et autres équipements présents dans les espaces intérieurs.
- **Chaleur générée par les occupants** : La présence humaine contribue de manière significative aux gains thermiques internes. Chaque occupant dégage de la chaleur corporelle, ce qui doit être pris en compte dans le calcul des charges thermiques.
- **Proportion variable de ventilation extérieure** : La ventilation est ajustée en fonction des sollicitations internes pour garantir une qualité de l'air optimale. La proportion de l'air extérieur introduit varie pour répondre aux besoins en ventilation et en refroidissement.
- **Mouvements d'air entre les zones par convection naturelle** : Les différences de température entre les zones créent des mouvements d'air naturels, influençant les distributions thermiques internes. Ces mouvements sont essentiels pour la redistribution de la chaleur et la ventilation passive.
- **Variations des pertes de chaleur dues aux changements d'occultation** : Les modifications dans l'occultation des fenêtres, causées par l'ouverture et la fermeture des stores ou rideaux, affectent les pertes de chaleur. Ces variations doivent être intégrées dans les calculs pour une évaluation précise de la demande énergétique.

En intégrant ces différents aspects, une analyse détaillée des sollicitations internes permet d'optimiser les systèmes de gestion énergétique, améliorant ainsi l'efficacité globale du bâtiment. Cette approche holistique est essentielle pour concevoir des bâtiments durables et économes en énergie.

2.1.5 Intégration et résultats

Lors de la simulation, diverses mesures sont effectuées pour évaluer les performances énergétiques et le confort thermique des bâtiments. Ces mesures incluent :

- **Dépenses énergétiques pour le chauffage et la climatisation** : Les coûts énergétiques associés au maintien des températures souhaitées dans les différentes zones du bâtiment sont calculés. Cette évaluation permet de comprendre les besoins énergétiques saisonniers et de jour comme de nuit.

- **Températures maximales, minimales et moyennes.**
- **Puissances thermiques** : Des données sont essentielles pour dimensionner correctement les équipements HVAC et optimiser leur fonctionnement.

Cette approche permet à élaborer des stratégies d'optimisation énergétique, améliorer le confort des occupants et réduire les coûts d'exploitation.

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé trois éléments essentiels pour notre recherche : la présentation de la ville de Guelma, l'étude du complexe « El Baraka » en tant que cas d'étude particulier et la présentation du logiciel « Pléiades » utilisé pour cette analyse.

- La ville de Guelma a été étudiée dans le contexte de son environnement géographique et climatique, mettant en lumière des données cruciales influençant la planification et la maintenance des infrastructures dans cette localité.
- Par la suite, nous avons approfondi l'étude de la partie du complexe « El Baraka », en soulignant ses éléments architecturaux et ses systèmes énergétiques. Après avoir examiné attentivement ce cas d'étude, nous avons pu approfondir notre compréhension des liens entre la conception du bâtiment, son utilisation réelle et son influence sur l'environnement.
- En définitive, Pleiades a été désigné comme l'outil de simulation employé dans cette étude. Ce logiciel propose divers modules qui permettent d'accéder à des fonctionnalités avancées pour la simulation thermique et énergétique dynamique, l'optimisation des systèmes, ainsi que l'évaluation des performances environnementales des bâtiments. Son intégration dans notre étude assure une méthodologie rigoureuse visant à diminuer les émissions et à limiter les impacts environnementaux liés à la consommation d'énergie tout au long de la durée de vie du bâtiment.

Maintenant que nous avons combiné ces éléments, nous sommes en mesure de commencer la phase d'analyse approfondie en intégrant les données climatiques locales, les caractéristiques du bâtiment et les capacités du logiciel afin de formuler des recommandations pertinentes pour améliorer les performances énergétiques et environnementales du bâtiment.

**CHAPITRE V : ANALYSE DE CYCLE DE VIE D'UN BATIMENT HOTELIER :
OPTIMISATION THERMIQUE, ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENTALE**

Introduction

L'analyse de cycle de vie réalisée dans cette étude englobe l'ensemble du bâtiment de l'hôtel du complexe touristique "El Baraka". Notre objectif est de mener une analyse thermique, énergétique, et plus spécifiquement environnementale, d'une chambre de cet hôtel, en vue d'optimiser ces aspects et d'examiner diverses alternatives et stratégies pour réduire les impacts environnementaux du bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie, tout en assurant un confort intérieur optimal.

Étant donné que les bâtiments hôteliers sont conçus pour accueillir et héberger les occupants dans des conditions optimales tout au long de leur séjour, nous avons concentré notre attention sur les exigences et le bien-être des occupants dans les chambres. Dans cette optique, la première section de ce chapitre présentera une campagne d'enquête et de mesures, en détaillant le protocole utilisé, les résultats obtenus et leurs interprétations.

La deuxième section de ce dernier chapitre se penchera sur l'évaluation thermique, énergétique et environnementale de cas d'étude à travers plusieurs séries de simulations. Ces simulations visent à répondre à la problématique posée et à développer une variante bas carbone, avec une amélioration significative du bilan énergétique et environnemental.

Les résultats de ces séries de simulation seront présentés dans la dernière section, en commençant par l'état initial du bâtiment, puis en exposant chaque niveau d'amélioration étudié. Nous analyserons également les niveaux de confort ou d'inconfort associés à chaque scénario.

Chaque consommation d'énergie entraîne une empreinte environnementale spécifique, qui sera évaluée à travers 12 indicateurs d'impacts environnementaux, tant au niveau global qu'à chaque étape du cycle de vie du bâtiment.

Section I : Protocole de la Campagne de mesure et d'enquête

1. Protocole de la campagne de mesures de la qualité du confort

Pour mieux comprendre le niveau de confort dans notre chambre d'étude, nous avons décidé de mener une campagne de mesures. Cette campagne évalue le confort hygrothermique et aéraulique à cinq moments différents de la journée (8h, 12h, 16h, 20h et 00h). Les paramètres mesurés incluent la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air. Le tableau

suivant (Tab. 23) montre un exemple de la fiche de mesures de ces paramètres.



Fig. 66 : Schéma de la campagne de mesure et les aspects pris en compte par notre méthode (Auteur, 2023).

Tab. 23 : Echantillon de la fiche de mesures (Auteur, 2022).

Les paramètres mesurés		8h		12h		16h		20h		00h	
		Intér	Extér								
Humidité %	Moy										
	Min										
	Max										
Température C°	Moy										
	Min										
	Max										
Vitesse de l'air m/s											

Avant de débiter la campagne de mesures, nous avons utilisé le fichier climatique dans le logiciel Climate Consultant pour générer un diagramme psychrométrique. Cela nous a permis d'identifier les moments les plus chauds et les plus froids pour nos mesures. Nous avons mesuré la vitesse de l'air, l'humidité relative et la température à l'aide d'un anémomètre BA16 et d'un thermohyromètre (voir Annexe 1).

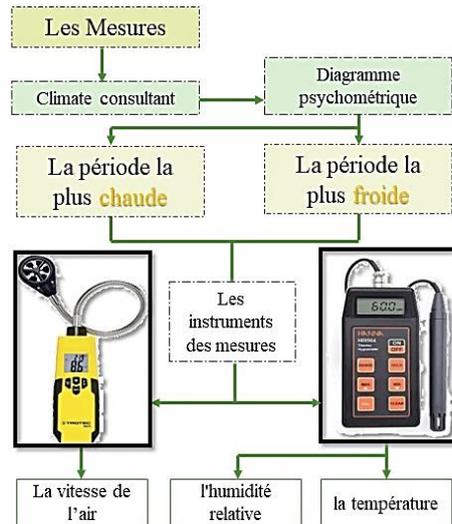


Fig. 67 : représentation synthétique de la procédure de protocole des mesures (Auteur, 2022).

Pour garantir une objectivité maximale, les positions et hauteurs des mesures ont été soigneusement sélectionnées. Les mesures de température, d'humidité relative et de vitesse de l'air sont prises à une hauteur de 1,1 mètre, adaptée aux activités assises et debout. Ces mesures sont effectuées à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre.

L'objectif des mesures in situ est de capturer les conditions environnementales réelles à l'intérieur de la pièce, d'identifier les problèmes de confort thermique et d'évaluer les besoins énergétiques. En analysant ces paramètres, nous visons à élaborer des stratégies pour améliorer le bien-être des occupants, réduire la consommation d'énergie et diminuer l'impact environnemental du bâtiment.

2. Evaluation de la qualité de confort par la campagne de mesures

2.1 Mesures de la température

Dans la saison hivernale, une chambre située au sud-ouest est plus chaude car elle est exposée au soleil pendant les périodes les plus froides de la journée. Les mesures obtenues pendant la saison hivernale sont expliquées par cette exposition solaire, ce qui entraîne une diminution des besoins en chauffage pendant ces heures.

En été, des mesures de température similaires à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre pourraient signaler une isolation thermique insuffisante. Cela signifie que les variations de température extérieure ont un effet direct sur la température intérieure, ce qui suggère une mauvaise isolation.

Chapitre V

Il est possible que cette similitude suggère également une certaine perméabilité à l'air de la chambre. Les infiltrations d'air par les fenêtres, les portes ou d'autres ouvertures peuvent entraîner une réflexion des températures extérieures à l'intérieur de la chambre.

Au cours de l'été aussi, l'exposition directe au soleil peut provoquer des températures élevées à l'intérieur de la chambre, en particulier si celle-ci est orientée sud-ouest, comme c'est le cas de cette chambre d'étude. Il est également possible que le manque de ventilation ou de circulation d'air adéquate contribue à maintenir des températures élevées à l'intérieur surtout en été.

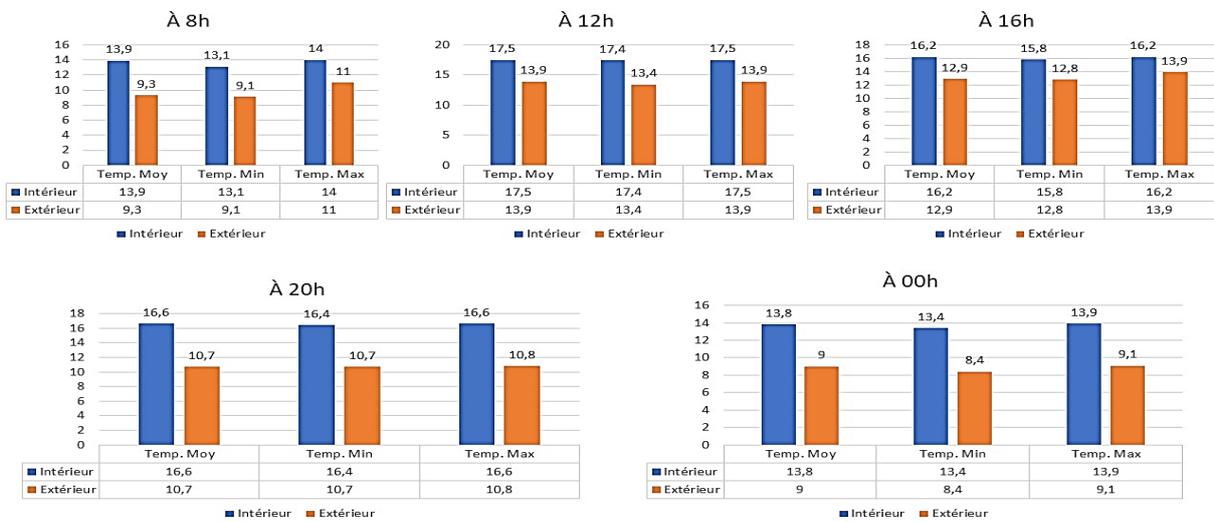


Fig. 68 : Mesures comparatives de la température extérieure et intérieure de la chambre en saison hivernale (Auteur, 2022).

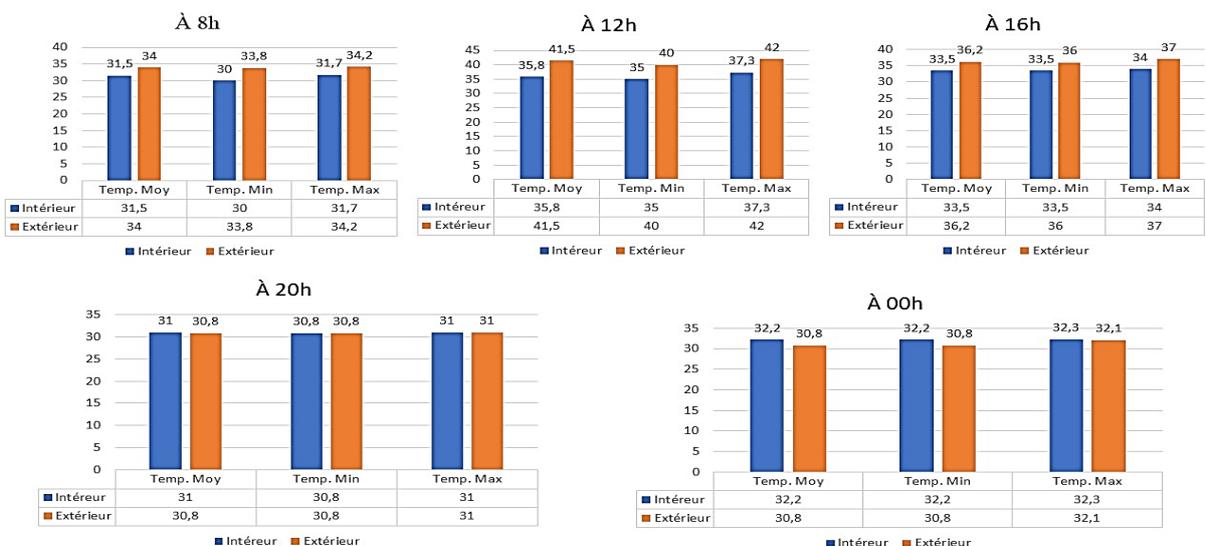


Fig. 69 : Mesures comparatives de la température extérieure et intérieure de la chambre en saison estivale (Auteur, 2022).

2.2 Mesures de l'humidité

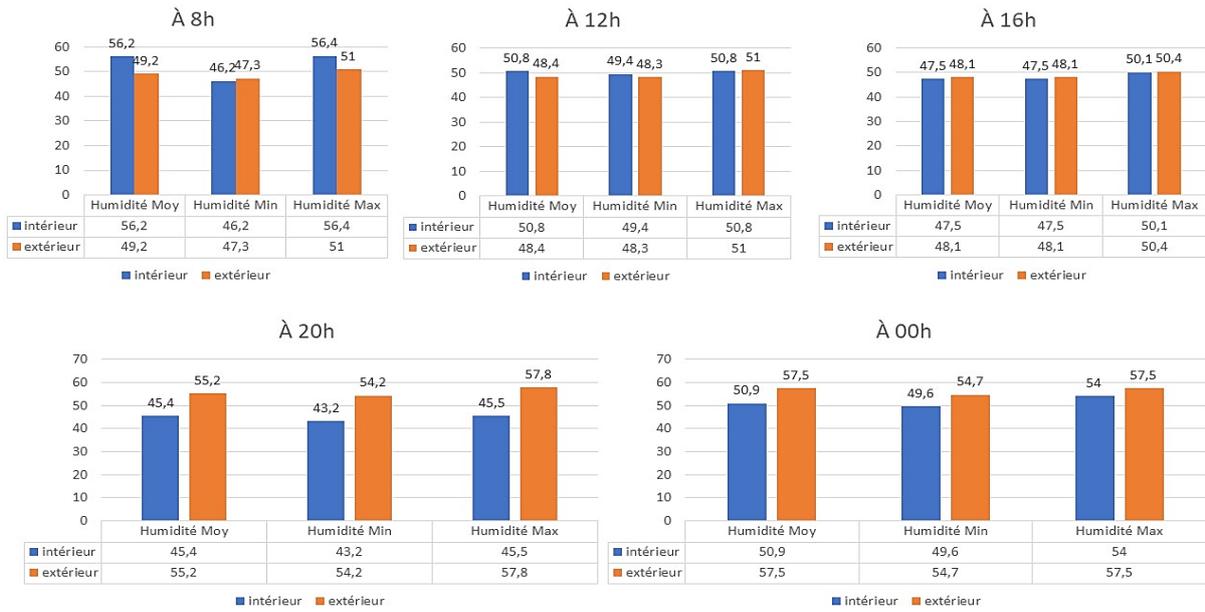


Fig. 70 : Mesures comparatives de l'humidité extérieure et intérieure de la chambre en saison hivernale (Auteur, 2022).

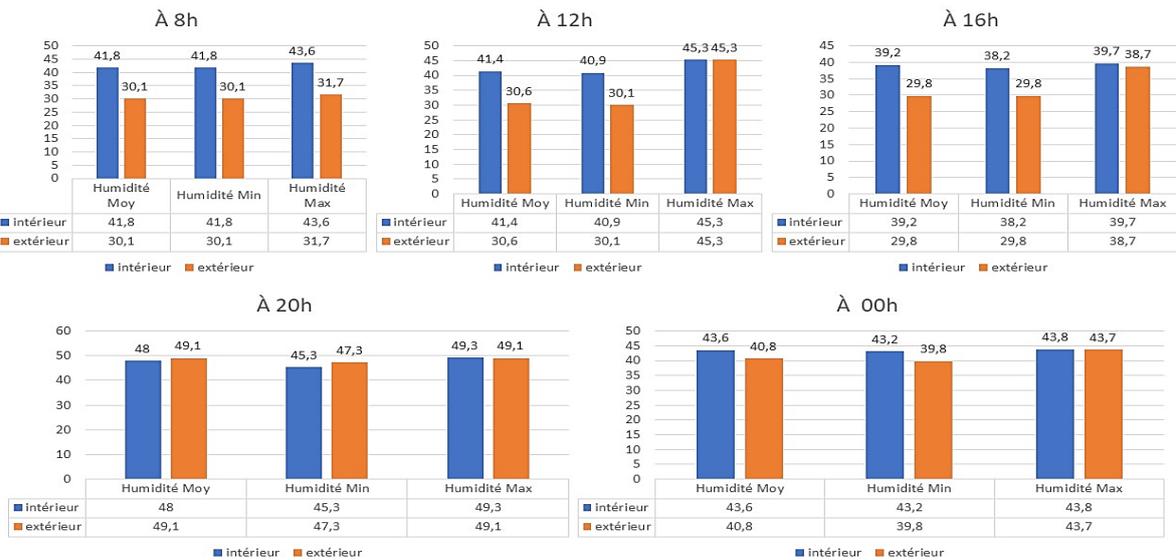


Fig. 71 : Mesures comparatives de l'humidité extérieure et intérieure de la chambre en saison estivale (Auteur, 2022).

L'humidité relative de l'air est l'un des facteurs les plus nuisibles pour le confort et la qualité de l'air intérieur. Selon de nombreux experts, une humidité relative idéale se situe généralement entre 30 et 50 % (Ouled Diaf, 2023).

Il convient de souligner que, pour une quantité donnée de vapeur d'eau dans l'air, une élévation de la température se traduit par une diminution de l'humidité relative, et

réciproquement. Cette fluctuation est généralement responsable de l'augmentation de l'humidité relative observée pendant la saison hivernale.

Pendant la période hivernale, les valeurs d'humidité relative à l'intérieur de la chambre sont presque identiques à celles de l'extérieur, ce qui peut suggérer une grande perméabilité de la chambre aux conditions extérieures. Cette situation peut être causée par des fuites d'air ou peut également suggérer que la chambre est directement exposée à l'extérieur sans aucune barrière importante. Cela peut s'appliquer aux bâtiments qui ne sont pas suffisamment isolés.

En outre, la température extérieure et les conditions météorologiques voisines peuvent directement affecter l'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur de la pièce. Par exemple, lorsque les précipitations sont intenses, l'humidité extérieure peut augmenter et être directement ressentie à l'intérieur. Étant donné que les fenêtres et les portes sont souvent fermées pendant l'hiver afin de maintenir la chaleur à l'intérieur, cela pourrait également entraîner des niveaux d'humidité similaires à l'intérieur et à l'extérieur.

Pendant la saison estivale, il est observé que les niveaux d'humidité relative à l'intérieur sont supérieurs à ceux enregistrés à l'extérieur, ce phénomène pouvant résulter de l'accumulation d'humidité à l'intérieur des espaces habités, notamment suite à des activités humaines telles que la douche, ou en raison d'une ventilation inadéquate. Cela peut créer une ambiance intérieure inconfortable et avoir un impact sur la santé des résidents.

2.3 Mesures de la vitesse de l'air

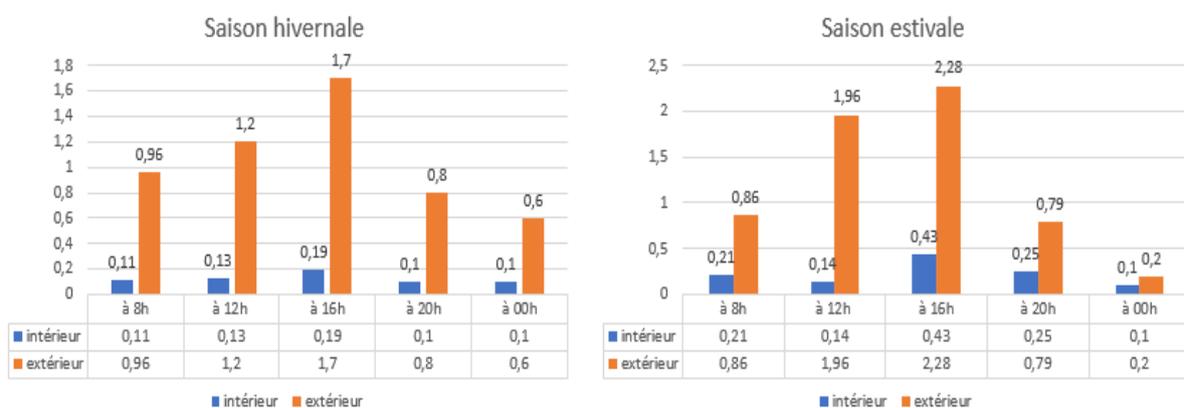


Fig. 72 : Mesures comparatives de la vitesse d'air extérieure et intérieure de la chambre en saison hivernale et estivale (Auteur, 2022).

La vitesse de l'air joue un rôle crucial dans la régulation de la chaleur et de l'humidité à l'intérieur des environnements chauds et humides. Lors des mesures effectuées avec

l'anémomètre BA16 dans la chambre d'étude, la vitesse de l'air reste relativement constante pendant la saison hivernale, ne dépassant pas 0,2 m/s, ce qui demeure dans la plage de confort.

En revanche, pendant la saison estivale, la vitesse du vent varie entre 0,1 m/s et 0,43 m/s. Toutefois, en tenant compte des températures enregistrées pendant les heures les plus ensoleillées (de 12h à 16h), il apparaît que la ventilation dans cette chambre est insuffisante.

Selon les recommandations de Kaoula (**Kaoula, 2017**), pour ressentir un confort thermique, une vitesse d'air idéale se situe entre 0,5 m/s et 1 m/s pour des températures comprises entre 21°C et 24°C pendant des activités légères. En cas de chaleur, cette vitesse devrait idéalement être entre 1,25 m/s et 2,5 m/s. Cependant, les vitesses d'air enregistrées ne correspondent pas aux températures relevées dans la pièce, entraînant ainsi un inconfort estival. Ces résultats justifient les températures et l'humidité élevées observées dans la chambre pendant la saison estivale.

3. Protocole de l'enquête auprès des usagers

Nous allons maintenant aborder les principaux aspects de notre méthodologie d'enquête en décrivant le cadre de notre démarche. Nous avons choisi d'utiliser l'entretien semi-directif comme méthode d'enquête, une décision motivée par les objectifs spécifiques de cette étude. Pour mieux expliquer ce choix, il est utile de comparer les différents types d'entretiens (**Boutaud, 2005**) :

- A. Entretien direct : Cette méthode, semblable aux approches quantitatives, impose un cadre très strict avec des questions demandant des réponses courtes, concises et souvent fermées.
- B. Entretien ouvert ou non directif : Elle permet à l'interviewé une grande liberté d'expression sur un sujet spécifique, souvent utilisée pour des récits de vie.
- C. Entretien semi-directif : Cette méthode offre à l'interviewé la possibilité d'exprimer ses préoccupations de manière naturelle, tout en suivant un fil conducteur qui assure le maintien du sujet principal.

Notre enquête explore la qualité du confort par le biais d'entretiens semi-directifs, méthode appropriée et structurée autour d'un guide flexible. Celui-ci oriente la conversation tout en laissant place à des digressions pertinentes, facilitant ainsi nos objectifs grâce à des techniques d'analyse comportementale. Pour notre étude, il est essentiel de combiner cette méthode avec la collecte d'informations sur le confort dans le bâtiment hôtelier sélectionné, en insistant sur

les aspects particulièrement intéressants, comme détaillé en Annexe 3. Les principaux objectifs sont de recueillir les avis des usagers pour valider leur satisfaction, évaluer la concordance entre certains paramètres mesurés et les résultats obtenus, analyser le comportement des occupants pour établir les scénarios d'utilisation nécessaires à la simulation thermique dynamique, et examiner les pratiques influençant la performance environnementale afin de proposer des améliorations techniques ou comportementales.

4. Evaluation de la qualité du confort par l'enquête de satisfaction auprès des usagers

La collecte des avis des utilisateurs a été un défi majeur. Grâce aux résultats de l'enquête menée en parallèle des mesures, nous avons pu recueillir l'opinion de divers types d'utilisateurs concernant la qualité du confort dans les espaces qu'ils utilisent, leurs comportements et leur seuil de satisfaction envers l'environnement extérieur.

La plupart des occupants des pièces orientées au sud-ouest notent que celles-ci nécessitent peu de chauffage pendant l'hiver en raison de leur exposition au soleil et de l'absence de courants d'air indésirables qui pourraient influencer la température intérieure. Cependant, la majorité des avis indiquent une insatisfaction quant au confort intérieur pendant l'été. Les températures y sont excessivement élevées en raison d'une ventilation insuffisante, ce qui accroît la nécessité d'utiliser la climatisation. De plus, les occupants signalent qu'ils utilisent les stores comme protection solaire la plupart de la journée afin de maintenir une température intérieure fraîche fournie par la climatisation.

Les retours des occupants concordent avec les données mesurées dans la chambre d'étude. Ces deux sources nous fournissent une vision globale : lorsque le confort thermique n'est pas optimal, la demande énergétique augmente, ce qui a un impact évident sur l'environnement.

Afin d'évaluer l'impact environnemental de cette chambre, le logiciel Pléiades propose la possibilité de réaliser une simulation thermique et environnementale, en examinant de manière détaillée 12 indicateurs environnementaux pour évaluer les émissions générées par cette pièce.

Section II : la simulation thermique et environnementale du cas d'étude

1. Bases des données pour la simulation thermique et environnementale du bâtiment

Les paramètres de simulation dans les outils d'évaluation se basent sur plusieurs bases de données, expliqués dans le tableau suivant (tab.24).

Tab. 24 : Bases des données pour la simulation thermique et environnementale du bâtiment.

Paramètre de Simulation	Description
Base de données recensant les composants	Collecte des données techniques, économiques et environnementales concernant les produits, matériaux et ressources énergétiques utilisés dans la construction des bâtiments et par les équipements techniques.
• Données techniques	Caractéristiques et paramètres des différentes composantes du bâtiment.
• Données économiques	Coûts d'acquisition des éléments par unité fonctionnelle.
• Données environnementales	Profil environnemental, unité fonctionnelle et durée de vie des composants.
• Sources d'énergie	Type d'énergie utilisé pour alimenter le fonctionnement de chaque composant (gaz pour le chauffage, électricité pour les climatiseurs).
Base de données recensant les différentes sources d'énergie	Analyse détaillée des différentes sources d'énergie utilisées par les systèmes et équipements HVAC, coûts opérationnels du bâtiment tout au long de sa durée de vie, évaluation de l'incidence économique des besoins énergétiques.
Base de données météorologique	Fourniture des données météorologiques essentielles pour la modélisation énergétique et environnementale des bâtiments, incluant les paramètres horaires enregistrés sur une année de référence.

Notre méthode de simulation s'appuiera sur ces trois sources principales de données.

2. Méthodologie de la Simulation Thermique et Environnementale

L'application de la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV) dans le secteur du bâtiment repose sur des simulations informatiques avec le logiciel Pleiades (version 5.23.4.4, 2023).

Ce logiciel intègre tous les outils nécessaires pour concevoir des bâtiments à haute performance énergétique et environnementale. La mise en œuvre de l'ACV commence par une évaluation énergétique et thermique exhaustive.

2.1 L'analyse thermique

L'analyse thermique repose sur une simulation thermique dynamique (STD) du bâtiment, basée sur le concept des zones thermiques. Elle intègre des scénarios d'utilisation hebdomadaires, l'identification des ponts thermiques et des infiltrations d'air, et évalue le confort thermique dans les chambres en fonction des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment et des systèmes structurels et énergétiques.

2.2 L'analyse énergétique

Suite à l'évaluation des performances thermiques à travers la simulation thermique dynamique, l'analyse énergétique a pour objectif d'optimiser l'intégralité des consommations énergétiques tout en garantissant le niveau de confort nécessaire aux occupants. Cela englobe

la détermination des besoins en énergie et l'exploration de solutions ou d'alternatives pour améliorer les éléments de l'enveloppe du bâtiment ainsi que ses systèmes énergétiques.

2.3 L'analyse environnementale

L'évaluation environnementale du bâtiment est réalisée à travers une ACV utilisant l'outil de simulation Equer, intégré à Pleiades. Les résultats peuvent être exportés vers Excel sous forme de graphiques et de profils environnementaux pour comparer différentes alternatives conceptuelles et améliorer les conditions du bâtiment. L'ACV révèle que l'empreinte environnementale est étroitement liée à la consommation énergétique et aux caractéristiques thermiques. Selon Dakhia (**Dakhia, 2019**), il y a une relation étroite entre les objectifs énergétiques à atteindre et les objectifs environnementaux à justifier.

La méthodologie appliquée est détaillée dans les parties suivantes.

3. Simulation thermique dynamique

La simulation thermique dynamique STD repose sur Comfie-Pleiades en tant qu'éditeur. Il permet de définir les besoins énergétiques d'une zone ou de plusieurs zones d'un bâtiment donné, ce qui permet d'évaluer ses performances en termes d'efficacité énergétique. Cet outil a pour objectif de fournir des recommandations visant à optimiser l'efficacité énergétique d'un bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie.

La modélisation du bâtiment intègre trois dimensions essentielles : le contexte géographique, les caractéristiques physiques du bâtiment (telles que la géométrie, la structure, les matériaux et l'enveloppe) et les paramètres liés à son utilisation, comprenant les équipements, l'occupation, la ventilation et les dispositifs de protection solaire.

3.1 Le site

Le site est caractérisé à partir de données climatiques horaires, incluant la température extérieure, le rayonnement solaire global horizontal, le rayonnement solaire diffus horizontal et le rayonnement solaire direct normal, pour une année standard. Les masques potentiels ainsi que la hauteur de l'horizon sont également pris en considération.

3.1.1 Données météorologiques

La station météorologique d'Algérie et ses données ne sont pas incluses dans Pleiades donc nous devons les introduire nous-mêmes (fig.73). Pour cela, le module STD COMFIE de Pleiades intègre l'utilitaire MétéoCalc qui nous permet de créer et d'importer nos propres données météorologiques créés par le logiciel météonorm 8 que nous avons utilisé (Annexe

4). Ce logiciel a été défini comme une base de données météorologique contenant des données climatologiques pour les applications d'ingénierie solaire dans le monde entier (Nematchoua, Orosa, et al., 2019). Les données importées comprennent les mesures quotidiennes, heure par heure, de divers paramètres météorologiques.

Il est impératif d'examiner minutieusement ces données météorologiques (chapitre 4) afin de communiquer aux concepteurs les caractéristiques architecturales et techniques qui assurent une performance optimale des bâtiments en adéquation avec leur environnement et leur contexte.

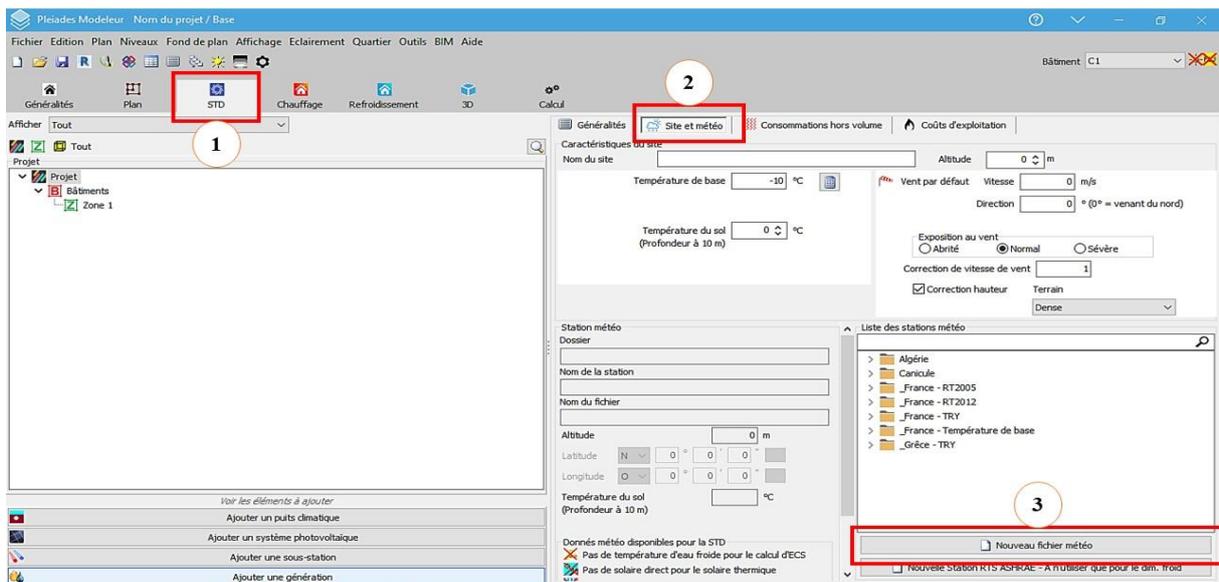


Fig. 73 : Importation d'un nouveau fichier météorologique à l'aide du module STD COMFIE de Pleiades (Pliéades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023)

3.2 Le bâti

Chaque bâtiment se distingue par son architecture, ses formes, sa taille, sa localisation et ses dimensions. Des données sont fournies concernant le système structural, les éléments de construction et l'enveloppe du bâtiment, comprenant une description minutieuse de ses composants.

3.2.1 La géométrie du bâtiment

Les acteurs du processus de construction architecturale doivent impérativement suivre la directive "Construire avec le climat". Cette directive vise à exploiter les ressources naturelles comme le vent, le soleil, l'ombre et la lumière pour optimiser les performances thermiques, l'efficacité énergétique et l'intégration environnementale des bâtiments. Une configuration géométrique adaptée, tenant compte des particularités du site et du climat, est cruciale pour

réduire la consommation d'énergie, assurer une gestion économique efficiente, et diminuer les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les impacts environnementaux.

Selon Dakhia, (**Dakhia, 2019**) plusieurs éléments jouent un rôle crucial dans l'adaptation et l'efficacité de la configuration d'un bâtiment. Ces éléments sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 25).

Tab. 25 : Éléments Influençant sur l'Adaptation et l'Efficacité de la Configuration d'un Bâtiment.

Élément	Description
Orientation du bâtiment	Optimisation de l'exposition à la lumière naturelle, utilisation des courants d'air naturels, et création de zones ombragées pour réduire les gains thermiques en été.
Dimensions du bâtiment	Gestion des surfaces exposées aux conditions climatiques extrêmes, et attention à la proportionnalité pour une efficacité énergétique optimale et un confort thermique.
Choix de la volumétrie	Volumétrie éclatée pour une meilleure circulation de l'air, volumétrie compacte pour la conservation de la chaleur, et volumétrie semi-compacte pour un équilibre optimal.
Répartition des espaces intérieurs	Disposition linéaire le long d'un couloir pour faciliter l'accès et la circulation, ou organisation autour d'un atrium central, d'une cour ou d'un patio pour un microclimat agréable.

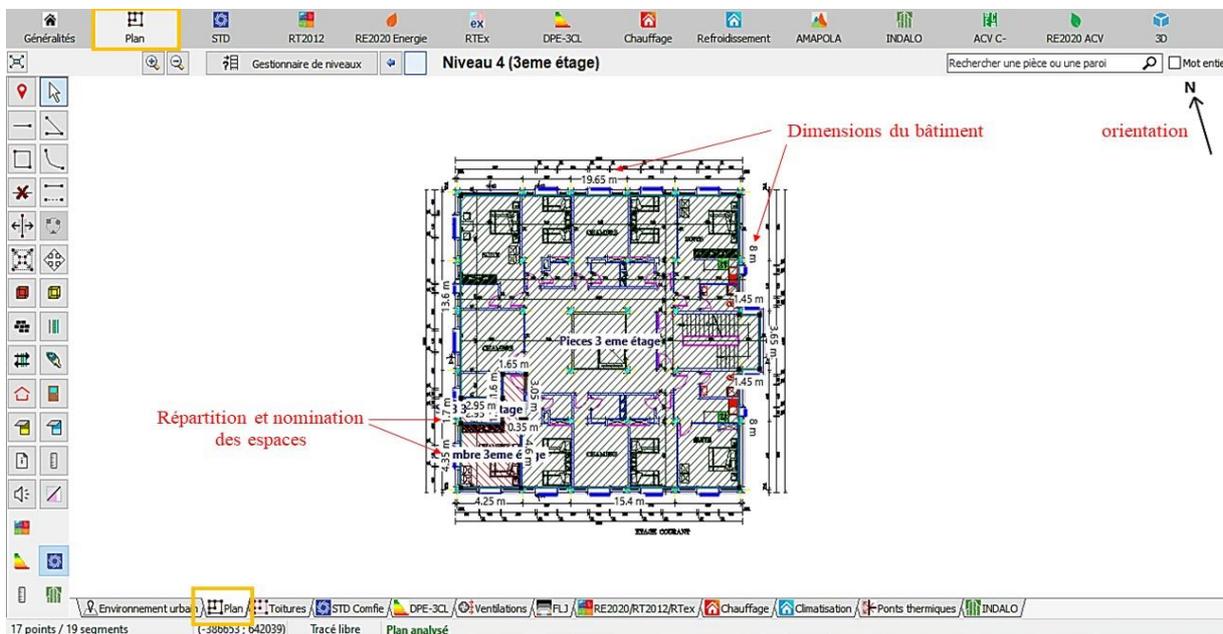


Fig. 74 : Description géométrique du bâtiment à modéliser (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

L'application que nous proposons repose sur l'analyse d'une chambre dans un hôtel récemment construit, en détaillant sa configuration spatiale ainsi que tous ses attributs :

orientation, dimensions du bâtiment, distribution des espaces intérieurs (fig.74) et sa volumétrie (fig.75).

Par conséquent, l'analyse se limitera à cette configuration géométrique du bâtiment, sans considérer d'autres alternatives en matière de géométrie, d'orientation, de distribution, de hauteur ou de nombre d'étages.



Fig. 75 : Volumétries du bâtiment (Pléiades (version 5.23.4.4), assemblées par l'auteur, 2023).

3.2.2 Enveloppe du bâtiment

L'enveloppe du bâtiment est constituée de tous les éléments assurant l'étanchéité et la protection du bâtiment vis-à-vis de l'extérieur, tels que les murs, les fenêtres, la toiture, etc. La composition du revêtement du bâtiment englobe divers éléments en interaction, tels que les parois extérieures avec leurs matériaux constitutifs, les méthodes d'isolation et les matériaux isolants employés, les revêtements et les peintures des parois extérieures, ainsi que les fenêtres et ouvertures munies de vitrage simple, double ou triple. Le choix du vitrage et la performance de l'isolation des fenêtres revêtent également une importance cruciale. En outre, les équipements de protection solaire tels que les éléments architecturaux incorporés dans l'enveloppe et les stores, sont essentiels pour optimiser les performances thermiques de bâtiment.

Les propriétés thermo-physiques de tous les composants de l'enveloppe du bâtiment sont déterminées et intégrées comme paramètres de calcul. Ces éléments de l'hôtel ont déjà été présentés dans le chapitre précédent (section II).

Dans le cadre de Pleiades Modeleur, le processus de modélisation de la zone d'étude (la chambre) a été initié en entreprenant une analyse des données de construction et en procédant à la représentation graphique du bâtiment. Les caractéristiques des murs, des portes, et des fenêtres, ainsi que les états de surface et les ponts thermiques ont été enregistrés avec précision, en mettant en avant les informations les plus significatives pour notre bâtiment. La bibliothèque des Pléiades contient des descriptions détaillées des compositions et des caractéristiques courantes des murs, des sols et des toits, ce qui simplifie le processus de modélisation. Afin de mieux représenter fidèlement le bâtiment étudié, nous avons opté pour l'utilisation de matériaux déjà répertoriés dans la bibliothèque ou pour la création de nouveaux matériaux. Dans notre modélisation, les murs ont été représentés de manière fidèle à la réalité, en prenant en compte les différents composants détaillés dans le tableau 26, incluant leurs dimensions (épaisseurs e), leurs masses surfaciques ($\rho \cdot e$), leurs conductivités thermiques (λ) et leurs résistances thermiques (R). Les portes intérieures en bois ainsi que les fenêtres à simple vitrage en aluminium ont été installées, et toutes leurs spécifications sont détaillées dans le tableau 27. En outre, des données concernant l'état des diverses surfaces des parois ont été recueillies afin de réguler leur réaction au rayonnement, tel qu'illustré dans le tableau 28.

Tab. 26. Composition murale (Auteur, 2023)

Élément	Composant	e (cm)	$\rho \cdot e$ (kg/m ²)	λ (m/m·k)	R (m ² ·K/W)
Mur extérieur	Enduit extérieur	2.00	34.00	1.15	0.02
	Briques creuses 15 cm	15.00	188.00	0.508	0.30
	Lame d'aire	5.00	0	0.313	0.16
	Brique creuse 10 cm	10.00	69.00	0.476	0.21
	Enduit plâtre	2.00	30.00	0.35	0.06
Mur intérieur	Enduit plâtre	2.00	30.00	0.35	0.06
	Brique creuse 10 cm	10.00	69.00	0.476	0.2
	Enduit plâtre	2.00	30.00	0.35	0.06
Plancher Bas	Carrelage	3.00	69.00	1.7	0.02
	Mortier	2.00	40.00	1.15	0.02
	Sable et gravier	5.00	98.00	2.00	0.03
	Béton lourd	20.00	460.00	1.75	0.11
	Mortier	1.00	20.00	1.15	0.01
Plancher intermédiaire	Carrelage	2.00	46.00	1.7	0.01
	Mortier	2.00	40.00	1.15	0.02
	Béton lourd	4.00	92.00	1.75	0.02
	Hourdis de 16 en	16.00	208.00	1.231	0.13

Chapitre V

	béton				
	Placoplatre BA 13	1.30	11.00	0.325	0.04
Plancher haut	Feutre bitumeux	2.00	34.00	0.5	0.04
	Panneau de liège	5.00	6.00	0.04	1.25
	Pare-vapeur	0.10	-	-	0.00
	Béton lourd	5.00	115.00	1.75	0.03
	Hourdis de 16 en béton	16.00	208.00	1.231	0.13
	Placoplatre BA 13	1.30	11.00	0.325	0.04

L'épaisseur (e), la masse par unité de surface (ρ^*e), la conductivité thermique (λ) et la résistance thermique (R).

Tab. 27 : Propriétés de la menuiserie de la chambre d'étude (Auteur, 2023).

Menuiseries	U_w vertical (W/ m ² .K)	U_w horizontal (W/ m ² .K)	S_w
Fenêtre battante en aluminium	4.726	4.726	0.594
Porte intérieure en bois	5.00	5.00	0.594

Coefficients de transfert de chaleur globaux (U_w), facteur solaire (S_w).

Tab. 28 : États de surface des murs de la chambre d'étude (Auteur, 2023).

Propriété				
Emplacement	Enrobage	ξ	α	ρ (%)
Face externe	Peinture blanche	0.91	0.2	80
Sol	Marbre blanc	0.93	0.44	56
Toit extérieure	Gravier gris	0.95	0.85	15
Face interne	Peinture lisse blanche	0.85	0.25	75
Plafond	Plâtre blanc	0.91	0.07	93

Emissivité (ϵ), absorptivité (α) et la réflectivité (ρ) des différents revêtements utilisés.

Dans le cadre de la simulation thermique dynamique (STD), il est nécessaire d'attribuer une zone thermique à chaque espace du bâtiment. Dans notre étude, une zone thermique définie spécifiquement a été attribuée à la chambre pour évaluer ses exigences en termes de chauffage et de refroidissement. Cette zone a été conçue de manière à intégrer les différents scénarios d'utilisation de la chambre, ce qui facilite une analyse précise de ses besoins en énergie.

3.3 Les scénarios d'usage du bâtiment

Les données sont exprimées à travers des scénarios horaires, qui représentent les habitudes d'utilisation typiques des occupants d'un bâtiment. Pour refléter fidèlement les usages courants

des chambres d'hôtel, nous rechercherons des scénarios conventionnels appropriés pour notre étude. L'objectif est de créer un modèle exhaustif pour la simulation thermique dynamique (STD) et de mener une analyse de cycle de vie (ACV) du bâtiment dans la prochaine phase de notre recherche.

Parmi ces scénarios, certains sont définis à partir d'une enquête menée auprès des occupants des chambres d'hôtel (Annexe 3). Ces scénarios comprennent :

3.3.1 Scénario d'occupation

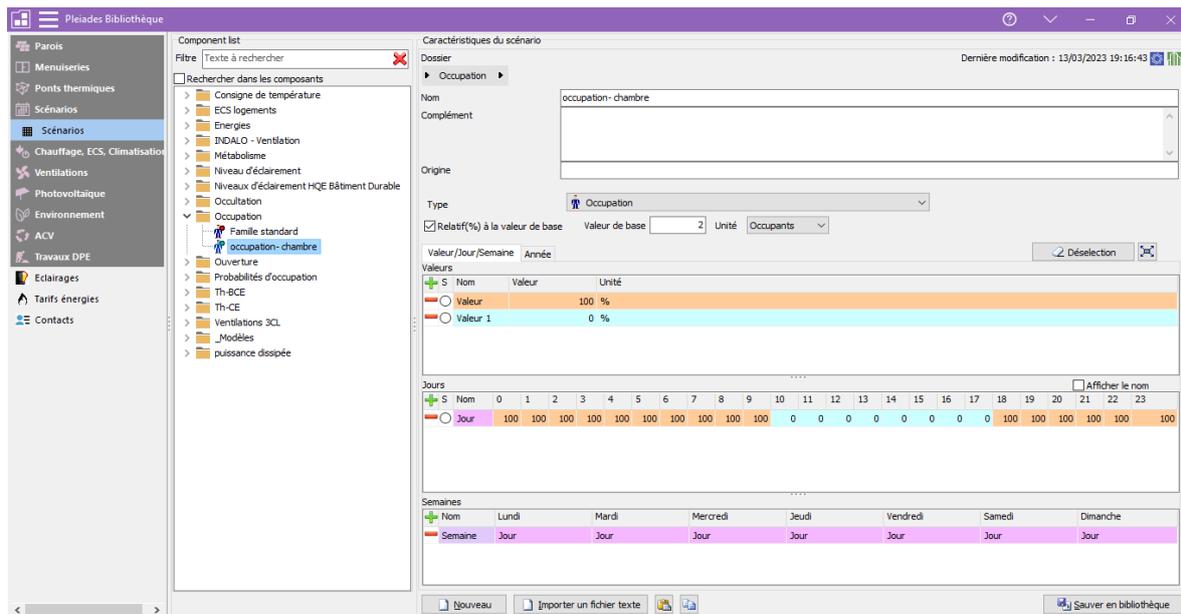


Fig. 76 : création d'un nouveau scénario d'occupation spécifique à notre chambre d'étude (Pleiades (version 5.23.4.4), créé par l'auteur, 2023).

Ce scénario est élaboré afin de prendre en considération les contributions internes de chaleur et d'humidité engendrées par la présence humaine dans les pièces. Concernant la production de chaleur humaine, elle est évaluée à 80 W par individu, tandis que la quantité d'humidité générée par chaque occupant est estimée à 0,055 kg/h.

La chambre d'étude est occupée par deux individus qui sont considérés comme étant présents à 100% de 18h à 9h, et chacun d'eux diffuse en moyenne une puissance de 80W.

3.3.1.1 Scénario d'occultations

Un scénario d'occultation vise à illustrer l'impact d'une occultation à deux niveaux :

- Chaque heure, le pourcentage d'occultation du vitrage ou de la paroi influence le rayonnement solaire transmis (0% pour une totalité ouverte, 100% pour une totalité fermée).

- La résistance thermique supplémentaire est appliquée en fonction du pourcentage d'occultation afin de prendre en considération le surplus d'isolation fourni par l'occultation.

De manière standard, l'occultation est utilisée pour les menuiseries de la paroi. D'après une enquête menée auprès des usagers, l'occultation atteint 80% des vitrages pendant la journée en été, et 100% la nuit en hiver.

3.3.2 Scénario de la puissance dissipée

La dissipation de chaleur à l'intérieur du bâtiment provient principalement de l'utilisation d'appareils électriques chauffants, dont la consommation est plus élevée pendant les heures où les occupants sont susceptibles d'utiliser davantage ces équipements.

Cette chambre d'une surface de 27.4 m² est équipée d'équipements tels que :

- Un climatiseur : La puissance d'un climatiseur varie généralement entre 500 et 2000 W, avec une moyenne de 1000 W.
- Une télévision : La puissance d'un climatiseur varie généralement entre 50 et 200 W, avec une moyenne de 100 W.
- Un mini réfrigérateur : environ 50 à 100 W (moyenne de 75 W).
- Un réveil : La consommation électrique d'une télévision est d'environ 1 à 5 W, avec une moyenne de 3 W.
- Ainsi que des lampes d'éclairage : environ 40 à 200 W (moyenne de 100 W).

L'analyse des données obtenues montre qu'entre 7h00 et 9h00, et entre 18h00 et 23h00, elles étaient de l'ordre de 46.6 W/m² et 39.3 W/m² pendant la période de sommeil.

3.3.3 Scénarios saisonniers

Les saisons considérées sont au nombre de trois : l'été, l'hiver, et les périodes de transition (printemps et automne). Durant ces périodes de transition, le chauffage et la climatisation ne sont pas nécessaires, seule la ventilation est requise pour assurer le renouvellement de l'air à l'intérieur de la chambre.

3.3.3.1 Consigne de température

Pour la simulation thermique dynamique (STD) sur une année complète, nous avons développé deux types de scénarios en fonction des périodes de l'année : un scénario hebdomadaire et un scénario annuel. Ces scénarios intègrent les températures de chauffage en

hiver et de climatisation en été, sélectionnées pour assurer le confort des utilisateurs, avec une plage de température variant entre 19°C et 26°C, adaptée à l'espace d'utilisation.

3.3.3.1.1 Scénario hebdomadaire

Pour le scénario hebdomadaire, nous prévoyons deux consignes de température différentes au cours d'une journée en hiver. Nous proposons deux scénarios hebdomadaires : l'un pour une journée hivernale, où la chambre est chauffée de 18h à 9h, et l'autre pour une journée estivale, où la chambre est climatisée pendant la même période d'occupation.

3.3.3.1.2 Scénario annuel

Les consignes de température pour l'été et l'hiver sont définies en fonction des saisons et des conditions météorologiques. Selon les données climatiques de Guelma, le scénario de climatisation est recommandé entre les semaines 25 et 38, tandis que le scénario de chauffage s'applique entre les semaines 1 et 12, ainsi que les semaines 51 et 52. Pour les périodes allant de la semaine 13 à 24 et de la semaine 39 à 50, ni chauffage ni climatisation ne sont nécessaires.

3.3.3.1.3 Scénario de rafraîchissement (Eté)

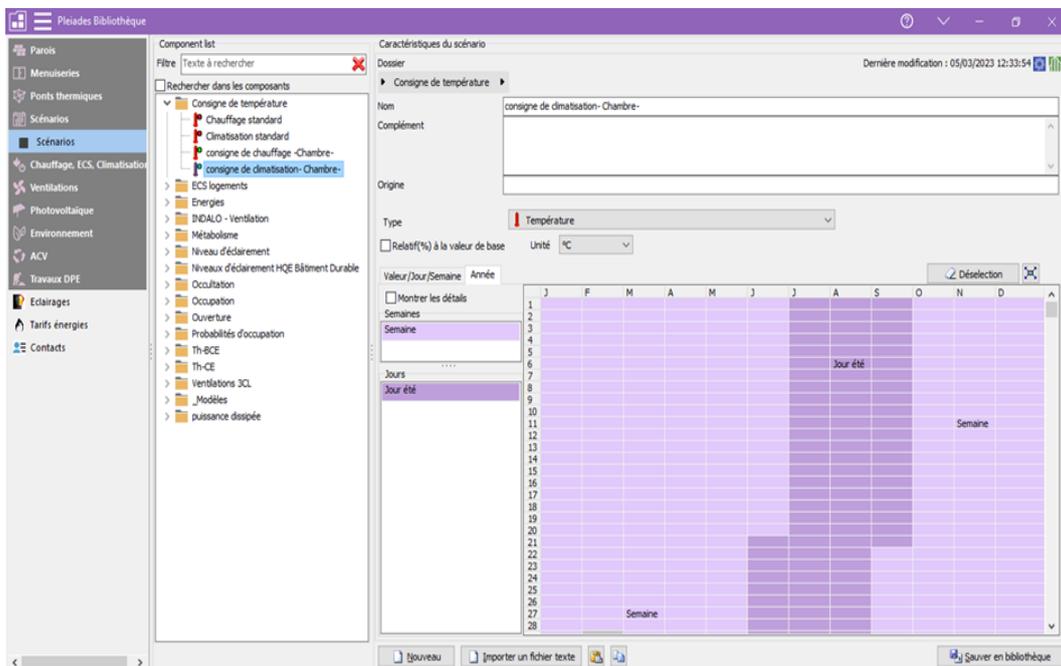


Fig. 77 : Création d'un nouveau scénario de rafraîchissement de notre cas d'étude (Pleiades (version 5.23.4.4), créé par l'auteur, 2023).

À Guelma, la saison chaude peut parfois durer plus de trois mois. Les climatiseurs sont généralement en marche de juin à fin septembre (semaines 25 à 38) dans tous les bâtiments, avec une température de consigne de 26°C.

Dans notre étude de cas, la température de consigne est maintenue à 26°C pendant toute la période d'occupation. Le système de climatisation utilisé est de type VRV avec un système split individuel, où chaque chambre est équipée indépendamment.

3.3.3.1.4 Scénario de chauffage (Hiver)

Pendant la saison hivernale, plus précisément de la semaine 51 à 52 et de la semaine 01 à 12, la température ambiante est maintenue à 19°C pendant les périodes d'occupation dans la chambre. En dehors de ces intervalles, la température est maintenue à 16°C.

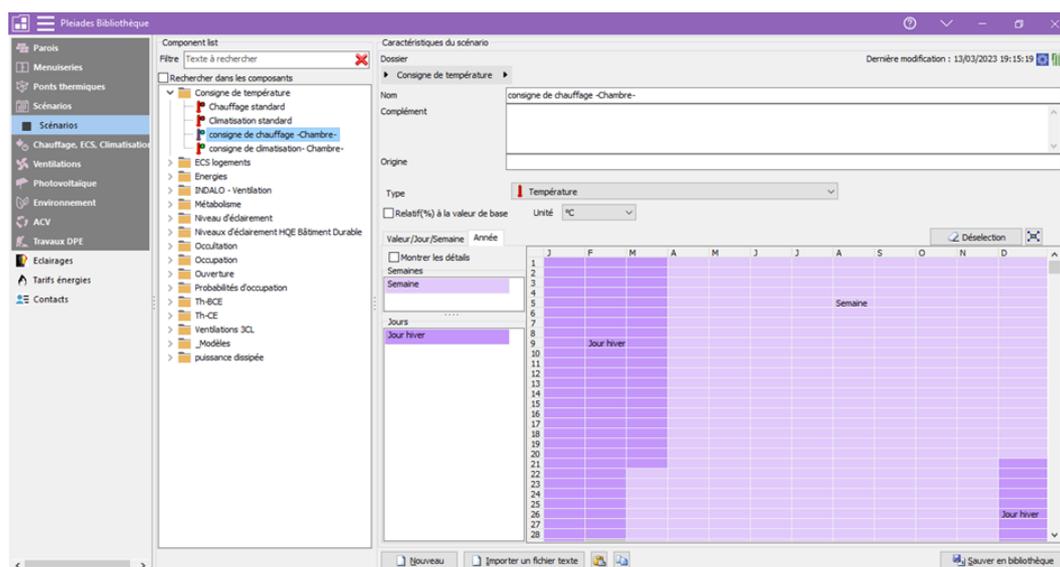


Fig. 78 : Création d'un nouveau scénario de chauffage de notre cas d'étude (Pléiades (version 5.23.4.4), créé par l'auteur, 2023).

3.3.4 Scénario de ventilation

Le scénario de ventilation, défini pour chaque zone thermique, sert de directive pour la ventilation intérieure et extérieure. Il est spécifié par un débit nominal et une modulation horaire en pourcentage. Il est essentiel de maintenir une ventilation extérieure minimale pour éviter la stagnation de l'air et garantir un environnement intérieur sain.

Deux scénarios standard ont été choisis avec un débit nominal de 0,6 vol/h : un scénario hivernal où le bâtiment est ventilé à 100% toute la journée entre les semaines 51 et 52 ainsi que de la semaine 1 à 12, et un scénario estival où la ventilation à 100% ne se fait que la nuit entre les semaines 25 et 38.

3.3.5 Scénario du niveau d'éclairage

Ce scénario définit le niveau d'éclairage souhaité en lux pour le plan de travail de référence. En tenant compte des dispositifs d'éclairage de la chambre et des périodes d'activité, nous déterminons la valeur d'éclairage artificiel (en lux) par mètre carré de la manière suivante :

moins de 10 lux entre 23h et 6h (heures de sommeil) et plus de 300 lux entre 7h et 8h ainsi qu'entre 18h et 22h, en accord avec le scénario d'occupation.

3.3.6 Les besoins en eau chaude sanitaire

La production d'eau chaude pour le chauffage et l'ECS est assurée par une chaudière à gaz à condensation standard, avec un rendement PCI de 92,38 %. La chaleur est diffusée par des radiateurs à eau chaude. Une analyse des caractéristiques de ces systèmes a révélé que certaines données par défaut du logiciel sont utilisées. Le besoin hebdomadaire en eau chaude sanitaire, exprimé en litres à 60 °C, est réparti en profils horaires. Il est recommandé de prévoir 75 litres d'eau chaude par chambre et par jour.

L'étude thermique, déjà développée, sera d'abord effectuée sur le cas initial du bâtiment afin d'évaluer l'ensemble des besoins énergétiques requis pour le confort des occupants, à l'aide des modules « moduleur » et « éditeur ». Par la suite, à partir des résultats de cette simulation thermique dynamique exportés vers le module ACV Equer, une analyse du cycle de vie (ACV) sera réalisée afin d'évaluer tous les impacts environnementaux engendrés, ce qui sera expliqué dans la partie suivante.

4. Evaluation de Cycle de Vie

Aucune hypothèse n'a été faite au hasard, tout a été défini à partir de sources fiables pour garantir l'exactitude de cette recherche. Certaines des données utilisées dans cette étude ont été obtenues grâce à de multiples enquêtes sur le terrain et des entretiens avec des propriétaires d'immeubles (occupants, activités, zones, bâtiments, équipements, etc.).

D'autres données ont été extraites des résultats de la simulation thermique dynamique (Tab. 29), tandis que d'autres proviennent des hypothèses du module ACV Equer (tab.30) et (fig.79).

Tab. 29 : Données Extraites de la Simulation Thermique Dynamique.

Donnée	Description
Dimensions des composants	Dimensions détaillées de tous les composants du bâtiment et leurs caractéristiques spécifiques.
Demandes en énergie et en eau	Besoins en énergie et en eau dérivés de la simulation thermique dynamique.

Tab. 30 : hypothèses du module ACV Equer.

Données	Hypothèses
Durée de vie des matériaux de structure et d'isolation	Matériaux supposés avoir une durée de vie de 80 ans, équivalente à celle du bâtiment.
Durée de vie des revêtements	Revêtements avec une durée de vie de 10 ans.
Durée de vie des équipements spécifiques	Équipements spécifiques avec une durée de vie de 20 ans.
Durée de vie des portes et fenêtres	Portes et fenêtres avec une durée de vie de 30 ans.

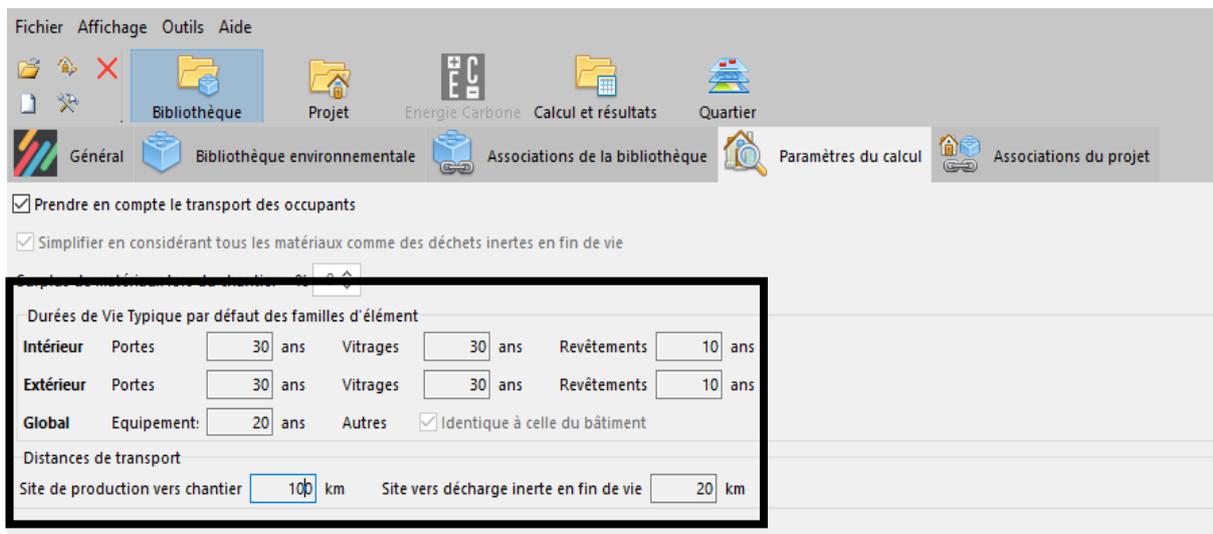


Fig. 79 : Des hypothèses avancées par le module ACV Equer (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

4.1 Transport

Dans le cadre de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), les distances de transport des matériaux ont été prises en compte avec précision. Elles incluent une distance de 100 km entre le site de production et le chantier, ainsi qu'une distance de 20 km pour le transport des matériaux vers une décharge inerte à la fin de leur cycle de vie. De plus, un surplus de 2 % des matériaux utilisés sur le chantier a été intégré, reflétant le taux moyen de déchets générés par les différents produits de construction.

Avant d'effectuer l'analyse du cycle de vie de notre étude de cas, il est essentiel de définir précisément les données relatives aux modules énergétiques, hydriques et de gestion des déchets dans le cadre de l'ACV Equer. Cette démarche met en lumière le mix énergétique et les possibilités de recyclage des déchets d'exploitation, soulignant l'importance de ces aspects pour une évaluation complète et détaillée.

4.2 Energie

Le mix énergétique algérien est un axe majeur des efforts de transition énergétique du pays (*Le mix énergétique – Portail algérien, 2019; Transition énergétique en Algérie, 2022*). Il est actuellement dominé par les énergies fossiles, le gaz naturel est la première source d'énergie en Algérie, représentant 65% du mix énergétique, tandis que le pétrole représente 35% (*Transition énergétique en Algérie, 2022*). Il comprend aussi le charbon, qui représente 0,5% de la consommation énergétique du pays. Alors que, la part des énergies renouvelables en Algérie reste faible, avec moins de 2 % de la production d'électricité provenant de sources renouvelables (**Fenni, 2022**).

4.3 Eau

Ne connaissant pas le comportement exact des occupants de la chambre étudiée, mais en se référant aux standards des hôtels étoilés, la consommation d'eau chaude sanitaire peut varier (**Cegibat, 2021**). Pour notre étude de cas, il est conseillé de prévoir 75 litres d'eau chaude sanitaire par chambre et par jour, ainsi que 100 litres d'eau froide par chambre et par jour.

4.4 Déchet

La gestion des déchets dans les hôtels est un enjeu important. Les hôtels peuvent réduire les déchets en interdisant les objets et produits à usage unique tels que les pailles, les gobelets jetables, les sacs en plastique, les nappes en papier, etc. On estime dans cette étude qu'on a 1000 grammes de déchets par personne et par jour, mais on manque d'informations sur l'utilisation de ces déchets dans les hôtels algériens.

5. Les niveaux de simulation

Notre étude implique une simulation informatique des aspects thermiques, énergétiques et environnementaux. D'une manière générale, la simulation se déroule comme suit :

- **Modélisation** : Après l'enregistrement du graphique du bâtiment par le module modéleur (2D/3D), la géométrie du bâtiment ainsi que son environnement immédiat sont définies.
- **Définition des zones thermiques** : Une fois les zones thermiques identifiées et leurs scénarios d'utilisation définis, toutes les informations sont enregistrées et transmises au module STD Comfie de l'éditeur. Cette phase permet d'évaluer les besoins énergétiques en fonction des exigences thermiques et des usages prévus, garantissant ainsi le confort des occupants en termes de climatisation, de chauffage et de ventilation.

- **Analyse du cycle de vie (ACV) :** L'ACV est réalisée à l'aide du logiciel Nova-Equer pour évaluer de manière exhaustive les impacts environnementaux à chaque étape du cycle de vie du bâtiment. Cette analyse se base sur douze indicateurs environnementaux spécifiques. Avant cette analyse, une modélisation thermique dynamique du bâtiment, communément appelée STD, est effectuée afin de permettre une étude environnementale détaillée basée sur l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

5.1 Premier niveau de simulation : le bâtiment dans son état initial

Pour cette étape, il est essentiel d'évaluer le bâtiment dans son état initial, en considérant tous les éléments et traitements effectués, conformément à la conception initiale et à la construction du bâtiment.

5.2 Deuxième niveau de simulation : choix des menuiseries

Les fenêtres jouent un rôle clé dans le transfert thermique, car le verre peut absorber et retenir la chaleur à l'intérieur de la pièce, impactant ainsi la consommation énergétique du bâtiment et pouvant nuire aux conditions climatiques internes (**Lakhdari et al., 2021**). L'utilisation de vitrages tels que le double ou le triple vitrage, des revêtements spéciaux transparents, et du gaz isolant entre les vitres réduit les échanges thermiques et les fuites d'air, améliorant ainsi le confort intérieur du bâtiment (**Latha et al., 2015**).

Dans le scénario initial, les fenêtres sont en aluminium avec un simple vitrage. Nous réaliserons une comparaison thermique et environnementale entre ces fenêtres et celles en PVC avec triple vitrage peu émissif rempli de gaz argon (un gaz neutre et dense). Les caractéristiques détaillées des différentes fenêtres sont présentées dans le tableau 31.

Tab. 31 : Comparaison des menuiseries

Menuiseries	U _w vertical (W/ m ² .K)	U _w horizontal (W/ m ² .K)	S _w
Fenêtre du scénario initial	4.726	4.726	0.594
Fenêtre en PVC triple vitrage peu émissif au gaz argon	1.095	1.12	0.533

5.3 Troisième niveau de simulation : Variation de la nature d'isolant sur les façades

L'utilisation de matériaux de construction avancés dans les bâtiments peut apporter un confort thermique et réduire la consommation d'énergie, réduisant ainsi l'impact environnemental et l'empreinte carbone de la construction. Ces matériaux ont d'excellentes propriétés thermiques et peuvent être intégrés dans de nombreuses parties de l'enveloppe du bâtiment (**Latha et al.,**

2015). Comme l'isolation renouvelable, qui est un moyen puissant de réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments (Ahmed et al., 2021).

A cet égard, dans cette variante, on modifiera la nature d'isolant dans les façades. La nature de l'isolant dans le scénario initial est la nature réelle de la chambre, soit 05 cm de la lame d'air dans les murs extérieurs.

5.4 Quatrième niveau de simulation : Augmentation de l'épaisseur d'isolation existante au niveau du toit

Le toit du bâtiment est un élément crucial pour l'isolation thermique de l'enveloppe, possédant la plus forte partie du rayonnement solaire dans les bâtiments. L'utilisation d'une bonne isolation est l'un des moyens les plus efficaces pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de carbone d'un toit du bâtiment (Haitao Wang et al., 2023). A cet égard, dans cette section, on travaille seulement sur l'épaisseur d'isolation du toit, vu que, le toit est isolé dès le départ. Par conséquent, afin de répondre aux enjeux environnementaux actuels, nous avons augmenté l'épaisseur d'isolation existante, et par la suite nous comparons les impacts de la toiture dans le scénario initial et ceux de la toiture isolée doit disposer d'un coefficient R supérieur ou égal à 8 m². K/W selon la RE 2020.

5.5 Cinquième niveau de simulation : Énergie renouvelable (panneau photovoltaïque)

De nos jours, plusieurs études ont montré l'importance d'intégration des énergies renouvelables dans les bâtiments. Selon (Kirati et al., 2023; Medjeldi et al., 2023), pour favoriser une transition énergétique durable, il est crucial d'intégrer des sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire. Cela permet de concevoir des bâtiments avec une consommation énergétique réduite. La production d'énergie solaire se présente comme une alternative écologique pour produire de l'électricité de manière non polluante (Couderc, 2018).

Dans cette variante, des panneaux monocristallins sont installés sur une partie du toit, soit 10 m². Ceci est approximativement égal à 1/3 de la surface totale du toit de la chambre. L'assemblage ne nécessite aucune soustraction d'élément d'étanchéité. Les panneaux photovoltaïques sont fixés directement au-dessus du toit avec une lame d'air en dessous à travers des supports. De plus, la lame d'air assure une bonne ventilation à l'arrière des modules, atténuant les pertes de performances dues à la chaleur. Enfin, les panneaux photovoltaïques sélectionnés ont une puissance crête de 52.02 W/m².

5.6 Sixième niveau de simulation : mise en œuvre simultanée de tous les scénarios d'amélioration.

Nous appliquons simultanément tous les scénarios d'amélioration précédents, puis nous comparons les résultats avec ceux du cas initial.

Section III : Résultats et discussion

Les résultats de la simulation thermique dynamique sont donnés dans Résultats Pléiades, ce qui nous permettra d'analyser comment les températures et les besoins énergétiques du bâtiment évoluent sur une période d'un an. Dans notre cas, le pas de temps choisi est de 30 minutes. Ainsi que, Les 12 indicateurs environnementaux sont minutieusement examinés à chaque étape du cycle de vie du bâtiment grâce au module ACV Equer.

1. Cas du scénario réel

Dans cette partie, les résultats de l'évaluation des performances de la chambre étudiée dans son cas initial sont présentés, en se concentrant sur le confort thermique, la consommation d'énergie et l'impact environnemental.

1.1 Performance thermique

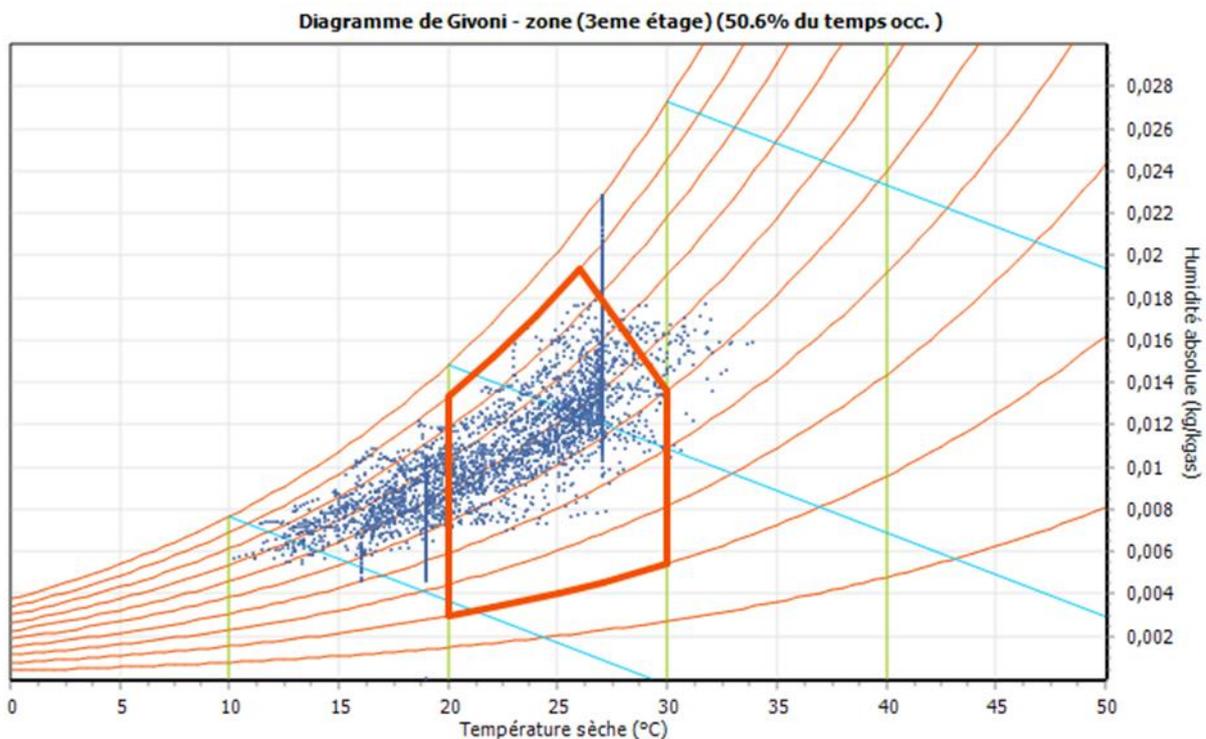


Fig. 80 : diagramme de Givoni de la zone étudiée (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

Le diagramme présenté dans la figure 80 met en évidence la performance du confort adaptatif de la chambre du 3ème étage en relation avec le nombre total d'heures d'occupation annuelle

de cette pièce. Le confort intérieur est marqué par des lignes rouges indiquant les limites de la plage de confort. Les points en couleur bleue représentent le nombre d'heures occupées. Une meilleure performance thermique est obtenue lorsque plus de points bleus se situent dans la plage de confort, car cela signifie que des conditions confortables sont atteintes plus fréquemment. Les résultats ont montré que les conditions de la chambre se trouvent dans la plage de confort pendant 50,6 % des heures d'occupation. Autrement dit, les occupants trouvent la chambre confortable environ la moitié du temps. Toutefois, cela implique que pour environ 49,4 % du temps, les conditions ne sont pas optimales. Cela suggère qu'il est nécessaire d'améliorer l'enveloppe du bâtiment.

1.2 Performance énergétique

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	W	W	°C	°C	°C
Total	2 539	92	3 180	116	4 422	4 601	10,2	22,5	34,4
zone (3eme étage)	2 539	92	3 180	116	4 422	4 601	10,2	22,5	34,4

Fig. 81 : Besoin d'énergie annuelle pour le refroidissement et le chauffage de la chambre dans son cas initial (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

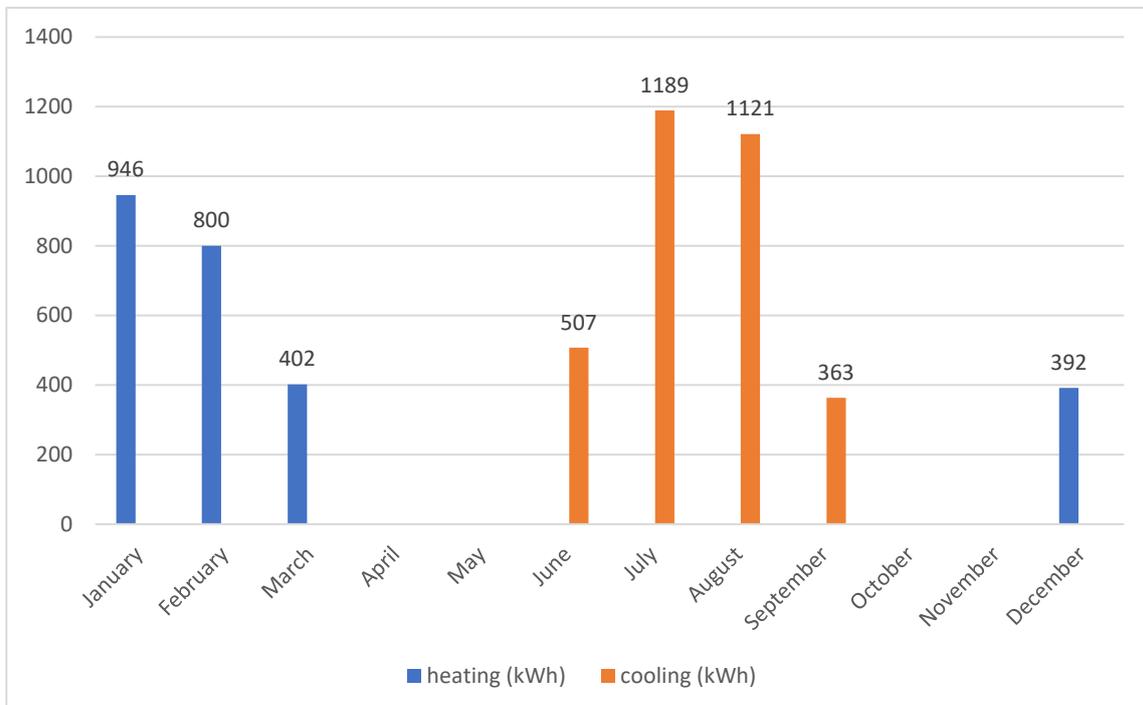


Fig. 82 : Consommation d'énergie mensuelle pour le refroidissement et le chauffage de la chambre dans son cas initial (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

La figure 82 représente la quantité d'énergie utilisée chaque mois pour le chauffage et la climatisation de la chambre du cas d'étude, dans sa configuration initiale, pendant les heures d'occupation. La demande d'énergie de refroidissement domine entre juin et septembre, atteignant un pic en juillet avec une valeur de 1189 kWh. Néanmoins, la demande en énergie pour le chauffage reste substantielle durant les mois froids, en particulier en janvier, avec un pic atteignant 946 kWh. La demande annuelle d'énergie pour le chauffage s'élève à 92 kWh/m², tandis que celle pour le refroidissement est de 116 kWh/m². Les conditions climatiques de Guelma, caractérisées par des étés chauds et secs avec des températures élevées, ainsi que l'orientation sud-ouest de la chambre étudiée qui entraîne une exposition accrue aux rayons du soleil pendant les périodes chaudes de la journée, justifient des besoins accrus en climatisation par rapport au chauffage. En effet, la climatisation est essentielle pour maintenir une température confortable lors des périodes chaudes, ce qui souligne la nécessité d'intégrer des stratégies à la fois de chauffage et de refroidissement adaptées à ces conditions climatiques. Des améliorations de l'enveloppe du bâtiment, telles qu'une isolation renforcée des murs ou le choix de vitrages plus performants, pourraient jouer un rôle crucial dans l'optimisation de l'efficacité énergétique.

1.3 Performance environnementale

Regrouper les indicateurs environnementaux calculés pour les différentes phases du cycle de vie de la chambre sur un même graphique complique leur comparaison directe en raison de l'hétérogénéité des unités de mesure. Cependant, en normalisant ces indicateurs par rapport aux valeurs moyennes des impacts par habitant et par an, il est possible de les présenter sur une échelle uniforme. Cela permet de les comparer plus facilement en utilisant un type de graphique appelé "éco profil" (fig.83).

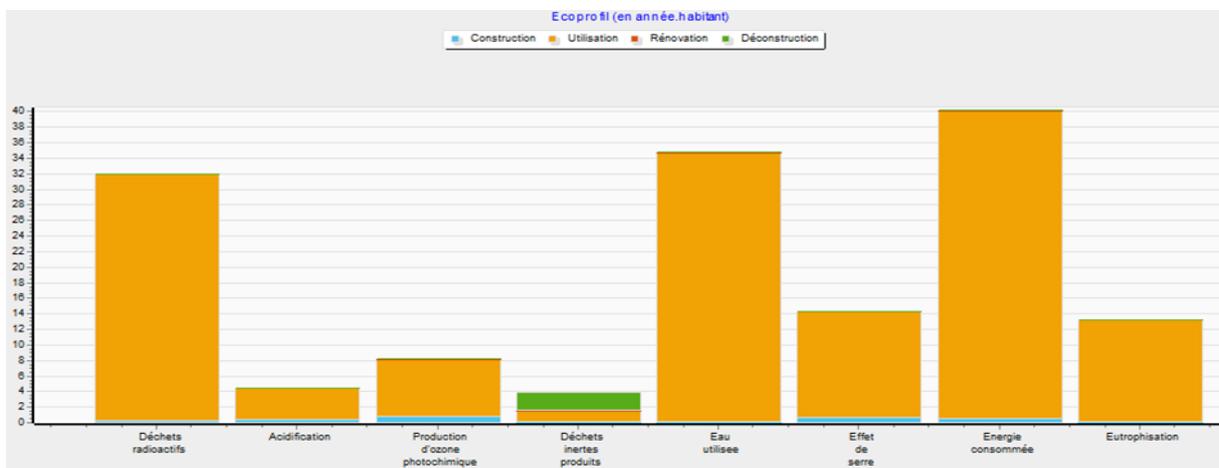


Fig. 83 : Eco profil de la chambre étudiée (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

La figure 83 présente l'éco-profil du scénario initial, calculé en divisant les valeurs de la colonne 6 du tableau 32 par celles de la colonne 7. Cette analyse environnementale révèle que la chambre a un impact significatif sur la consommation totale d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'eau et la production de déchets radioactifs. Parmi les quatre phases du cycle de vie, la phase d'utilisation a l'impact le plus élevé. Les données du tableau 32 montrent que 94,02 % des impacts environnementaux de la chambre proviennent de cette phase, tandis que la phase de démolition ne représente que 0,26 % de ces impacts. Ces résultats corroborent les études de Nematchoua (**Nematchoua et al., 2022; Nematchoua, Teller, et al., 2019**) qui ont également trouvé que plus de 86 % des impacts environnementaux des bâtiments proviennent de la phase d'utilisation.

En examinant spécifiquement les émissions de gaz à effet de serre, la construction génère 6,39 tonnes de CO₂ équivalent, la rénovation 0,20 tonnes, la fin de vie 0,12 tonnes, et la phase d'exploitation 117,90 tonnes, totalisant 124,61 tonnes de CO₂ équivalent sur 80 ans pour une superficie de 27,46 m². Cela correspond à une moyenne de 56,72 kilogrammes de CO₂ équivalent par an et par mètre carré, soulignant la nécessité de réduire l'impact environnemental des constructions et de promouvoir un avenir à faible émission de carbone.

Tab. 32 : Résultats ACV et valeurs de référence pour les différents indicateurs environnementaux (**Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023**).

Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	Total (Colonne 6)	GIEC/ITCAPS (1997)
Effet de serre (t CO ₂ eq.)	6.39	117.90	0.20	0.12	124.61	8.68
Acidification (kg SO ₂ eq)	26.54	250.51	2.80	1.41	281.26	62.3
Demande Cumulative d'énergie (GJ)	84.90	6954.47	13.21	2.01	7054.59	175,54
Eau utilisée (m ³)	56.21	11710.27	11.38	0.94	11778.81	339
Déchets inertes produit (t)	1.80	13.68	1.50	24.16	41.14	10.4
Epuisement ressources abiotiques (Kg – E- 15)	0.00	3.63	0.00	0.00	3.63	-
Eutrophisation (kg PO ₄ eq.)	2.77	501.93	0.19	0.22	505.11	38.1
Production d'ozone photochimique (kg C ₂ H ₄ . Eq)	16.89	143.22	1.27	1.53	162.91	19.7
Ecotoxicité aquatique (m ³)	76130.26	1423003.1	11240.	4044.2	1514418.37	13700
		4	77	0		
Déchets radioactifs (dm ³)	0.13	16.15	0.03	0.01	16.32	0.51

Chapitre V

Toxicité humaine (kg)	37.08	330.62	10.19	1.69	379.58	0.0068
Odeur (Mm³ air)	22.82	1889.30	1.00	0.14	1913.25	-

Tab. 33 : Impacts environnementaux lors de la phase d'utilisation du bâtiment (**Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023**).

Impact	Chauffage	Climatisat ion	Eau	ECS	Electricité spécifique	Total
Effet de serre (t CO₂ eq.)	61.57	6.03	6.68	30.57	13.06	117.90
Acidification (kg SO₂ eq)	73.00	38.95	42.29	36.25	60.02	250.51
Demande Cumulative d'énergie) (GJ)	1142.60	1537.67	212.94	567.40	3493.86	6954.47
Eau utilisée (m³)	75.98	701.87	9528.7 5	37.73	1365.94	11710.2 7
Déchets inertes produit (t)	5.00	1.65	1.12	2.48	3.42	13.68
Epuisement ressources abiotiques (Kg – E- 15)	0.32	0.96	00	0.16	2.19	3.63
Eutrophisation (kg PO₄ eq.)	8.68	2.22	481.92	4.31	4.80	501.93
Production d'ozone photochimique (kg C₂H₄. Eq)	61.80	12.77	12.00	30.69	25.97	143.22
Ecotoxicité aquatique (m3)	274062.13	292371.03	171792 .02	136096 .44	548681.53	142300. 14
Déchets radioactifs (dm³)	0.38	4.66	0.48	0.19	10.44	16.15
Toxicité humaine (kg)	98.05	52.68	56.36	48.69	74.66	330.62
Odeur (Mm³ air)	1168.27	21.89	16.91	580.15	102.08	1889.30

Les principaux contributeurs aux impacts environnementaux pendant la phase d'exploitation sont souvent liés à la consommation d'électricité, au chauffage et au refroidissement de la chambre (tab.33), dépendant largement des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment et de l'efficacité des matériaux d'isolation utilisés.

2. Cas du scénario de choix des menuiseries

En utilisant des fenêtres en PVC à triple vitrage peu émissif argon sur les deux côtés de la chambre, les besoins en chauffage sont de 80 kWh/m² au lieu de 92 kWh/m² dans la situation initiale, soit une réduction de 12 kWh/m². Ainsi que les besoins en climatisation sont passés de 116 kWh/m² à 92 kWh/m² (fig.84). Ces résultats montrent une baisse significative des besoins en énergie lors du changement du vitrage atteignant jusqu'à 17.31 %.

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	W	W	°C	°C	°C
Total	2 184	80	2 533	92	4 085	4 224	11,4	22,5	33,7
zone (Beme étage)	2 184	80	2 533	92	4 085	4 224	11,4	22,5	33,7

Fig. 84 : Besoin d'énergie annuelle pour le refroidissement et le chauffage de la chambre lors du changement du vitrage (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

L'éco-profil présenté dans la figure 85 ci-dessous résume l'ensemble des résultats numériques d'étude, et donne une interprétation comparative des premières améliorations envisagées pour le bâtiment et son cas initial (l'Annexe 5 contient les résultats de 12 indicateurs et le radars comparatifs).

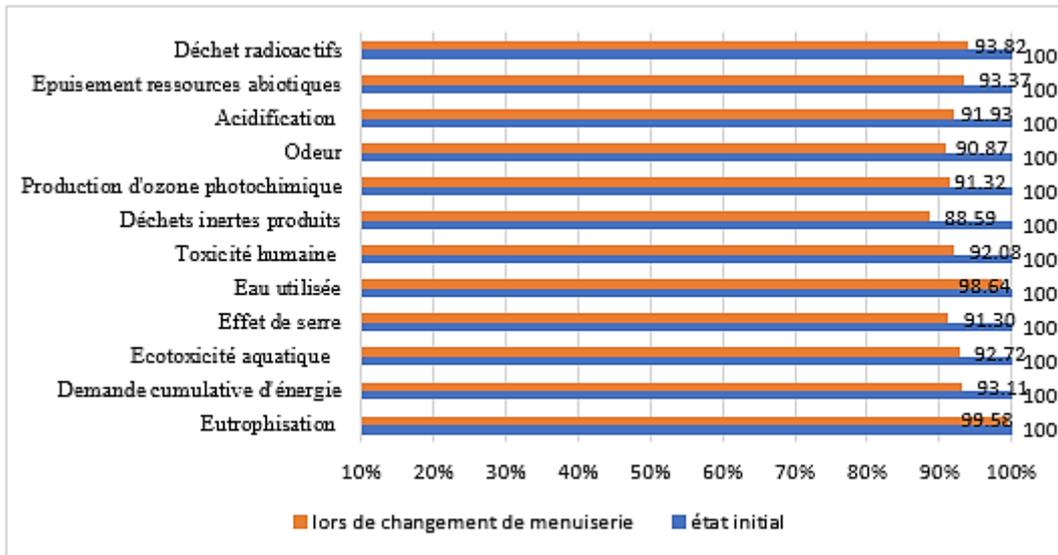


Fig. 85 : Comparaison des impacts environnementaux du scénario initial et lors de changement de menuiserie (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

Suite à l'ajout de vitrages supplémentaires aux fenêtres de toutes les façades, on observe une diminution notable de divers impacts environnementaux, variant entre 11,41 % pour les déchets inertes produits et 0,42 % pour l'eutrophisation sur l'ensemble des phases du cycle de vie. Les trois indicateurs environnementaux ayant enregistré les réductions les plus importantes sont les déchets inertes produits (-11,41 %), l'odeur (-9,13 %) et l'effet de serre (-

8.7 %). Cette diminution finale se manifeste par une réduction de 10,84 tonnes d'équivalent CO₂ sur la totalité de la durée de vie de la chambre.

3. Cas du scénario de la nature d'isolant sur les façades

Les matériaux d'isolation dans l'enveloppe du bâtiment jouent un rôle important dans la performance environnementale globale des bâtiments pour répondre aux exigences d'efficacité énergétique et aux objectifs de décarbonation des bâtiments à consommation énergétique nette zéro dans l'Union européenne. Il est important de développer des matériaux d'isolation avec d'excellentes propriétés thermiques et un impact environnemental réduit combinés à des matériaux recyclés (Rodrigues et al., 2023).

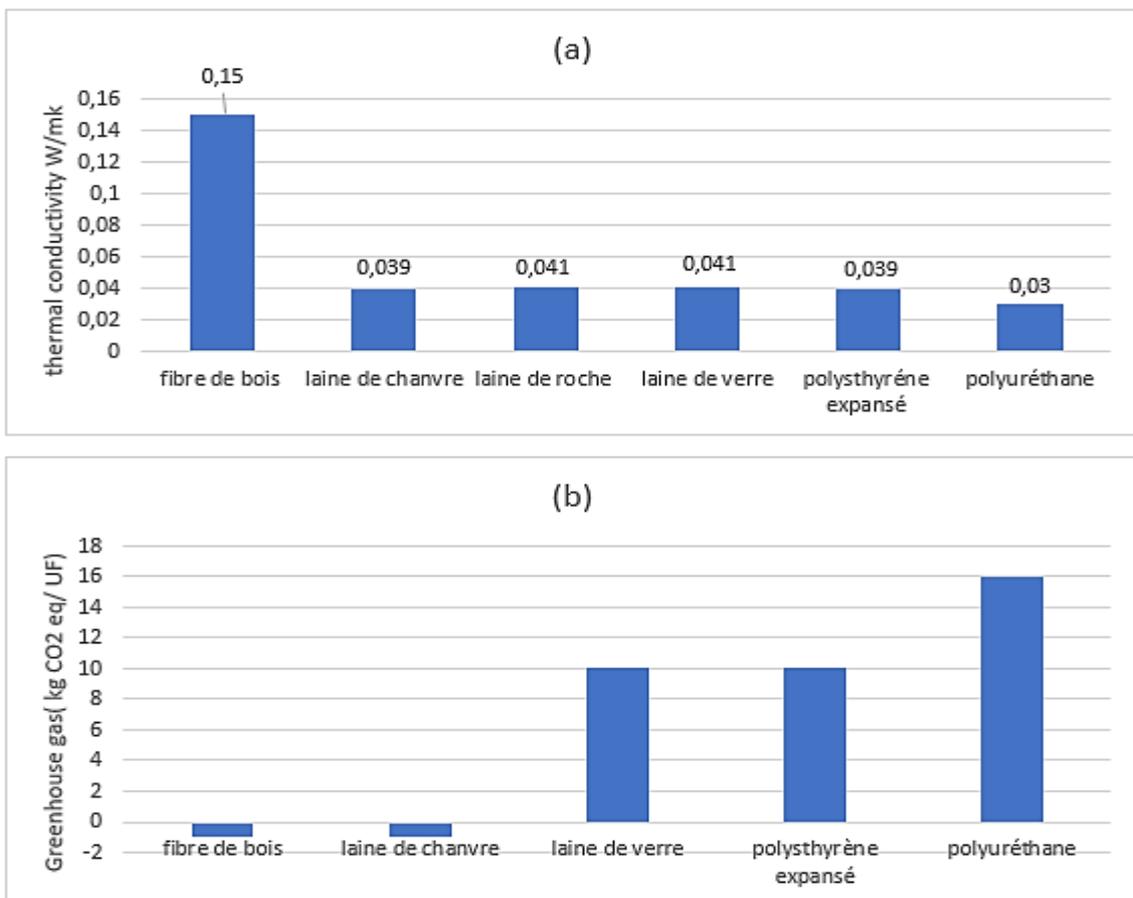


Fig. 86 : (a) Coefficients de conductivité thermique et (b) l'impact carbone de différents matériaux d'isolation (Anchisi, 2020).

D'après les données de la figure 86 (a et b), les laines minérales, comme la laine de verre et la laine de roche, se démarquent par leurs excellentes propriétés thermiques et leur coût abordable. Cependant, elles présentent un impact environnemental défavorable en raison de la consommation élevée d'eau nécessaire à leur fabrication. Les isolants synthétiques tels que

l'EPS et le PUR ont un bilan carbone très négatif et émettent des polluants dans l'atmosphère. La figure 86-a montre que le polyuréthane a le plus faible coefficient de conductivité thermique parmi les isolants. En revanche, selon la figure 86-b, c'est aussi l'isolant qui génère le plus d'émissions de gaz à effet de serre.

Les isolants d'origine biologique offrent des performances comparables aux isolants minéraux et synthétiques. La conductivité thermique des isolants végétaux comme le chanvre, le lin, le coton, ainsi que de la laine de mouton, de la ouate de cellulose, des panneaux de liège ou de laine de bois, reste inférieure à 0,045 W/m.K. Ils présentent un bilan carbone négatif grâce à leur capacité naturelle de stockage de CO₂. La figure 86-b démontre que la fibre de bois et la laine de chanvre sont très efficaces pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Pour répondre aux défis environnementaux actuels, nous envisageons d'utiliser l'un de ces isolants pour l'isolation de la chambre. Nous comparerons deux options : (a) l'isolation des murs avec une couche de 5 cm de fibre de bois ; (b) l'isolation des murs avec une couche de 5 cm de laine de chanvre.

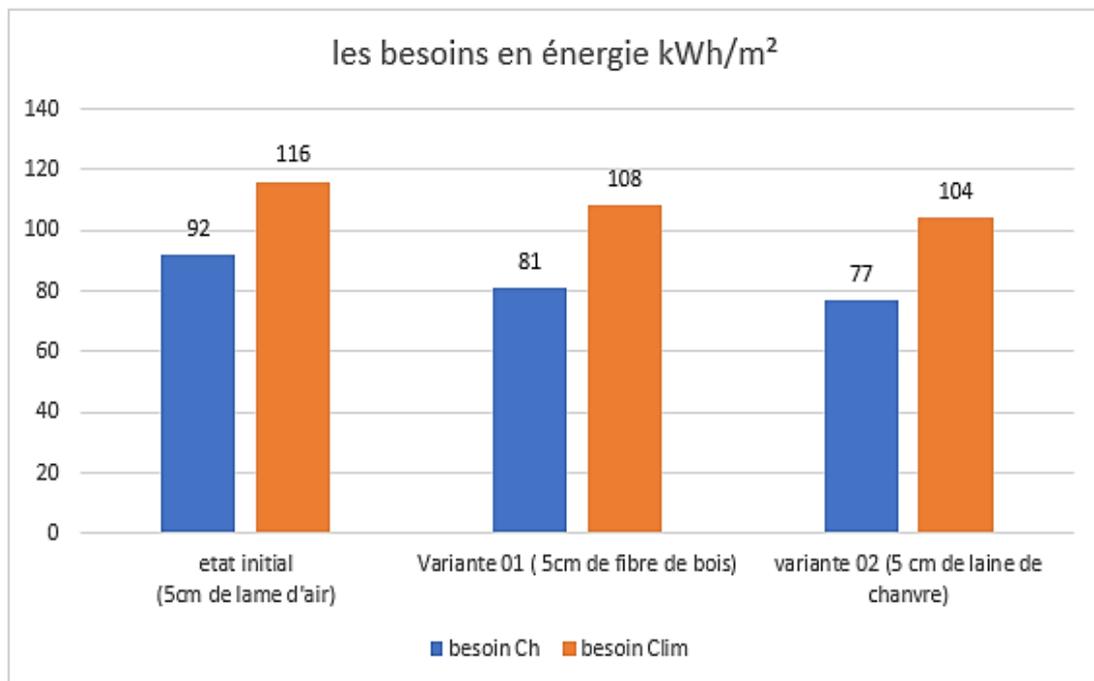


Fig. 87 : comparaison des besoins en énergie entre l'isolation des murs extérieurs en fibre de bois et en laine de chanvre (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

En comparaison avec le critère thermique (fig.87), l'utilisation de la laine de chanvre dans la composition du mur extérieur montre des besoins énergétiques inférieurs par rapport à la fibre de bois.

De manière similaire en ce qui concerne le critère environnemental, comme représenté sur la figure 88, les douze indicateurs environnementaux sont plus faibles lorsque nous utilisons la laine de chanvre. Les trois indicateurs les plus nettement réduits sont les déchets inertes produit (- 11.31 %), l'odeur (-10.88%) et les émissions de gaz à effet de serre (- 9.67%).

Les résultats de Dakhia (**Dakhia, A & Zemmouri, N, 2018**) corroborent ces conclusions, démontrant que l’empreinte environnementale est étroitement liée au taux de consommation d’énergie et à la performance thermique. Par conséquent, l’optimisation énergétique d’un bâtiment dépend de ses performances thermiques, établissant une relation étroite entre la performance énergétique et la performance environnementale.

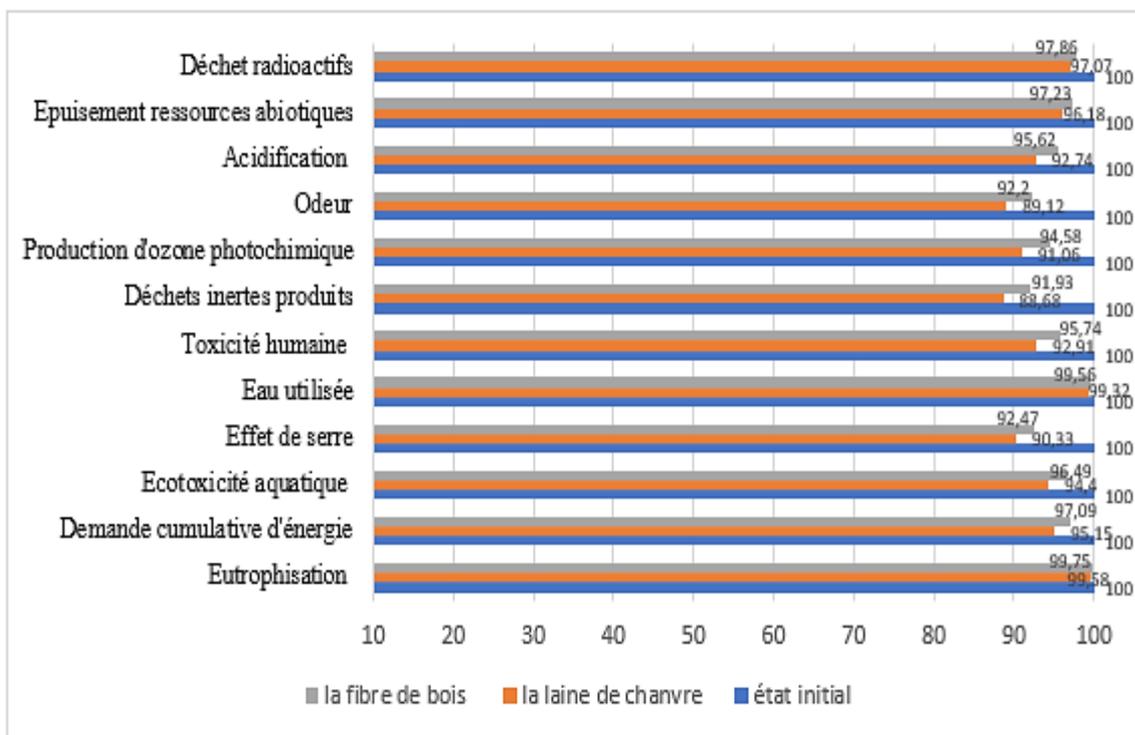


Fig. 88 : Comparaison des impacts environnementaux du scénario initial, d’isolation des murs extérieurs en fibre de bois et d’isolation des murs extérieurs en laine de chanvre (**Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l’auteur, 2023**).

4. Cas du scénario d’augmentation d’épaisseur d’isolation existante au niveau du toit

La toiture est la principale source de déperdition de chaleur d'une pièce. Les coefficients d'isolation appliqués à cette surface sont donc les plus exigeants. La résistance thermique pour l'isolation d'une toiture doit disposer d'un coefficient R supérieur ou égal à 8 m². K/W selon la RE 2020.

Les besoins annuels en énergie (fig. 89-a) dans le cas initial sont de 208 kWh par m². Lorsque on augmente l'épaisseur d'isolant de la toiture, les besoins sont de 177 kWh par m². Ces résultats montrent une baisse significative des besoins en énergie atteignant jusqu'à 14.91 %.

Par conséquent, Tous les impacts environnementaux (fig. 89-b) sont, réduits entre 11.09 % (déchets inertes produit) et 0.38% (eutrophisation) dans toutes les phases de cycle de vie. Ceci confirme que l'utilisation d'une isolation avec un isolant plus respectueux de l'environnement s'est avéré être une meilleure solution d'un point de vue environnemental, d'après les constatations de (Nematchoua et al., 2022).

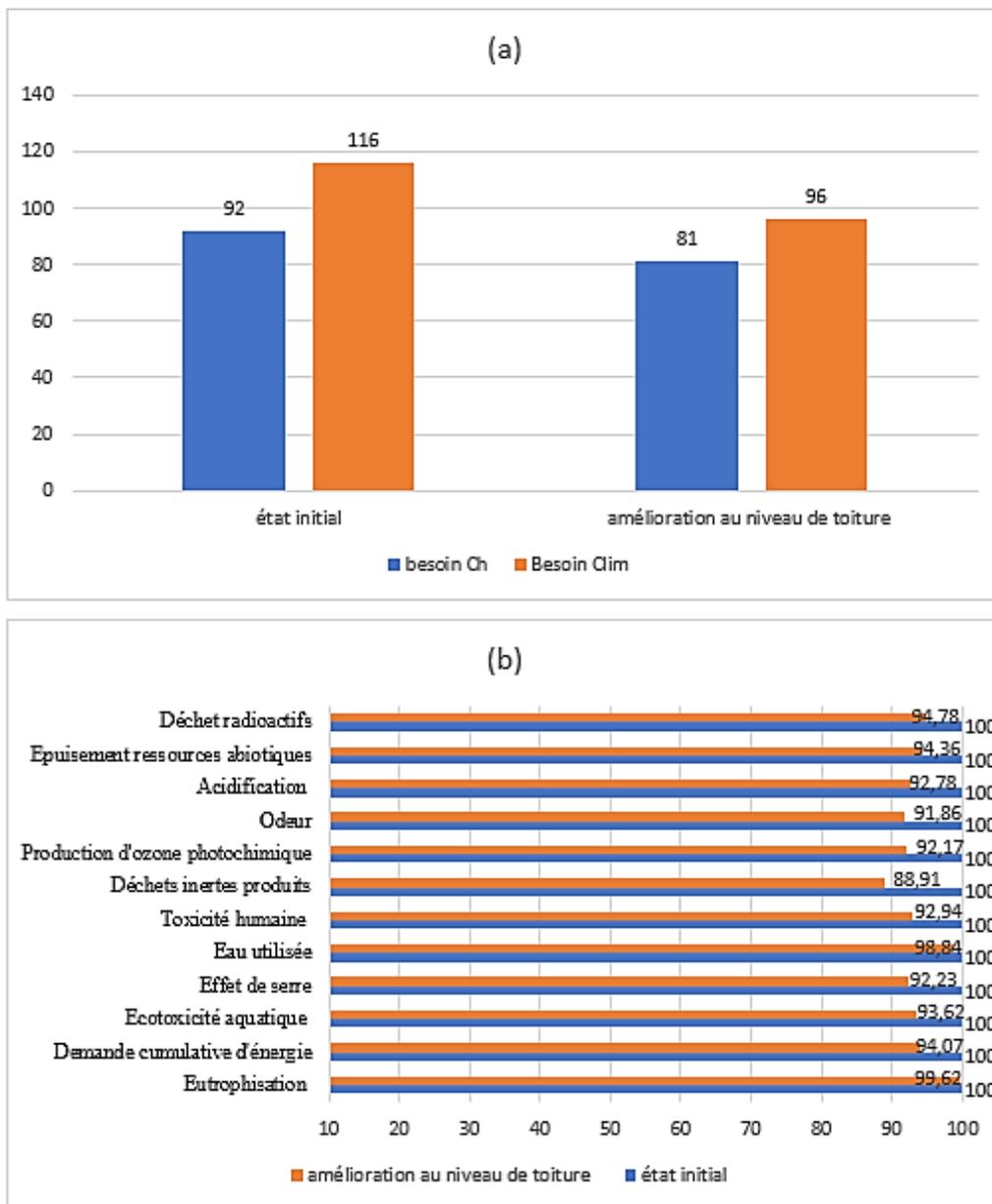


Fig. 89 : Comparaison des besoins en énergie (a) et des impacts environnementaux (b) du scénario initial et la variante d'amélioration au niveau de toiture (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

5. Cas du scénario d'énergie renouvelable (PV)

Afin d'obtenir une chambre énergétiquement suffisante en termes d'énergie spécifique, 10 m² de panneaux doivent être disponibles. Comme il est représenté sur la figure 90, les panneaux photovoltaïques permet la production de 1955 kWh par an, soit 97,9% de la consommation électrique annuelle qui s'élève à 1996 kWh, avec un surplus d'électricité produit par ces panneaux durant les mois d'avril à septembre.

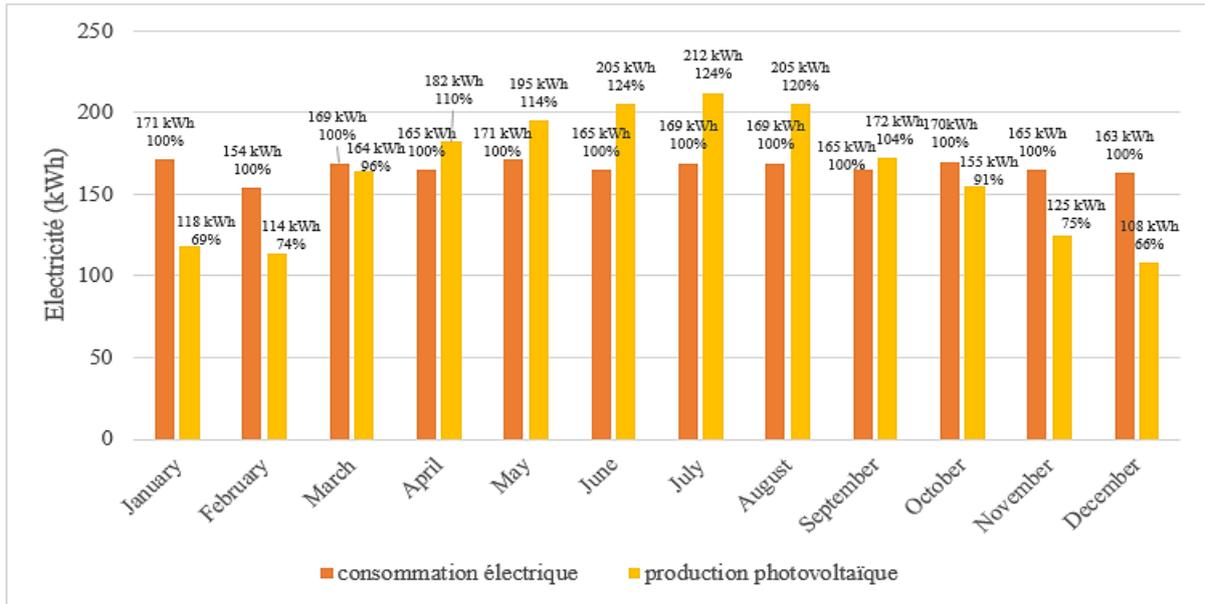


Fig. 90 : Comparaison entre la consommation électrique et la production photovoltaïque des panneaux (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

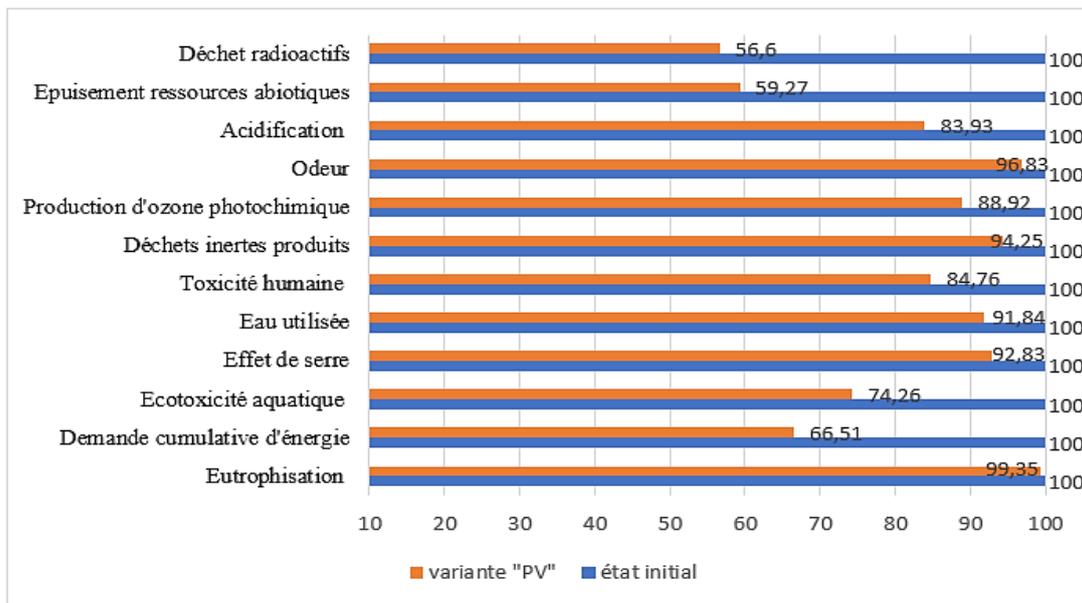


Fig. 91 : Comparaison des impacts environnementaux du scénario initial et de la variante d'intégration des PV (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

Par conséquent, une analyse du cycle de vie sera réalisée en se basant sur cette hypothèse. Il est observé que les phases de construction et de rénovation représentent 6,68 % et 0,98 % respectivement des impacts globaux, alors qu'elles contribuaient à 4,97 % et 0,73 % dans le scénario initial. Ces hausses sont entièrement dues à l'installation de 10 m² de panneaux photovoltaïques. La part de la phase d'utilisation diminue de 94,02 % à 91,97 % dans le scénario initial. Lors de la comparaison entre le scénario initial et les 12 impacts environnementaux de cette variante, illustrée par la figure 91, on observe une diminution des résultats pour tous les indicateurs. Les trois paramètres montrant les variations les plus significatives sont les déchets radioactifs (-43,4 %), l'épuisement des ressources abiotiques (-40,73 %) et la demande totale d'énergie cumulée (-33,49 %).

6. Cas du scénario optimal du cas d'étude

Dans ce scénario, il est combiné tous les scénarios déjà étudiés pour avoir une chambre plus performante.

6.1 Performance thermique

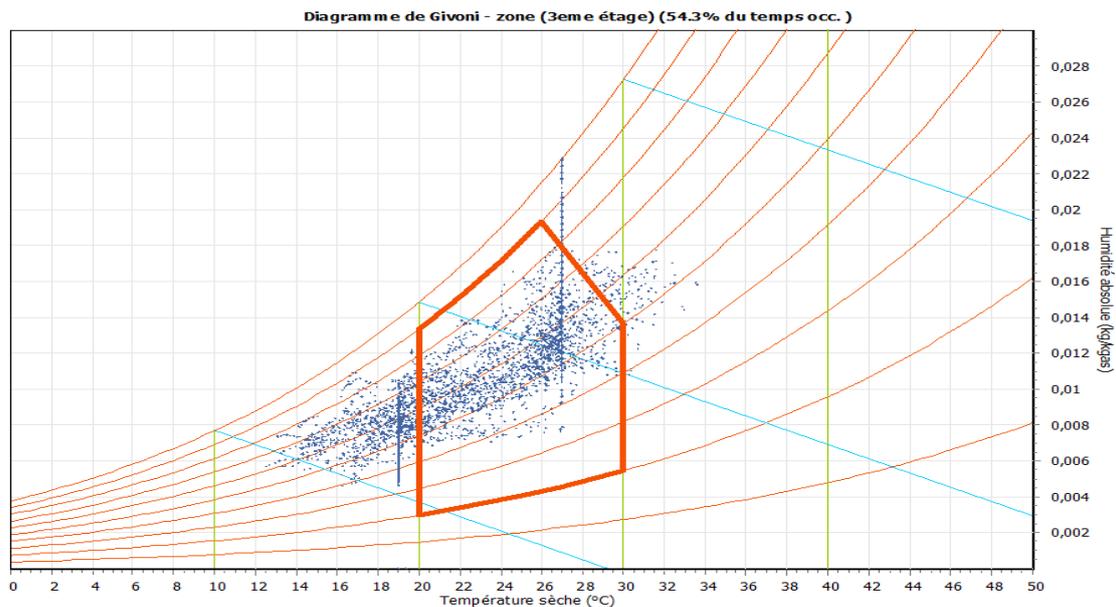


Fig. 92 : Diagramme de Givoni du scénario optimal de cas d'étude (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

Le graphique de confort thermique adaptatif de la figure 92 montre une légère augmentation du nombre d'heures dans la zone de confort par rapport au cas de base, ce qui est indiqué par davantage de carrés bleus dans la zone de confort. Il s'agit d'un léger écart de 50,6 % à 54,3 %, soit une amélioration de 3,7 % par rapport au scénario de base. Il est essentiel de noter que

ces résultats démontrent qu'avec les scénarios d'amélioration appliqués, il était possible de maintenir des conditions thermiques confortables.

6.2 Performance énergétique

L'optimisation a réussi à réduire la consommation d'énergie dans la chambre étudiée, comme la montre figure 93. Le besoin en énergie a diminué de 208 kWh/m² à 104 kWh/m² avec une diminution de 104 kWh/m², soit 50 % d'amélioration.

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	W	W	°C	°C	°C
Total	1 282	47	1 554	57	3 185	2 812	12,5	22,9	33,6
zone (3eme étage)	1 282	47	1 554	57	3 185	2 812	12,5	22,9	33,6

Fig. 93 : Besoin d'énergie annuelle pour le refroidissement et le chauffage de la chambre dans son cas optimal (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

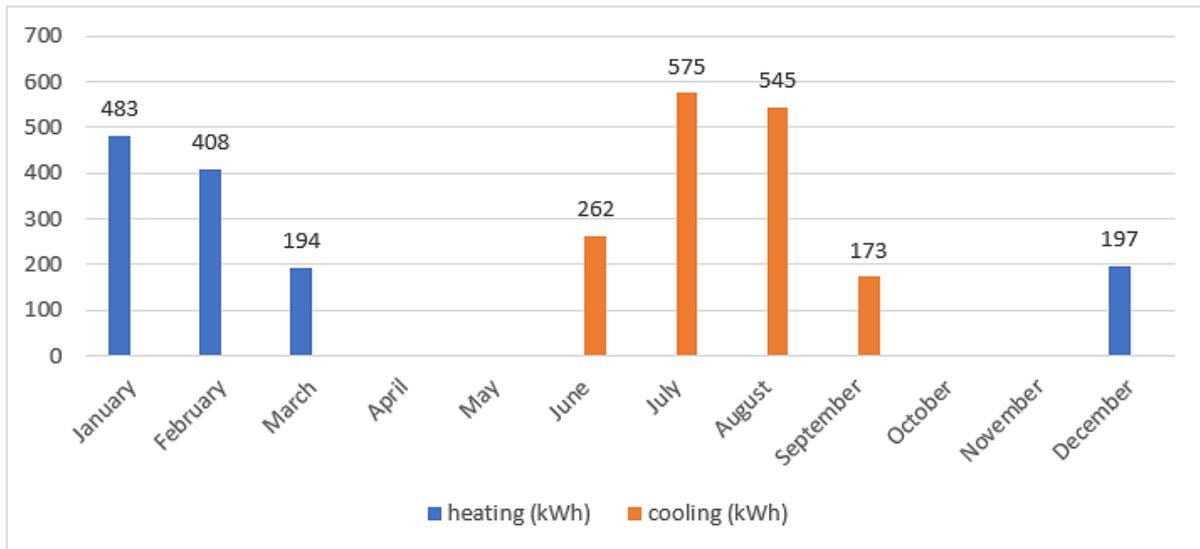


Fig. 94 : Consommation d'énergie mensuelle pour le refroidissement et le chauffage de la chambre dans son cas optimal (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

La demande d'énergie de refroidissement, qui est prédominante de juin à septembre et atteint son pic en juillet à 1189 kWh/m² dans le cas initial, a diminué pour atteindre 575 kWh/m². Cependant, la consommation d'énergie pour le chauffage reste également significative pendant les mois froids, en particulier en janvier, où elle a atteint un maximum de 946 kWh/m² dans le scénario initial, mais a diminué à 483 kWh/m².

Ces conclusions soulignent que le choix méticuleux des éléments de conception de l'enveloppe du bâtiment a le potentiel de significativement améliorer les performances de la chambre d'étude.

6.3 Performance environnementale

La figure 95 présente le pourcentage de variation de chaque indicateur par rapport au scénario initial (100%) tout au long du cycle de vie de la chambre d'étude. Nous avons réalisé une amélioration de 35.88 % par rapport au cas initial.

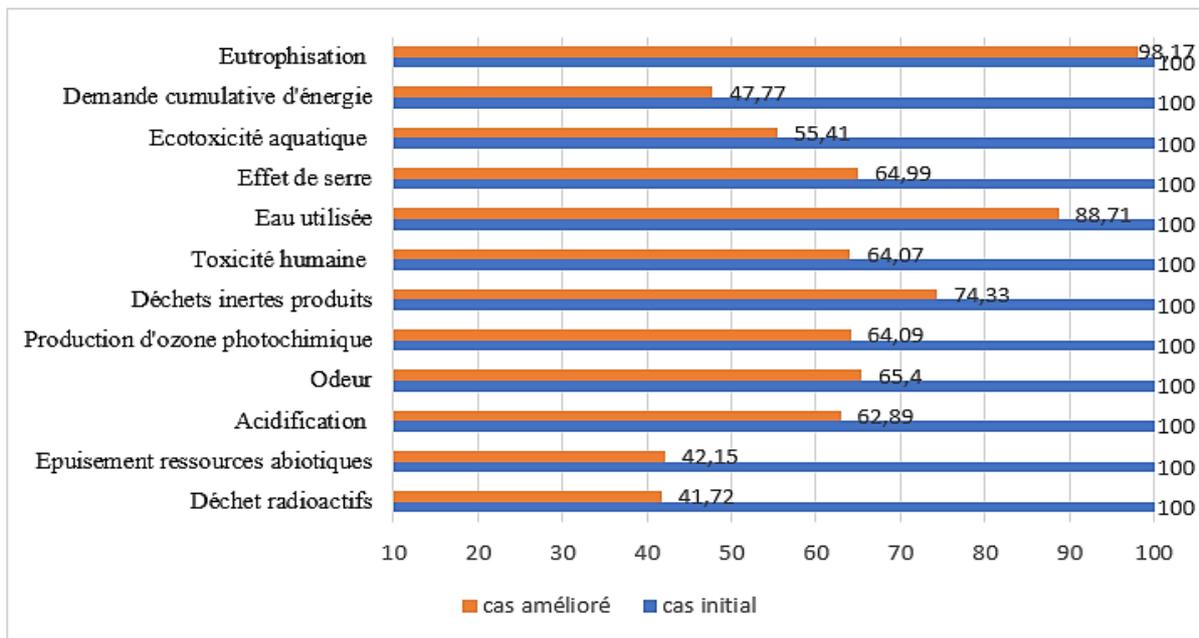


Fig. 95 : Comparaison des impacts environnementaux totaux du scénario initial et du scénario optimale (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

La figure 96 montre les résultats détaillés de chaque phase de l'Analyse du Cycle de Vie dans les deux cas, en comparant les douze indicateurs environnementaux. Il est à noter que dans les deux cas, pour chaque indicateurs, la « phase d'exploitation » montre un impact significatif sur l'environnement. Cette phase était moins réduite dans le cas amélioré de 38.04% Par rapport au cas initial. Les déchets radioactifs, lors de la phase d'utilisation, présente la plus grande différence par rapport aux autres indicateurs environnementaux étudiés dans ces deux cas, ainsi que l'épuisement des ressources abiotiques et la demande cumulative d'énergie avec un pourcentage d'amélioration de plus de la moitié grâce au nouveaux scénarios appliqués. Suite à une telle diminution de la demande cumulative d'énergie, on obtient une réduction significative des émissions de Gas à effet de serre (-35.01 %), ce qui contribue à avoir une chambre bas carbone.

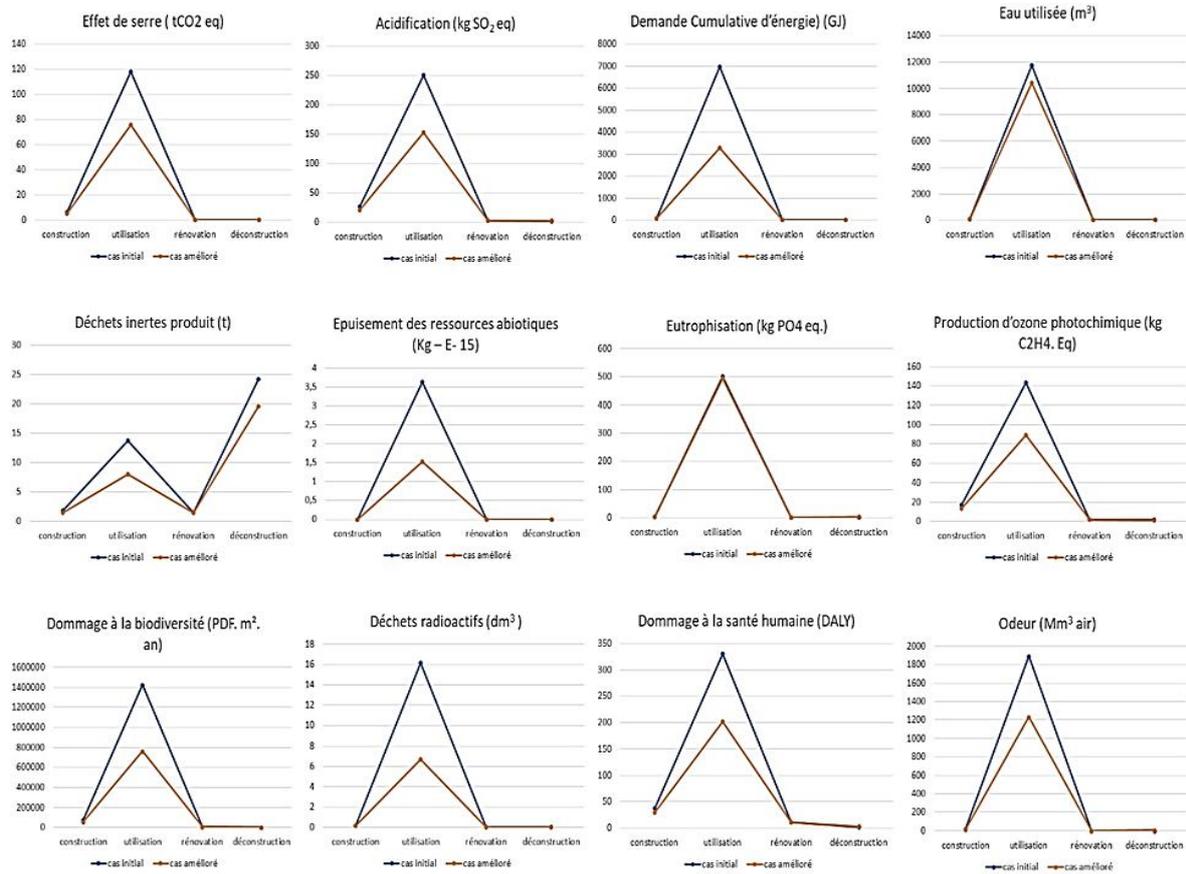


Fig. 96 : Résultats détaillés pour chaque phase de l'analyse du cycle de vie pour les deux cas (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

6.3.1 Analyse et comparaison de la phase d'utilisation

Les résultats de chacune des phases d'exploitation de l'Analyse du Cycle de Vie pour les deux cas étudiés sont illustrés dans la figure 97. Les principaux contributeurs aux impacts environnementaux lors de la phase d'exploitation sont souvent liés à la consommation d'électricité, au chauffage et au refroidissement de la chambre. Il est positif de constater que l'installation des panneaux photovoltaïques joue un rôle significatif dans la diminution de la demande totale d'énergie et, par extension, de la consommation d'électricité, grâce à sa capacité à générer une quantité considérable d'électricité à partir d'une source d'énergie renouvelable. Ainsi que, le fait d'avoir renforcé l'isolation, que ce soit au niveau de vitrage des fenêtres ou au niveau d'enveloppe extérieure par l'utilisation d'un matériau biosourcé comme un isolant thermique permet de réduire les besoins en chauffage et en climatisation, contribuant ainsi à minimiser les impacts environnementaux. Grâce à l'application simultanée de ces nouveaux scénarios, ces impacts ont été réduits de plus de 35 % pour la plupart des indicateurs environnementaux, ce qui reflète d'avoir une chambre à faible impact

environnemental, autrement dit, une chambre bas carbone tout au long de son cycle de vie, et précisément dans sa phase d'exploitation.

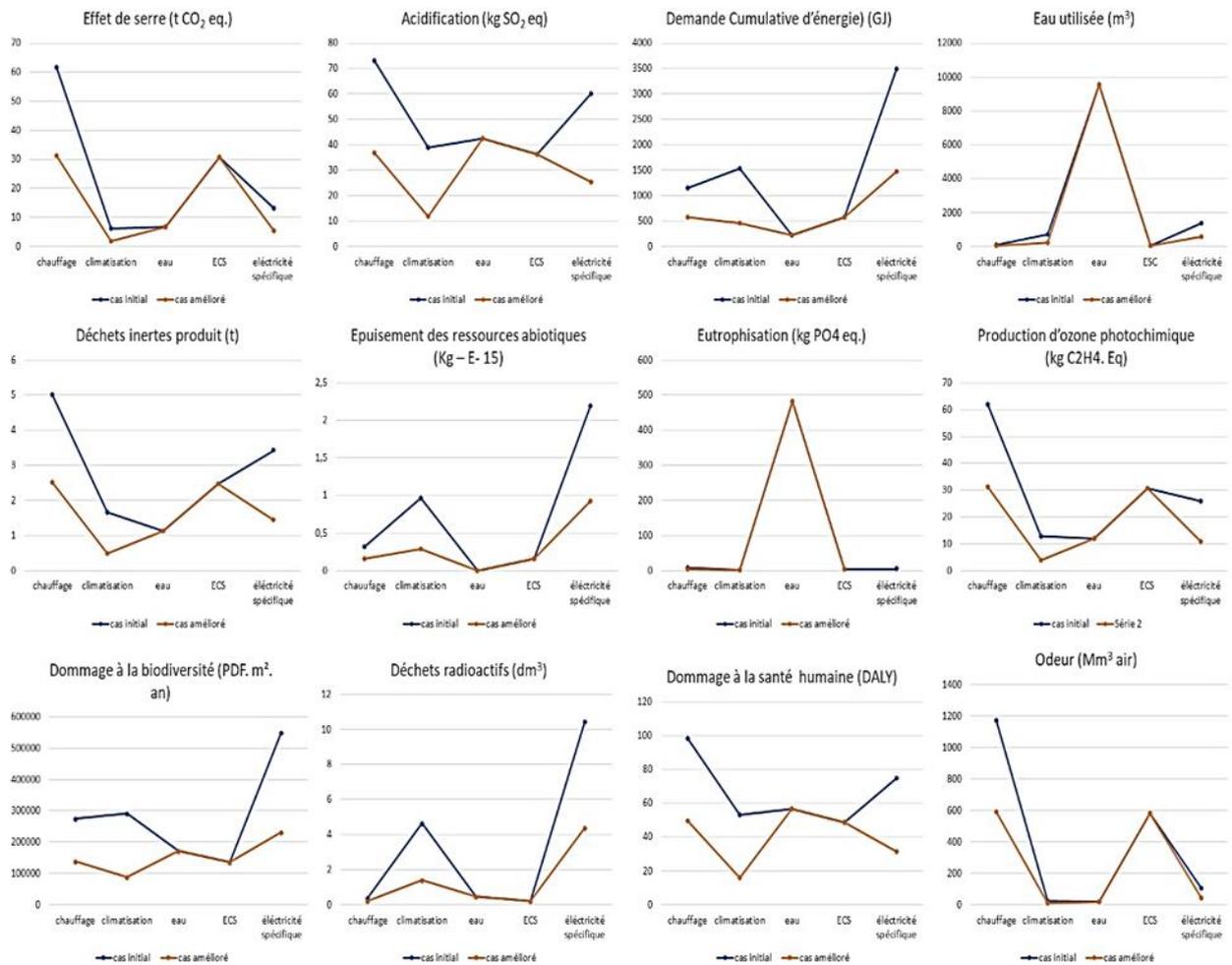


Fig. 97 : Résultats détaillés pour chaque phase d'utilisation de l'analyse du cycle de vie pour les deux cas (Pléiades (version 5.23.4.4), traité par l'auteur, 2023).

Conclusion

Suite aux résultats de la campagne des mesures et d'enquête, une analyse thermique, énergétique et plus particulièrement environnementale d'une chambre d'hôtel situé dans un complexe touristique à Guelma (Algérie) ont été réalisées telle qu'elle existe en considérant les quatre phases de son cycle de vie (phase de construction, exploitation, rénovation et fin de vie), avec ses besoins énergétiques et ses impacts environnementaux. Par la suite, différents scénarios ont été envisagés. Celles-ci visaient à améliorer les performances thermiques et énergétiques de la chambre et à conduire cette chambre vers une stratégie bas carbone. Nous avons analysé l'impact de chaque scénario mis en œuvre sur l'ACV de cette chambre nous

permettant d'avoir une chambre contenant toutes les solutions alliant un bon équilibre entre une bonne performance énergétique, et une empreinte environnementale acceptable.

L'étude de cas d'optimisation montre que des améliorations significatives par rapport au cas de base pourraient être obtenues. L'utilisation des fenêtres en PVC à triple vitrage peu émissif argon, l'isolation thermique avec un matériau biosourcé et l'augmentation d'épaisseur de ce type d'isolation au niveau de toiture ont considérablement réduit les besoins d'énergie en chauffage et en climatisation. Ainsi que, l'intégration des panneaux photovoltaïque permet de générer 97% de la consommation totale d'électricité, ce qui est un grand pas en avant vers une chambre à énergie net zéro. Lors de la combinaison de ces scénarios simultanément, Les indicateurs les plus fortement réduits sont les déchets radioactifs, l'épuisement des ressources abiotiques, la demande cumulative d'énergie et les émissions à l'effet de serre ce qui contribue à avoir une chambre bas carbone.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

1. Conclusion générale

Pour contextualiser cette étude, on peut se référer à l'actualité récente : le bilan environnemental des dernières décennies révèle une croissance destructrice et alarmante, menaçant les écosystèmes de notre planète. Ce constat est préoccupant : dégradation de l'environnement, épuisement des ressources naturelles, pollution croissante, etc. Les conséquences néfastes à l'échelle mondiale, telles que le réchauffement climatique et les risques environnementaux, ont suscité une inquiétude croissante quant à l'avenir environnemental de notre planète.

L'Accord de Paris de 2015 a instauré une nouvelle ère de sensibilisation globale aux enjeux climatiques. Il a mis en évidence l'urgence de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de minimiser la consommation énergétique. Le secteur de la construction, connu pour son influence sur le climat, se trouve au cœur de cette transition nécessaire.

Pour répondre à ce défi, il est impératif de concentrer les efforts sur la diminution de la consommation énergétique des bâtiments et la réduction des émissions de carbone. En adoptant des pratiques durables et en intégrant des technologies de construction respectueuses de l'environnement, le secteur immobilier peut apporter une contribution significative à la lutte contre le réchauffement climatique.

Des objectifs ambitieux ont été établis pour diminuer les émissions de carbone, avec un accent particulier sur les bâtiments tertiaires. Cette approche comprend l'utilisation de matériaux écologiques, le recours aux énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique des constructions. Ces initiatives visent non seulement à réduire l'empreinte carbone des bâtiments, mais également à créer des environnements intérieurs sains et confortables pour les occupants.

L'Algérie souligne l'importance de ces pratiques dans sa politique énergétique et environnementale. Cependant, malgré ces orientations favorables, ces principes sont encore rarement mis en œuvre dans les constructions actuelles. À l'échelle mondiale, la priorité environnementale exige l'intégration systématique des considérations écologiques dans le processus de projet architectural. Diverses méthodes d'évaluation environnementale, telles que l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), sont désormais accessibles aux professionnels pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments, offrant des moyens concrets pour des décisions éclairées. L'ACV permet d'identifier les phases du cycle de vie des bâtiments nécessitant des améliorations pour réduire l'empreinte carbone, en soulignant l'importance de

l'énergie dans le bilan environnemental global. Cette évaluation exige une collaboration interdisciplinaire, bien que la coordination reste un défi.

Cette étude a pour objectif de contribuer à la problématique en analysant la performance thermique, énergétique et environnementale d'une chambre d'hôtel dans un complexe touristique à Guelma, en Algérie. L'analyse couvre les phases de construction, d'exploitation, de rénovation et de fin de vie, en évaluant les besoins énergétiques et les impacts environnementaux. Nous avons utilisé le logiciel Pléiades, intégrant un moteur de Simulation Thermique Dynamique (STD), ainsi que l'outil ACV Equer pour évaluer 12 indicateurs environnementaux. L'analyse de cycle de vie (ACV) réalisée sur notre cas d'étude vise à identifier les éléments essentiels à prendre en compte et à déterminer à quel stade de la vie du bâtiment il serait nécessaire d'intervenir pour réduire les impacts environnementaux.

Les résultats indiquent que la phase d'utilisation de la chambre représentait 94,02 % de l'ensemble des impacts environnementaux. L'application des scénarios basés sur une stratégie bas carbone, telles que l'installation des fenêtres en PVC à triple vitrage peu émissif argon, l'utilisation d'isolants biosourcés et l'intégration des énergies renouvelables, peuvent réduire les besoins énergétiques de la chambre à 50 %, et diminuer les impacts environnementaux à 35.88 % par rapport à la situation initiale.

L'installation de fenêtres en PVC à triple vitrage peu émissif d'argon entraîne une baisse significative des besoins énergétiques lors du remplacement du vitrage, pouvant atteindre jusqu'à 17,31 % par rapport à l'utilisation d'un simple vitrage. Cette réduction des besoins se traduit par une diminution des émissions de 10,84 tonnes de CO₂ équivalent sur l'ensemble du cycle de vie de la chambre.

Après avoir examiné les performances thermiques, isolantes et environnementales de divers matériaux, nous avons choisi la laine de chanvre. Ce matériau, à la fois écologique et biosourcé, se distingue par ses propriétés remarquables dans ces domaines.

Les résultats de notre étude confirment ces avantages : l'utilisation de la laine de chanvre permet une réduction de 12,99 % des besoins énergétiques et diminue les émissions de CO₂ de 12,04 tonnes sur l'ensemble du cycle de vie de la chambre.

De plus, en augmentant l'épaisseur de l'isolant du toit, initialement isolé avec du liège écologique, nous avons réussi à réduire les besoins énergétiques de 14,91 % et les émissions de CO₂ de 9,68 tonnes tout au long de la durée de vie de la chambre.

L'analyse du cycle de vie a également révélé que l'intégration de panneaux photovoltaïques monocristallins offre un avantage environnemental significatif, réduisant considérablement les impacts environnementaux. Ces modifications, incluant l'utilisation de matériaux biosourcés et la production d'énergie renouvelable, représentent des opportunités clés pour relever le défi climatique et atteindre les objectifs de bâtiments à faible émission de carbone.

La performance thermique des bâtiments joue un rôle central dans la réduction de la consommation d'énergie, favorisant ainsi des économies et l'adoption de politiques énergétiques efficaces. Cela contribue à la diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES) et à la préservation de l'environnement. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est ainsi devenue un outil privilégié dans le secteur de la construction.

Notre recherche confirme que l'amélioration de la performance thermique des bâtiments passe par l'optimisation des composants de leur enveloppe, ce qui est essentiel pour la gestion énergétique et la réduction de leur empreinte environnementale. Il est donc crucial que les acteurs du bâtiment adoptent une stratégie bas carbone dans le processus de projet architectural, en équilibrant entre la performance énergétique et la justification environnementale.

Ce projet de recherche s'aligne sur cette approche, en mettant en évidence que l'adoption de vitrages performants, de matériaux biosourcés et l'intégration d'énergies renouvelables permettent de créer une enveloppe efficace, favorisant ainsi les économies d'énergie et la réduction des impacts environnementaux. Cela contribue à la création d'un bâtiment bas carbone. Il est impératif de généraliser ces pratiques aux bâtiments en Algérie et de développer des services d'évaluation environnementale dès la phase de conception, en utilisant une méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) adaptée au secteur du bâtiment.

2. Limites de la recherche et difficultés rencontrées

Comme tout travail de recherche, il y a eu plusieurs obstacles rencontrés, il y a également eu des limites, nous ne pouvons donc pas prétendre avoir fourni des résultats sans faille.

- Au cours des deux saisons, j'ai rencontré des défis majeurs lors de l'interrogation des usagers de l'hôtel, entraînant ainsi une perte de temps significative. Les obstacles rencontrés lors de cette tâche ont compromis l'efficacité du processus et ont entravé la collecte d'informations essentielles.

- Il est essentiel de souligner l'impact de l'absence de licence pour le progiciel choisi sur notre travail. Bien que j'aie pu bénéficier d'une licence éducative demandée par l'École des Mines de Paris pour réaliser des simulations, sa durée limitée a restreint la portée de mes recherches. La nécessité d'une licence complète aurait donné l'opportunité d'explorer davantage et d'analyser les données de manière plus détaillée.

3. Futures pistes de recherche

Cette étude offre des contributions novatrices pour l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans le domaine de la construction. Les résultats obtenus peuvent servir de référence pour optimiser la gestion énergétique et réduire l'empreinte carbone. Les futures recherches pourraient explorer les axes suivants :

- **Comparaison des coûts financiers** : Analyse des coûts financiers de la chambre dans son état actuel et sous différents scénarios envisagés, permettant une évaluation économique détaillée.
- **Intégration interdisciplinaire de l'ACV** : Incorporation de l'ACV dans d'autres disciplines architecturales, comme l'étude de la typologie des bâtiments, pour une approche holistique de la conception.
- **Évaluation des conceptions circulaires** : Utilisation de l'ACV pour évaluer les approches de conception circulaire dans la construction, en mettant l'accent sur la durabilité et la réutilisation des matériaux.
- **Analyse de la durabilité et de la résilience** : Étude de la durabilité et de la résilience des matériaux à faible émission de carbone sur l'ensemble du cycle de vie, en tenant compte de leurs performances dans diverses conditions environnementales.

BIBLIOGRAPHIE

- Adalberth, K. (1997). Energy use during the life cycle of buildings : A method. *Building and Environment*, 32(4), 317-320. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00068-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00068-6)
- AFNOR. (2004). P 01-010 Qualité environnementale des produits de construction. *Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction*.
- Ahmed, A., Qayoum, A., & Mir, F. Q. (2021). Spectroscopic studies of renewable insulation materials for energy saving in building sector. *Journal of Building Engineering*, 44, 103300. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103300>
- Ahmed Ali, K., Ahmad, M. I., & Yusup, Y. (2020). Issues, Impacts, and Mitigations of Carbon Dioxide Emissions in the Building Sector. *Sustainability*, 12(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/su12187427>
- Allacker, K. (2010). *Sustainable building : The development of an evaluation method* [Thèse de Doctorat, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven].
- Anchisi, D. (2020). Dphi Architecture, L'architecture Écologique. <http://www.dphi-archi.fr/mon-atelier/l-architecture-écologique/>. Consulté le 08/12/2023.
- André, P., Delisle, C. E., Revéret, J.-P., & Sène, A. (1999). *L'évaluation des impacts sur l'environnement : Processus, acteurs et pratique* (Montréal, Presses internationales Polytechnique). IUCN: International Union for Conservation of Nature.
- APRUE. (2015). *Programme de développement de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030*. https://rise.esmap.org/data/files/library/algeria/Energy%20Efficiency/Algeria_Energy%20Efficiency%20Program%20in%20Algeria-APRUE_2015.pdf. Consulté le 17/02/2024.
- APS. (2021). *Algérie Presse Service, La lutte contre les changements climatiques au centre des priorités de l'Algérie*. <https://www.aps.dz/sante-science-technologie/132231-la-lutte-contre-les-changements-climatiques-au-centre-des-priorites-de-l-algerie>. Consulté le 17/03/2024.

- Ara, C. (2014). *Prix des énergies primaires*. https://www.i4ce.org/wp-content/uploads/2022/07/TC96_FR-1.pdf. Consulté le 15/08/2023.
- Arce, S. P. C. (2022). *Le traitement de la réglementation environnementale RE2020 par la maîtrise d'ouvrage : Quelles pratiques de gestion mettre en place* [Mémoire de Master en Urbanisme et aménagement, Institut d'Urbanisme et Géographie Alpine, IUGA].
- Atmaca, A., & Atmaca, N. (2022). Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130691>
- Bekker, P. C. F. (1982). A life-cycle approach in building. *Building and Environment*, 17(1), 55-61. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(82\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0360-1323(82)90009-9)
- Beldi, N., & Lounis, S. (2021). *L'amélioration des performances environnementales des équipements publics en Algérie : Cas du nouveau siège de la wilaya de Jijel*. [Mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Benyahia - JIJEL].
- Bengana, F., Haddad Née Guettouche, F. Z., & Guenachi, K. (2019). *Le Développement Durable : Entre Objectifs De Développement Durable Et Innovation Environnementale*. [Articles Scientifiques Et Publications, Ecole Supérieure De Gestion Et D'economie Numérique].
- Benlaria, S. (2017). *Évaluation de la qualité environnementale du bâtiment à travers la démarche ACV* [Mémoire de magistère, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme-Hocine Aït Ahmed].
- Benzerari, S. (2013). *L'évolution des quartiers anciens «quels enjeux urbains» cas d'étude : La cite–Bon accueil-Guelma* [Mémoire de Magister, Université de Annaba-Badji Mokhtar].

- Blengini, G. A. (2009). Life cycle of buildings, demolition and recycling potential : A case study in Turin, Italy. *Building and Environment*, 44(2), 319-330.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.03.007>
- Bliefert, C., & Perraud, R. (2001). Chimie De L'environnement : Air, Eau, Sol, Déchets. 1^{ère} Edition. De Boeck & Larciensa, Bruxelles. 477 P.
- Boisgibault, L. (2015). *Objectif COP21 : Vers une transition énergétique concertée en Méditerranée ?*
https://www.ipemed.coop/adminIpemed/media/fich_article/1448964737_Article%20COP%2021%20IPEMED_v3.pdf. Consulté le 20/02/2024.
- Bonamente, E., Brunelli, C., Castellani, F., Garinei, A., Biondi, L., Marconi, M., & Piccioni, E. (2018). A life-cycle approach for multi-objective optimisation in building design : Methodology and application to a case study. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 35(1-4), 158-179.
<https://doi.org/10.1080/10286608.2019.1576646>
- Börjesson, P., & Gustavsson, L. (2000). Greenhouse gas balances in building construction : Wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. *Energy Policy*, 28(9), 575-588. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00049-5)
- Bouamama, W. (2013). *Au Sujet De La Politique D'efficacite Energetique En Algerie : Approche Systemique Pour Un Développement Durable Cas De : Programme Eco-bat* [Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen].
- Bourg, D. (2002). Des problèmes résolument contemporains. *Les Nouveaux Utopistes du développement durable*, 181-185.
- Bourg, D., & Ermine, J.-L. (2002). Les risques technologiques : Un essai de typologie. *Quaderni*, 48(1), 67-77.

- Boutaud, A. (2005).** *Le développement durable : Penser le changement ou changer le pansement ? : bilan et analyse des outils d'évaluation des politiques publiques locales en matière de développement durable en France : de l'émergence d'un changement dans les modes de faire au défi d'un changement dans les modes de penser* [Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne].
- Brunner, N., & Starkl, M. (2004).** Decision aid systems for evaluating sustainability : A critical survey. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(4), 441-469.
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013).** Life cycle assessment in the construction sector : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 379-388.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014).** Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394-416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Çakmaklı, A. B. (2007).** *Life cycle assessment of building materials in hotel refurbishment projects : A case study in ankara* [Thèse de Doctorat, Middle East Technical University, Ankara].
- Caritas Algérie. (2011).** *Changement climatique en Algérie.*
<https://www.caritas.org/2011/07/changement-climatique-en-algerie/?lang=fr>
Consulté le 17/03/2024.
- Cegibat, G. (2021, octobre 21).** *Le besoin d'eau chaude sanitaire dans les établissements hôteliers.* Cegibat.fr. <https://cegibat.grdf.fr/dossier-techniques/besoin-eau-chaude-sanitaire-etablissements-hoteliers>

- Chase, S. (2021). *COP26, Décisions et implications pour le secteur du bâtiment*. BIMObject for Business. <https://business.bimobject.com/fr/blog/cop26-decisions-et-implications-pour-le-secteur-du-batiment/>
- Chauvin, T., & Palis, W. (2021). *Formation « Transition écologique dans le secteur du bâtiment », centre val de loire*. https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/3115/Formation%20Transition%20%C3%A9cologique%20dans%20le%20secteur%20du%20b%C3%A2timent.pdf. Consulté le 16/03/2024.
- Cherqui, F. (2005). *Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier-méthode ADEQUA* [Thèse de doctorat en génie civil, Université de la Rochelle].
- Chevalier, J. (2009). Analyse du cycle de vie : Utilisation dans le secteur de la construction. *Techniques de l'ingénieur. Environnement, 1*(G5880).
- Choi, Y. (2022). Seasonal Performance Evaluation of Air-Based Solar Photovoltaic/Thermal Hybrid System. *Energies, 15*(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/en15134695>
- Cole, R. J., & Kernan, P. C. (1996). Life-cycle energy use in office buildings. *Building and Environment, 31*(4), 307-317. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(96\)00017-0](https://doi.org/10.1016/0360-1323(96)00017-0)
- Colombert, M., de Chastenet, C., Diab, Y., Gobin, C., Herfray, G., Jarrin, T., Peuportier, B., Tardieu, C., & Trocmé, M. (2011). Analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier : Un outil d'aide à la décision? Le cas de la ZAC Claude Bernard à Paris (France). *Environnement urbain / Urban Environment, 5*, c1-c21. <https://doi.org/10.7202/1007605ar>

- COP26 : L'Algérie défend le principe d'équité dans l'application de l'accord de Paris.*
(2021, octobre 31). <https://www.aps.dz/monde/129712-cop26-l-algerie-defend-le-principe-d-equite-dans-l-application-de-l-accord-de-paris>. Consulté le 16/08/2023.
- Couderc, E. (2018). Impacts throughout a building's life. *Nature Energy*, 3(3), Article 3.
<https://doi.org/10.1038/s41560-018-0117-0>
- Crawford, R. (2011). *Life cycle assessment in the built environment*. Routledge, p 33.
- Cuce, E., Cuce, P. M., & Riffat, S. (2016). Novel glazing technologies to mitigate energy consumption in low-carbon buildings : A comparative experimental investigation. *International Journal of Energy Research*, 40(4), 537-549.
<https://doi.org/10.1002/er.3478>
- Cuéllar-Franca, R. M., & Azapagic, A. (2012). Environmental impacts of the UK residential sector : Life cycle assessment of houses. *Building and Environment*, 54, 86-99. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.005>
- Da Cunha, A. (2005). *Enjeux du développement urbain durable : Transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance*. PPUR presses polytechniques.
- Dakhia, A & Zemmouri, N. (2018). *L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) D'UN BATIMENT DURABLE PAR L'ETUDE DU SYSTEME D'ISOLATION THERMIQUE : CAS D'UN BATIMENT DE BUREAUX DANS LA VILLE DE BISKRA, ALGERIE | Courrier du Savoir*.
- Dakhia, A. (2019). *L'analyse du cycle de vie, comme stratégie de développement d'un bâtiment durable dans les milieux arides à climat chaud et sec. Cas de la ville de Biskra*. [Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider–Biskra].
- Dascalaki, E., & Balaras, C. A. (2004). XENIOS—a methodology for assessing refurbishment scenarios and the potential of application of RES and RUE in

- hotels. *Energy and Buildings*, 36(11), 1091-1105.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.03.007>
- De Caevel, B., & Ooms, R. (2005). *Typologie des enjeux environnementaux et usages des différentes méthodes d'évaluation environnementale, notamment dans le domaine des déchets et des installations industrielles*. RECORD, Bruxelles.
- Dervyn, Y. (2023). *Le label Bas Carbone de l'Etat pour assurer la compensation carbone*. XPair. https://conseils.xpair.com/actualite_experts/label-bas-carbone-etat.htm. Consulté le 16/03/2024.
- Désaunay, C. (2023). La neutralité carbone en 2050 ? *Constructif*, 64(1), 87-93.
<https://doi.org/10.3917/const.064.0087>
- Dessus, B. (2014). La transition énergétique : Pourquoi, pour qui et comment? *Les possibles*, 3, 1-5.
- Dewandre, L. (2017). *Analyse de l'impact environnemental de la centrale hydroélectrique du barrage Bacquelaine à Chaudfontaine selon les normes ISO 14 040 et 14 044* [Mémoire de Master, Université de Liège, Liège, Belgique].
- DGNB. (2010). *DONNÉES ÉCO-CONSTRUCTION*. <https://www.oekobaudat.de/>
- Direction du Commerce de la Wilaya de Guelma. (2021). *Wilaya de Guelma*.
<https://www.dcwguelma.dz/fr/index.php/wilaya-guelma>. Consulté le 20/03/2024.
- Douakha, Z. (2022). Complexe Thermal de Hammam Chellala : L'investissement à la source. *EL Moudjahid*. <https://www.elmoudjahid.dz/fr/regions/complexe-thermal-de-hammam-chellala-l-investissement-a-la-source-192434>. Consulté le 20/05/2024.
- DTA. (2022a). *Zone de Hammam Debagh—Direction du Tourisme et de l'Artisanat Guelma*. <https://guelma.mta.gov.dz/fr/zone-de-hammam-debagh/>. Consulté le 20/05/2024. Consulté le 20/05/2024.

- DTA. (2022b). *Zone de Hammam Ouled Ali—Direction du Tourisme et de l'Artisanat Guelma*. <https://guelma.mta.gov.dz/fr/zone-de-hammam-ouled-ali-2/>. Consulté le 20/05/2024.
- Duan, H., Zhang, S., Duan, S., Zhang, W., Duan, Z., Wang, S., Song, J., & Wang, X. (2019). Carbon Emissions Peak Prediction and the Reduction Pathway in Buildings during Operation in Jilin Province Based on LEAP. *Sustainability*, *11*(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/su11174540>
- Ekopolis. (2023). *Bâtiment Max Weber—Université Paris Ouest Nanterre*. <https://www.ekopolis.fr/operations-batiment/batiment-max-weber-universite-paris-ouest-nanterre>. Consulté le 18/03/2024.
- ESU-services. (2023). Base de données ecoinvent. *ESU-services Ltd. - fair consulting in sustainability*. <https://esu-services.ch/fr/banque-de-donnees/ecoinvent/>. Consulté le 19/03/2024.
- Fenni, F. (2022). (Potentiels et perspectives des énergies renouvelables en Algérie (Expériences de certains pays. *Revue Organisation et Travail*, *11*(1), 401-413.
- Ferradji, K. (2017). *Evaluation des performances énergétiques et du confort thermique dans l'habitat : Cas des logements HPE de l'OPGI de Blida* [Mémoire de magister, Université Mohamed Khider-Biskra].
- Filimonau, V., Dickinson, J., Robbins, D., & Huijbregts, M. A. J. (2011). Reviewing the carbon footprint analysis of hotels : Life Cycle Energy Analysis (LCEA) as a holistic method for carbon impact appraisal of tourist accommodation. *Journal of Cleaner Production*, *19*(17-18), 1917-1930. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.002>

- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Hischer, R., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Wernet, G., & Nemecek, T. (2007). *Overview and methodology. Data v2. 0 (2007). Ecoinvent report No. 1.* Ecoinvent Centre.
- Gao, T., Liu, Q., & Wang, J. (2014). A comparative study of carbon footprint and assessment standards. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(3), 237-243. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt041>
- Gerilla, G. P., Teknomo, K., & Hokao, K. (2007). An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction. *Building and Environment*, 42(7), 2778-2784. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.021>
- Ghosh, A. (2020). Potential of building integrated and attached/applied photovoltaic (BIPV/BAPV) for adaptive less energy-hungry building's skin : A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123343. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123343>
- Grosjean, J. (2022). Les stratégies des pays nordiques en matière de rénovation énergétique des logements: *Annales des Mines - Réalités industrielles*, Mai 2022(2), 85-89. <https://doi.org/10.3917/rindu1.222.0085>
- Guerniou, C. (2023). Le carbone dans le bâtiment, le bâtiment dans la décarbonation. *Constructif*, 64(1), 68-72. <https://doi.org/10.3917/const.064.0068>
- Haitao Wang, Yuge Huang, Chengzhou Guo, Liu Yang, & Lu Huang. (2023). A low-carbon optimization design method for building roof insulation using comprehensive economic analysis model and evaluation index. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102937. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102937>
- Hamiti, D., & Bouzadi-daoud, S. (2021). *La Strategie Algerienne De Transition Energetique Conformement Au Programme De Developpement Des Energies*

Renouvelables Et D'efficacite Energetique : Etat Des Lieux Et Perspectives De Developpement.

Hammond, G. P., & Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 161(2), 87-98. <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>

Hanna instruments. (2021). *HI9564 Thermohygrometers with Temperature and Relative Humidity measurement—Hanna Instruments (Thailand)*. <https://www.hannathailand.com/en/product/hi9564-thermohygrometers-with-temperature-and-relative-humidity-measurement/>. Consulté le 27/05/2024.

Hetzel, J. (2003). *Haute qualité environnementale du cadre bâti : Enjeux et pratiques*. Afnor, France.

Hong, J., Shen, G. Q., Feng, Y., Lau, W. S., & Mao, C. (2015). Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building : A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 103, 249-259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.023>

Huang, W., Li, F., Cui, S., Li, F., Huang, L., & Lin, J. (2017). Carbon Footprint and Carbon Emission Reduction of Urban Buildings : A Case in Xiamen City, China. *Procedia Engineering*, 198, 1007-1017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.146>

Huberman, N., & Pearlmutter, D. (2008). A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, 40(5), 837-848. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.06.002>

Inies. (2024). L'ACV bâtiment. *Inies*. <https://www.inies.fr/inies-pour-le-batiment/lacv-batiment/>. Consulté le 19/03/2024.

ISO 14040. (2006). *ISO (international Standardization Organization) 14040:2006—Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.

- ISO 14044. (2006). *ISO (international Standardization Organization)14044, Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and guidelines.*
- Izuba énergies. (2017). *Base Pleiades—L'écoconception du bâtiment, de l'esquisse à l'ACV.* <https://www.izuba.fr/>. <https://www.izuba.fr/logiciels/outils-logiciels/>. Consulté le 01/04/2024.
- Izuba énergies. (2023). *Pleiades et ses modules—Documentation des logiciels IZUBA énergies.* https://pleiades-doc.com/v4/fr/index.php/Pleiades_et_ses_modules?toc-id=9. Consulté le 20/03/2024.
- Jolliet, O., Saadé, M., & Crettaz, P. (2010). *Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan (Vol. 23).* Lausanne : PPUR Presses polytechniques.
- Jones, P., & Xiaoxiao, L. (2008). *Low carbon building design : European experience.* *第七届亚洲建筑国际交流会 (ISAIA) 论文集. 北京: 中国建筑学会, 159-163.*
- Kamouche, F., & Mokrane, A. (2022). *La politique de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment : Éléments théoriques et empiriques, cas de l'Algérie.* *مجلة الدراسات المالية والمحاسبية والإدارية, 9(2), 490-471.*
- Kaoula, D. (2017). *Elaboration et application d'une méthode d'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments touristiques par analyse du cycle de vie* [Thèse de Doctorat , Université Mohamed Seddik Benyahia - JIJEL].
- Kaoula, D., & Bouchair, A. (2009). *La qualité environnementale et les énergies renouvelables dans le bâtiment hôtelier : Cas de la ville de Jijel en Algérie.*
- Kaoula, D., & Bouchair, A. (2018). *Evaluation of environmental impacts of hotel buildings having different envelopes using a life cycle analysis approach.* *Indoor and Built Environment, 27(4), 561-580.* <https://doi.org/10.1177/1420326X16683235>

- Kaoula, D., & Bouchair, A. (2020).** Identification of the best material-energy-climate compatibility for five ecological houses and the contribution of their impact sources to the overall balance. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101781. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101781>
- Karatas, E. (2019).** *Analyse du cycle de vie de la rénovation d'un quartier dans plusieurs pays européens* [Mémoire de Master, Université de Liège, Liège, Belgique].
- KBOB. (2010).** *Ecobau / Instruments / Recommandations KBOB*. <https://www.ecobau.ch/fr/instruments/recommandations-kbob>. Consulté le 20/03/2024.
- Kim, R., Tae, S., & Roh, S. (2017).** Development of low carbon durability design for green apartment buildings in South Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.120>
- Kirati, A. (2020).** *L'intégration d'énergie solaire dans les centres de loisir scientifique* [Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 - Guelma].
- Kirati, A., Dechaicha, A., & Alkama, D. (2023).** Towards a low-carbon strategy guided by the integration of renewable energy in building. The case of tourist complex in guelma. *PERIODICO di MINERALOGIA*, Volume 92, No. 5.
- Kirati, A., Medjeldi, Z., Dechaicha, A., & Alkama, D. (2023).** The Transition to Integrated Renewable Energy : A Framework for Low Energy Building Design. *Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.38027/iccaua2023en0168>
- Labaran, Y. H., Mathur, V. S., & Farouq, M. M. (2021).** The carbon footprint of construction industry : A review of direct and indirect emission. *Journal of*

Sustainable Construction Materials and Technologies, 6(3), Article 3.

<https://doi.org/10.29187/jscmt.2021.66>

Lakhdari, K., Sriti, L., & Painter, B. (2021). Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. *Building and Environment*, 204, 108173.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>

Lasvaux, S. (2010). *Étude d'un modèle simplifié pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments* [Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris].

Latha, P. K., Darshana, Y., & Venugopal, V. (2015). Role of building material in thermal comfort in tropical climates – A review. *Journal of Building Engineering*, 3, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.06.003>

Le mix énergétique – Portail algérien. (2019). <https://portail.cder.dz/2019/02/17/le-mix-energetique/>. Consulté le 17/08/2023. Consulté le 17/08/2023.

Le Pôle Eco-conception. (2023). *Analyse du Cycle de Vie ACV*. [eco-conception.fr](https://www.eco-conception.fr). <https://www.eco-conception.fr/static/analyse-du-cycle-de-vie-acv.html>. Consulté le 19/03/2024.

Lefebvre Dalloz. (2023). *Réglementation environnementale 2020 (RE2020) : De quoi s'agit-il ?* | *Lefebvre Dalloz Compétences*. <https://formation.lefebvre-dalloz.fr/actualite/reglementation-environnementale-2020-re2020-de-quoi-sagit-il>. Consulté le 16/03/2024.

Leopold, L. B. (1971). *A procedure for evaluating environmental impact* (Vol. 645). Washington, D.C, United States Geological Survey.

Lessard, Y. (2017). *Modélisation de L'influence de la Sélection des Matériaux sur le Profil Environnemental du Cycle de vie D'un Bâtiment à Bureaux : Évaluation Critique*

- de Leed V4* [Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke: Sherbrooke, QC, Canada].
- Li, Q., & Ou, X. (2010). Analysis of the definition and development of low carbon buildings. *Construction Economy*, 2, 35-38.
- Limousin, V. (2022). *Vizea—Stratégie Bas Carbone pour le secteur du bâtiment : De gros chantier à venir*. <http://www.vizea.fr/actualites/actus/1101-strategie-bas-carbone-pour-le-secteur-du-batiment-de-gros-chantier-a-venir.html>. Consulté le 16/03/2024.
- Lin, B., Omoju, O. E., & Okonkwo, J. U. (2015). Impact of industrialisation on CO2 emissions in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1228-1239. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.164>
- LoRe-LCA. (2010). *Low Resource consumption buildings and constructions by use of LCA in design and decision making*. LoRe-LCA. <https://www.sintef.no/projectweb/lore-lca/>. Consulté le 20/03/2024.
- Lotteau, M., Loubet, P., Pousse, M., Dufresnes, E., & Sonnemann, G. (2015). Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Building and Environment*, 93, 165-178. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.029>
- Magdelaine, C. (2022). *Acidification des océans : Un phénomène 10 fois plus rapide qu'il y a 56 millions d'années*. <https://www.notre-planete.info/actualites/4136-acidification-océans-carte-CO2-plastiques>. Consulté le 09/03/2024.
- Mandallena, C. (2006). *Elaboration et application d'une méthode d'évaluation et d'amélioration de la qualité environnementale de bâtiments tertiaires en exploitation* [Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, France].

- Mazari, M. (2012).** *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : Cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-Ouzou)* [Thèse de Doctorat, Université Tizi-Ouzou].
- Medjeldi, Z., Kirati, A., Dechaicha, A., & Alkama, D. (2023).** Parametric design of a residential building system through solar energy potential : The case of Guelma, Algeria. *Journal of Physics: Conference Series*, 2600(4), 042012.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/4/042012>
- MEM. (2007).** Ministère de l'Energie et des Mines. *République Algérienne Démocratique et Populaire*, 4-5.
- Menet, J.-L., & Gruescu, I. C. (2014).** *L'éco-conception dans le bâtiment : En 37 fiches-outils*. Paris : Dunod.
- Minh, H.-D. (1998).** *Comment tenir compte de l'irréversibilité dans l'évaluation intégrée du changement climatique* [Thèse de doctorat, École des hautes Études en Sciences Sociales, Paris].
- Ministère de la transition écologique. (2023).** *RE 2020, Réglementation environnementale, Éco-construire pour le confort de tous*.
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20030_DP_RE2020_A4-1_pdf_accessible.pdf. Consulté le 01/03/2024.
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. (2022).** *Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)*. <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>. Consulté le 01/03/2024.
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. (2024).** *Réglementation environnementale RE2020*.
<https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020>. Consulté le 16/08/2023.

- Mokhnache, N. (2023). *IMPACT DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT SUR SON EFFICIENCE ENERGETIQUE – CAS DES LOTISSEMENTS- GUELMA – IMPACT OF BUILDING ENVELOPPE ON ENERGY EFFICIENCY ON THE BUILDING – CASE OF STUDY – ALLOTMENTS- GUELMA-* [Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 - Guelma].**
- Nations Unies. (2013). *Unies : Population, development and the environment—Google Scholar.***
https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Population%2C%20development%20and%20the%20environment&publication_year=2013&author=Nations%20Unies
- Nematchoua, M. K., Orosa, J. A., & Reiter, S. (2019). Life cycle assessment of two sustainable and old neighbourhoods affected by climate change in one city in Belgium : A review. *Environmental Impact Assessment Review*, 78, 106282.**
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106282>
- Nematchoua, M. K., Sadeghi, M., & Reiter, S. (2021). Strategies and scenarios to reduce energy consumption and CO2 emission in the urban, rural and sustainable neighbourhoods. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103053.**
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103053>
- Nematchoua, M. K., Sendrahasina, R. M., Malmedy, C., Orosa, J. A., Simo, E., & Reiter, S. (2022). Analysis of environmental impacts and costs of a residential building over its entire life cycle to achieve nearly zero energy and low emission objectives. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133834.**
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133834>

- Nematchoua, M. K., Teller, J., & Reiter, S. (2019). Statistical life cycle assessment of residential buildings in a temperate climate of northern part of Europe. *Journal of Cleaner Production*, 229, 621-631. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.370>
- Observatoire de l'Immobilier Durable. (2021). *LABEL BBCA ET LABEL BAS-CARBONE : QUELLE(S) DIFFÉRENCE(S) ?*
https://resources.taloen.fr/resources/documents/5174_211216_fiche_comparative_VF.pdf. Consulté le 16/03/2024.
- openLCA. (2024). *Le premier logiciel d'évaluation du cycle de vie open source hautes performances au monde*. <https://www.openlca.org/>. Consulté le 19/03/2024.
- Ouled Diaf, A. (2023). *Evaluation des effets de la ventilation naturelle sur la qualité de l'air intérieur. Ilot urbain-Cité Guehdour Tahar-Guelma* [Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 - Guelma].
- Pal, S. K., Takano, A., Alanne, K., & Siren, K. (2017). A life cycle approach to optimizing carbon footprint and costs of a residential building. *Building and Environment*, 123, 146-162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.051>
- Pannier, M.-L. (2014). *Analyse de cycle de vie des maisons INCAS*. [Thèse de Doctorat, INSA de Strasbourg].
- Peuportier, B. (2003). *Eco-conception des bâtiments : Bâtir en préservant l'environnement*. les presses de l'école des MINES, Paris.
- Peuportier, B. (2005). Bancs d'essais de logiciels de simulation thermique. *Journée thématique IBPSA France-SFT 2005, outil de simulation thermo-aéraulique du bâtiment*.
- Peuportier, B. (2008). *Eco-conception des bâtiments et des quartiers*. Les Presses MINES ParisTech.

- Peuportier, B., & Boonstra, C. (1997). *Life cycle analysis of buildings : The European project regener. (Paris, June 9-12, 1997. Vol 1, Assessment Methods, Natural Resources. Vol 2, Environmental Management, Environmental Strategies) (Pp. 33-40).*
- Peuportier, B., Kellenberger, D., Anink, D., Mötzl, H., Anderson, J., Vares, S., Chevalier, J., & König, H. (2004). *Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools.*
- PNUE. (2007). *Climate Change and Tourism – Responding to Global Challenges.*
- Popovici, E. (2005). *Contribution à l'analyse du cycle de vie des quartiers* [Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris].
- portail officiel de la ville de Guelma. (2022). *Tourisme et Hotellerie – wilaya guelma.* <https://wilaya-guelma.dz/fr/tourisme/>. Consulté le 20/05/2024.
- Ragobert, I. (2023). *La Stratégie Nationale Bas Carbone pour les nuls (et les moins nuls).* Carbo. <http://www.hellocarbo.com/blog/compenser/strategie-nationale-bas-carbone/>. Consulté le 16/03/2024.
- Rahmouni, S. (2020). *Evaluation et Amélioration Energétiques de Bâtiments dans le cadre du Programme National d'Efficacité Energétique* [Thèse de Doctorat, Université de Batna 2].
- Rainfroy, C. (2015). *COP 21 : L'Algérie dévoile ses promesses pour le climat—Jeune Afrique.* <https://www.jeuneafrique.com/262910/societe/cop-21-lalgerie-devoile-promesses-climat/>. Consulté le 18/03/2024.
- Reiter, S. (2010). Assessing Wind Comfort in Urban Planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(5), 857-873. <https://doi.org/10.1068/b35154>
- Riera Pérez, M. G., & Rey, E. (2013). A multi-criteria approach to compare urban renewal scenarios for an existing neighborhood. Case study in Lausanne

- (Switzerland). *Building and Environment*, 65, 58-70.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.017>
- Robillart, M., Schalbart, P., Chaplais, F., & Peuportier, B. (2019). Model reduction and model predictive control of energy-efficient buildings for electrical heating load shifting. *Journal of Process Control*, 74, 23-34.
<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2018.03.007>
- Rodrigues, C., König, J., & Freire, F. (2023). Prospective life cycle assessment of a novel building system with improved foam glass incorporating high recycled content. *Sustainable Production and Consumption*, 36, 161-170.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.01.002>
- Rossi, B., Marique, A.-F., & Reiter, S. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. *Building and Environment*, 51, 402-407. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.002>
- Roy, B., & Bertier, P. (1971). La Méthode Electre II, une Méthode de Classement en Présence de Critères Multiples. *Note de travail, 142, Direction Scientifique, Sema, Paris.*
- Sachs, I. (1993). L'écodéveloppement, stratégies de transition vers le XXIème siècle. *Syros, Paris.*
- Safer, K. (2016). *Environnement Et Développement Durable* [Polycopié de Cours, Université Des Sciences Et De La Technologie Mohamed-boudiaf - Oran].
- Salomon, T., Mikolasek, R., & Peuportier, B. (2005). Outil de simulation thermique du bâtiment, Comfie. *Journée thématique SFT-IBPSA, 8, 2005.*
- Sanders, L. (2014). Un cadre conceptuel pour modéliser les grandes transitions des systèmes de peuplements de 70 000 BP à aujourd'hui. *Bulletin de la Société Géographique de Liège.*

- Santos-Herrero, J. M., Lopez-Guede, J. M., & Flores-Abascal, I. (2021). Modeling, simulation and control tools for nZEB : A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110851.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110851>
- Sartori, I., & Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings : A review article. *Energy and Buildings*, 39(3), 249-257.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>
- Savvides, A., Vassiliades, C., Michael, A., & Kalogirou, S. (2019). Siting and building-massing considerations for the urban integration of active solar energy systems. *Renewable Energy*, 135, 963-974. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.017>
- Sayad, B. (2021). *La contribution de la végétation et des plans d'eau pour améliorer le confort climatique dans les espaces extérieurs à Guelma* [Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 - Guelma].
- Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Pitman, A. J., Knutti, R., & Wilby, R. L. (2016). Allowable CO2 emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature*, 529(7587), Article 7587. <https://doi.org/10.1038/nature16542>
- Senouci, K., Ahmed, W., & Ahmed, M. (2022). Energies renouvelables : Transition et perspectives Cas de l'Algérie. *Al Bashaer Economic Journal*, 8(1).
- Servaes, R., Allacker, K., Debacker, W., Delem, L., De Nocker, L., De Troyer, F., Janssen, A., Peeters, K., Spirinckx, C., & Van Dessel, J. (2013). Profil environnemental des éléments de construction. *Ovam, Malines*.
- Sevin, M. (2018). *Analyse du cycle de vie à l'échelle du quartier* [Mémoire de Master, Université de Liège, Liège, Belgique].

- Sinteo. (2016). *Livre Blanc bas carbone*. https://www.o-immobilierdurable.fr/wp-content/uploads/2016/12/SINTEO_Livre-Blanc-bas-carbone.pdf. Consulté le 18/03/2024.
- Sphera. (2024). Logiciel et données de développement durable des produits. *Sphera*. <https://sphera.com/logiciels-et-donnees-de-developpement-durable-des-produits/?lang=fr>. Consulté le 19/03/2024.
- Stephan, A., Crawford, R. H., & de Myttenaere, K. (2013). A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses. *Applied Energy*, *112*, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.076>
- Suh, H. S., & Kim, D. D. (2019). Energy performance assessment towards nearly zero energy community buildings in South Korea. *Sustainable Cities and Society*, *44*, 488-498. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.036>
- Theys, J. (1993). *L'environnement à la recherche d'une définition*. Institut français de l'environnement, p 43-45.
- Thiers, S. (2008). *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive* [Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris].
- Thiers, S., & Peuportier, B. (2012). Energy and environmental assessment of two high energy performance residential buildings. *Building and Environment*, *51*, 276-284. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.018>
- Tian-yan, W., & Min, C. (2012). Research on Low-carbon Building Development Based on Whole Life Cycle Analysis. *Procedia Environmental Sciences*, *12*, 305-309. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.282>
- Transition énergétique en Algérie : Défis et perspectives*. (2022, mars 27). <https://premier-ministre.gov.dz/fr/post/transition-energetique-en-algerie-defis-et-perspectives>. Consulté le 17/08/2023.

- Trocmé, M. (2009). *Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie* [Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris].
- Trotec. (2020). *Anémomètre à hélice BA16*. <https://fr.trotec.com/shop/anemometre-a-helice-ba16.html>. Consulté le 26/05/2024.
- UNEP. (2021). *2021 Global Status Report for Buildings and Construction*. UNEP - UN Environment Programme. <http://www.unep.org/resources/report/2021-global-status-report-buildings-and-construction>. Consulté le 12/05/2024.
- Unizio. (2019). *Comment réduire l'impact des chantiers sur l'environnement ?* Unizio Interactive. <https://www.unizio.fr/comment-reduire-l-impact-des-chantiers-sur-l-environnement>. Consulté le 11/03/2024.
- Ville de Chartres. (2018). *Le nouvel hôtel de Ville et d'Agglomération (Pôle administratif) ouvre ses portes*. <https://www.chartres.fr/nouveau-guichet-unique>. Consulté le 18/03/2024.
- Visier, J.-C., & Laurenceau, S. (2019, juillet 4). *Vers des bâtiments neutres en carbone ? Une vision prospective vers 2050*. XPair. https://conseils.xpair.com/actualite_experts/vers-des-batiments-neutres-en-carbone-une-vision-prospective-vers-2050.htm. Consulté le 16/03/2024.
- Vizcab. (2017). *Qu'est-ce que la base INIES ?* Vizcab. <https://vizcab.io/glossaire/base-inies>. Consulté le 19/03/2024.
- Watkins, K. (2007). *Rapport mondial sur le développement humain 2007-2008 : La lutte contre le changement climatique: un impératif de solidarité humaine dans un monde divisé*. Programme des Nations Unies pour le développement.
- Weather Spark. (2023). *Climat, météo par mois, température moyenne pour Guelma (Algérie)*—Weather Spark. <https://fr.weatherspark.com/y/55170/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne->

- %C3%A0-Guelma-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e#Sections-Clouds. Consulté le 26/03/2024.**
- Xi, C., & Cao, S.-J. (2022). Challenges and Future Development Paths of Low Carbon Building Design : A Review. *Buildings*, 12(2), Article 2.**
<https://doi.org/10.3390/buildings12020163>
- XPair. (2024). *Bâtiment bas carbone—Définition*. XPair.**
<https://www.xpair.com/lexique/definition/batiment-bas-carbone.htm>. Consulté le 16/03/2024.
- Zekraoui, D. (2017). *L'impact de l'ouverture de la façade sur la consommation de l'énergie dans les bâtiments à usage de bureau sous un climat chaud et sec* [Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider - Biskra].**
- Zhang, L., Li, Q., & Zhou, J. (2017). Critical factors of low-carbon building development in China's urban area. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3075-3082. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.160>**
- Zhang, Y., Shen, L., Shuai, C., Tan, Y., Ren, Y., & Wu, Y. (2019). Is the low-carbon economy efficient in terms of sustainable development? A global perspective. *Sustainable Development*, 27(1), 130-152. <https://doi.org/10.1002/sd.1884>**

ANNEXES

Annexe 1

Homologation des appareils de mesure

Afin d'effectuer nos mesures, nous avons utilisé les appareils suivants :

Thermo hygromètre : Les mesures de température et d'humidité sont effectuées à l'aide d'un Thermo-Hygromètre portable et étanche HANNA 9564.



Fig. 98 : Thermo-Hygromètre HANNA 9564.

Le thermo-hygromètre portatif HI 9564 est spécialement conçu pour offrir des performances optimales dans des environnements difficiles. Il mesure à la fois l'humidité relative et la température grâce à une sonde intégrée, enregistrant les données d'étalonnage pour une précision accrue. Son boîtier solide en fait un choix idéal pour les mesures sur site, avec la fonction HOLD qui facilite l'enregistrement des données en maintenant une valeur figée à l'écran. Avec sa facilité d'utilisation et son adaptabilité aux mesures de terrain, cet appareil est un outil essentiel pour les professionnels. Les caractéristiques spécifiques de l'appareil sont disponibles dans le tableau ci-dessous (tab.34).

Annexe 1

Tab. 34 : Caractéristiques du Thermo Hygromètre HANNA 9564 (Hanna instruments, 2021)

Référence	HI 9564	
Gamme	HR	20,0 à 95,0%
	Température	0,0 à 60,0°C (32 à 140°F)
Résolution	HR	0,1 % d'humidité relative
	Température	0,1 °C / 0,1 °F
Précision	HR	±3 % HR (50 à 85 % HR et 15 à 40°C) ; ±5% RH (extérieur)
	Température	±0,5°C / ±1°F
Sonde	Sonde HI 70602 RH avec corps fin en ABS, capuchon perforé, capteur de température interne avec connecteur DIN et câble de 1 m (3,3') (inclus)	
Type de batterie/durée de vie	9V / environ 250 heures d'utilisation continuant ; arrêt automatique après 20 minutes de non-utilisation (peut être désactivé)	
Environnement	0 à 60°C (32 à 140°F) ; HR max 98 % sans condensation	
Dimensions	164 x 76 x 45 mm (6,5 x 3 x 1,8)	
Poids	340 g (12 onces)	

Anémomètre :

Le thermo-anémomètre Trotec BA16 a été utilisé pour évaluer la vitesse de l'air. Doté d'un col de cygne flexible de 40 centimètres, il facilite la mesure dans les installations de ventilation et d'aération difficiles à contrôler. Ce dispositif anémométrique permet de mesurer la vitesse du vent, le flux d'air, la température ambiante et le débit volumétrique.



Fig. 99 : Anémomètre à hélice BA16.

Le BA16 est prêt à être utilisé dès sa mise en marche, et les résultats sont clairement visibles sur l'écran rétroéclairé. Il est possible, si besoin, d'afficher les valeurs minimales et maximales

Annexe 1

relevées sur l'écran en cours d'utilisation. Les spécifications détaillées de l'appareil sont fournies dans le tableau ci-dessous (tab.35).

Tab. 35 : Les caractéristiques d'anémomètre BA16 (Trotec, 2020)

Vitesse de débit d'air [m/s]	
Plage de mesure min. [m/s]	1
Plage de mesure max. [m/s]	30
Précision [%]	3
Précision ± [m/s]	0.2
Résolution [m/s]	0.
Principe de mesure	Pale
Débit d'air [m³/min]	
Plage de mesure min. [m ³ /min]	0
Plage de mesure max. [m ³ /min]	999.9
Température ambiante [°C]	
Plage de mesure min. [°C]	-10
Plage de mesure max. [°C]	60
Précision ± [°C]	1.5
Précision - Température	±1.5 °C / ±3 °F
Résolution [°C]	0.1

Annexe 2

Durée et date par type de mesure

Type des mesures	Date des mesures	Durée des mesures	Lieu des mesures	Indicateurs
Mesure de température	07/01/2022 19/08/2022	Mesures Continues, Pas de 2mn de temps	A l'intérieur de la chambre et à son extérieure	Confort hygrothermique
Mesure de l'humidité				Confort aéraulique
Mesure de la vitesse de l'air				
Enquête	Pendant la saison hivernale et estivale	Évaluation sur une durée vécue	Taux de satisfaction vis-à-vis de la qualité environnementale extérieure	Accessibilité et stationnement
				Organisation des espaces extérieurs
				Vue
				Environnement paysager
			Taux de satisfaction vis-à-vis de la qualité environnementale intérieure	Organisation des espaces intérieurs
				Confort thermique
				Qualité de l'air
				Renouvellement de l'air
				Éclairage artificiel
				Éclairage naturel
Horaires d'occupations				
Gestion de l'énergie				

Annexe 3
Questionnaire d'enquête

**Évaluation de la qualité environnementale du bâtiment :
usages et qualité de confort**

Ce questionnaire a pour but de détailler votre appréciation de la qualité du bâtiment hôtelier. Il est composé de 3 parties : informations générales, extérieur du bâtiment et intérieur du bâtiment.
Pour certaines questions, une échelle de notation a été adoptée : merci d'entourer la note choisie :

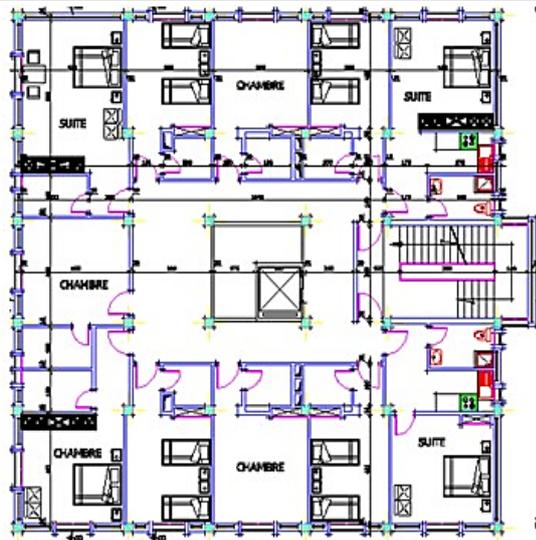
0 1 2 3 4

- 0. Très peu satisfaisant
- 1. peu satisfaisant
- 2. Moyennement satisfaisant
- 3. satisfaisant
- 4. très satisfaisant

Merci de prendre 15 minutes afin de répondre à ce questionnaire, qui a été réalisé de la part de département d'architecture, université 8 Mai 1945 Guelma.

Informations générales

1. Sexe:
 - Monsieur
 - Madame
2. Age :
 - 20/30
 - 30/40
 - 40/50
 - 50/60
 - > 60
3. Hachurez la localisation de votre séjour dans le bâtiment (chambre + étage):
 - 1^{er} étage
 - 2^{eme} étage
 - 3^{eme} étage



Le bâtiment et son environnement (dimension architecturale)

A. Accès et stationnement	1. Êtes-vous satisfait (e) des accès au bâtiment hôtelier ?
	0 1 2 3 4 <hr style="width: 100%;"/>
	2. Êtes-vous satisfait(e) des aires de stationnement ?
	0 1 2 3 4 <hr style="width: 100%;"/>

Annexe 3

B. Abords paysagers du bâtiment	<p>1. Êtes-vous satisfait(e) du côté paysager de la parcelle du bâtiment ?</p> <p style="text-align: center;">0 1 2 3 4</p> <hr style="width: 80%; margin: auto;"/> <p>2. Êtes-vous satisfait(e) des vues sur l'extérieur ?</p> <p style="text-align: center;">0 1 2 3 4</p> <hr style="width: 80%; margin: auto;"/>
L'environnement intérieur du bâtiment (dimension environnementale)	
A. Organisation du bâtiment	<p>1. Etes-vous satisfait(e) de l'organisation globale du bâtiment?</p> <p style="text-align: center;">0 1 2 3 4</p> <hr style="width: 80%; margin: auto;"/> <p>2. La chambre réservée vous semble-t-elle :</p> <p>a. bien disposée dans le bâtiment:</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Oui</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Non</p> <p>b. De surface suffisante:</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Oui</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Non</p> <p>c. Bien équipée en appareil:</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Oui</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Non</p>
B. Le Confort thermique	<p>1. Etes-vous globalement satisfait(e) du confort thermique au niveau de votre chambre?</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Oui</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Non</p> <p>2. Précisez:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hiver: <p style="text-align: center;">0 1 2 3 4</p> <hr style="width: 80%; margin: auto;"/> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Été: <p style="text-align: center;">0 1 2 3 4</p> <hr style="width: 80%; margin: auto;"/> <p>3. Avez-vous constaté des courants d'air indésirables dans la chambre ? (en hiver)</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Oui</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Non</p>
C. Le Confort aéraulique	<p>1. Etes-vous satisfait(e) de la qualité de l'air intérieur ?</p> <p style="text-align: center;">0 1 2 3 4</p> <hr style="width: 80%; margin: auto;"/> <p>2. Le renouvellement d'air vous semble-t-il suffisant?</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Oui</p> <p style="padding-left: 20px;"><input type="checkbox"/> Non</p>

<p align="center">D. Le Confort visuel</p>	<p>1. Comment qualifiez-vous le niveau d'éclairage à l'intérieur de votre chambre ?</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>En hiver:</u> <input type="checkbox"/> <u>Eclairage naturel:</u> <table border="0" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td colspan="5"><hr style="width: 100%;"/></td> </tr> </table> <input type="checkbox"/> <u>Eclairage artificiel:</u> <table border="0" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td colspan="5"><hr style="width: 100%;"/></td> </tr> </table> ▪ <u>En été:</u> <input type="checkbox"/> <u>Eclairage naturel:</u> <table border="0" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td colspan="5"><hr style="width: 100%;"/></td> </tr> </table> <input type="checkbox"/> <u>Eclairage artificiel:</u> <table border="0" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td colspan="5"><hr style="width: 100%;"/></td> </tr> </table> <p>2. Essayez-vous de minimiser l'éclairage artificiel quand l'ensoleillement paraît suffisant ?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non 	0	1	2	3	4	<hr style="width: 100%;"/>					0	1	2	3	4	<hr style="width: 100%;"/>					0	1	2	3	4	<hr style="width: 100%;"/>					0	1	2	3	4	<hr style="width: 100%;"/>				
0	1	2	3	4																																					
<hr style="width: 100%;"/>																																									
0	1	2	3	4																																					
<hr style="width: 100%;"/>																																									
0	1	2	3	4																																					
<hr style="width: 100%;"/>																																									
0	1	2	3	4																																					
<hr style="width: 100%;"/>																																									
<p align="center">E. Planning d'occupation</p>	<p>1. Quels sont vos horaires d'occupations de la chambre?</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 17h – 9h <input type="checkbox"/> 18h – 9h <input type="checkbox"/> 19h - 9h <input type="checkbox"/> 21h – 9h <input type="checkbox"/> 22h – 9h 																																								
<p align="center">F. Gestion de l'énergie</p>	<p>1. Utilisez-vous les stores :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ pour réguler les apports de lumière naturelle ? <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non ▪ pour minimiser les déperditions de chaleur le soir en hiver ? <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non ▪ pour réguler les apports thermiques en été ? <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non 																																								

Annexe 4

Importation de fichier météorologique

a) Au niveau de la base de données météorologiques Météonorm

The image shows a sequence of five steps for creating a new meteorological site in the Météonorm database:

- Step 1:** The 'Sites disponibles' (Available sites) interface. A search bar contains 'guelma'. A red box highlights a globe icon in the top right corner.
- Step 2:** A map view of the Guelma region. A red box highlights the Guelma area on the map.
- Step 3:** The 'Types de site' (Site types) sidebar. A red box highlights the 'Créer un nouveau site...' (Create new site...) button.
- Step 4:** The 'Information sur le site' (Site information) form. The 'Nom' (Name) field contains 'guelma ville 2'. The 'Situation' (Situation) dropdown menu is set to 'Situation ouverte' (Open situation). A red box highlights this dropdown, with the text 'On sélectionne ville' (We select city) below it.
- Step 5:** The bottom of the form with the 'Enregistrer' (Save) button highlighted by a red box.

Annexe 4

Sélection des sites

Sélectionner les sites

On confirme que le nom de notre fichier apparaît également ici.

9 **guelma ville 2**

6 Défini par l'utilisateur

8 Lorsque nous sélectionnons notre fichier, il apparaît ici.

7 On sélectionne Guelma ville 2

10 Suivant →

Formats de sortie

Meteonorm

- Standard
- Meteo
- Standard minute
- Humidity
- Science
- Spectral / UV
- Standard opt.

Simulation bâtiment

- TRNSYS
- CH Meteo
- HELIOS-PC
- DOE
- Suncode
- Match
- sia 380/1
- LESOSAI
- EnergyPlus (.epw)
- DYNBIL
- WUFI Passive/WaVE
- PHPP 8
- Pleiades/Comfie
- WUFI / WAC
- PHLuft
- IDA ICE
- IBK-CCM
- VIP-Energy

PV

- Polysun
- PVSOL
- PVSyst
- PVS
- Meteo matrix (TISO)
- PVScout
- Solinvest
- SAM

Energie solaire thermique

- Polysun
- TSOL
- Solar-Ripp

Diverse

- TMY2
- TRY (DWD)
- TRY (DWD) V1.2
- TMY3

Utilisateur

Défini par l'utilisateur

Modifier données

+ Nouveau

11

← Retour

Suivant →

Résultats et exportation Confirmation **12** **guelma ville 2**

guelma ville 2 36,5°N / 7,4°E, 256 m
Défini par l'utilisateur

Durée d'insolation Rayonnement global journalier
Température journalière Tableau de données
Rayonnement Température Précipitations

13

Sauvegarder tous les résultats sur le disque
 Ouvrir répertoire de sortie

Informations du résultat
Incertitude des valeurs annuelles: Gh = 5%, Bn = 10%, Ta = 1,5 °C
Tendance de Gh / décennie: - Variabilité de Gh / an 3,6%
Sites d'interpolation du rayonnement Données par satellite (Part des données par satelli
Stations de l'interpolation de température: Jendouba (122 km), Annaba (Lessalines) (54 k
< >

Données de sortie (Pleiades/Comfie) **14**

Répertoire de sortie
C:\Users\kirati\Documents

Sélectionner un format de sortie pour les données de temps

Emplacement d'enregistrement de fichier

LOCATIONNAME-hour.try
LOCATIONNAME-15min.try
LOCATIONNAME-10min.try
LOCATIONNAME-min.try

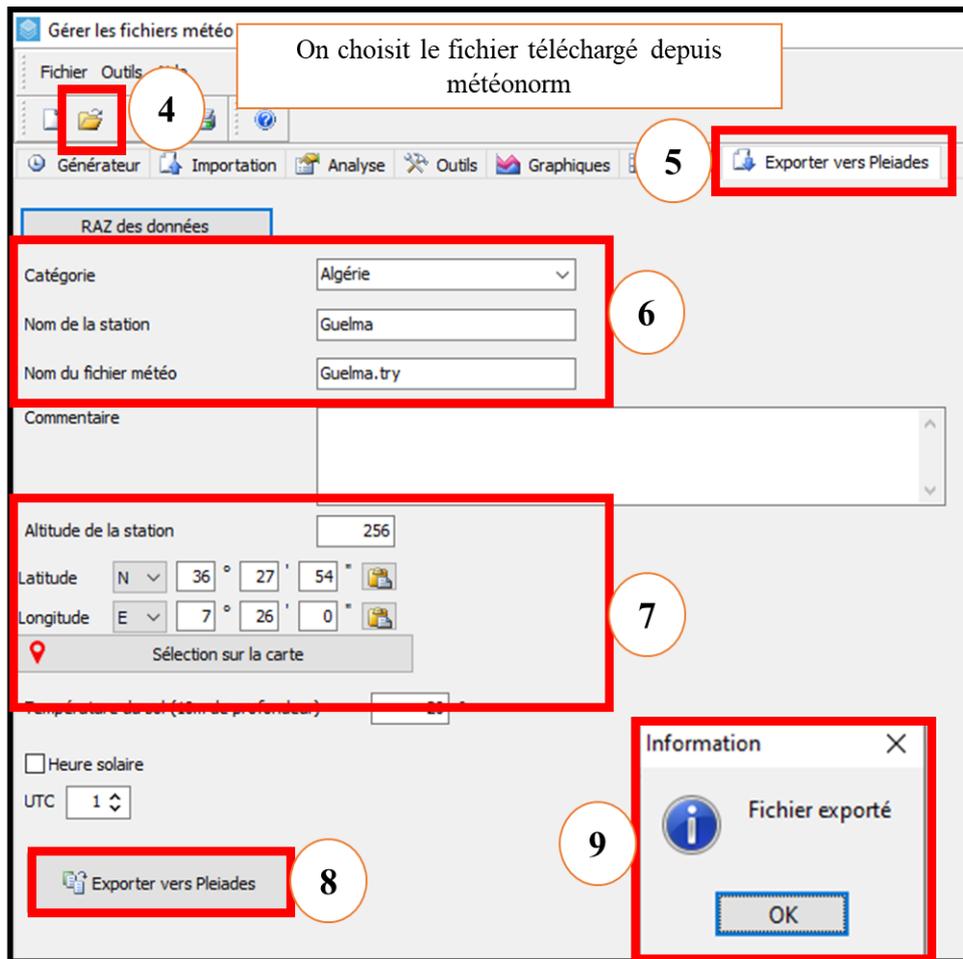
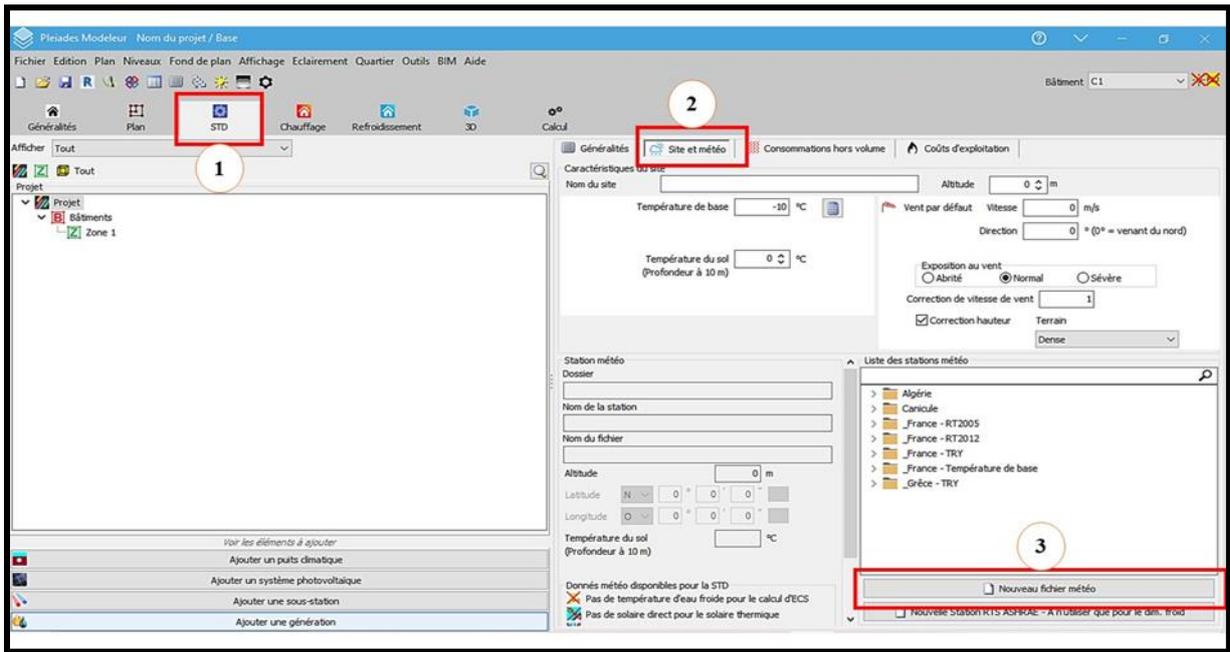
Mois
Jour
Heure
15 minutes
10 minutes
Minutes

15

Fermer

b) Au niveau du module STD Comfie (logiciel pléaides)

Annexe 4



Une fois le fichier exporté, nous retournons à la page précédente pour sélectionner le fichier météorologique de la ville de Guelma avant de commencer la modélisation du bâtiment.

Annexe 5

Résultats des besoins énergétiques et des impacts environnementaux des sous variantes

1. Cas du scénario initial

1.1. Les besoins énergétiques de la chambre d'étude à son état initial

Besoins de chauffage (kWh)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
zone (3eme étage)	946	800	402	0	0	0	0	0	0	0	0	392
Total	946	800	402	0	0	0	0	0	0	0	0	392

Besoins de rafraîchissement (kWh)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
zone (3eme étage)	0	0	0	0	0	507	1189	1121	363	0	0	0
Total	0	0	0	0	0	507	1189	1121	363	0	0	0

1.2. Résultats d'analyse de cycle de vie de la chambre d'étude à son état initial

Etapes

par an
 par m²
 par unité fonctionnelle
 énergie en Wh
 Notation scientifique
 Libellés courts des impacts
 Impacts par phase

Etapes
 Construction
 Utilisation
 Rénovation
 Déconstruction

Export tableur

Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	6.39	117.90	0.20	0.12	124.61
Acidification (kg SO2 eq.)	26.54	250.51	2.80	1.41	281.26
Demande cumulative d'énergie (GJ)	84.90	6 954.47	13.21	2.01	7 054.59
Eau utilisée (m ³)	56.21	11 710.27	11.38	0.94	11 778.81
Déchets inertes produits (t)	1.80	13.68	1.50	24.16	41.14
Épuisement ressources abiotiques (kg E-15)	0.00	3.63	0.00	0.00	3.63
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	2.77	501.93	0.19	0.22	505.11
Production d'ozone photochimique (kg d'é)	16.89	143.22	1.27	1.53	162.91
Ecotoxicité aquatique (m ³)	76 130.26	1 423 003.14	11 240.77	4 044.20	1 514 418.37
Déchets radioactifs (dm ³)	0.13	16.15	0.03	0.01	16.32
Toxicité humaine (kg)	37.08	330.62	10.19	1.69	379.58
Odeur (Mm ³ air)	22.82	1 889.30	1.00	0.14	1 913.25

1.3. Impacts environnementaux de la chambre lors de la phase d'utilisation du bâtiment

Utilisation

par an
 par m²
 par unité fonctionnelle
 énergie en Wh
 Notation scientifique
 Libellés courts des impacts
 Impacts par phase

Etapes
 Construction
 Utilisation
 Rénovation
 Déconstruction

Chauffage
 Climatatisation
 Eau
 ECS
 Electricité spécifique

Export tableur

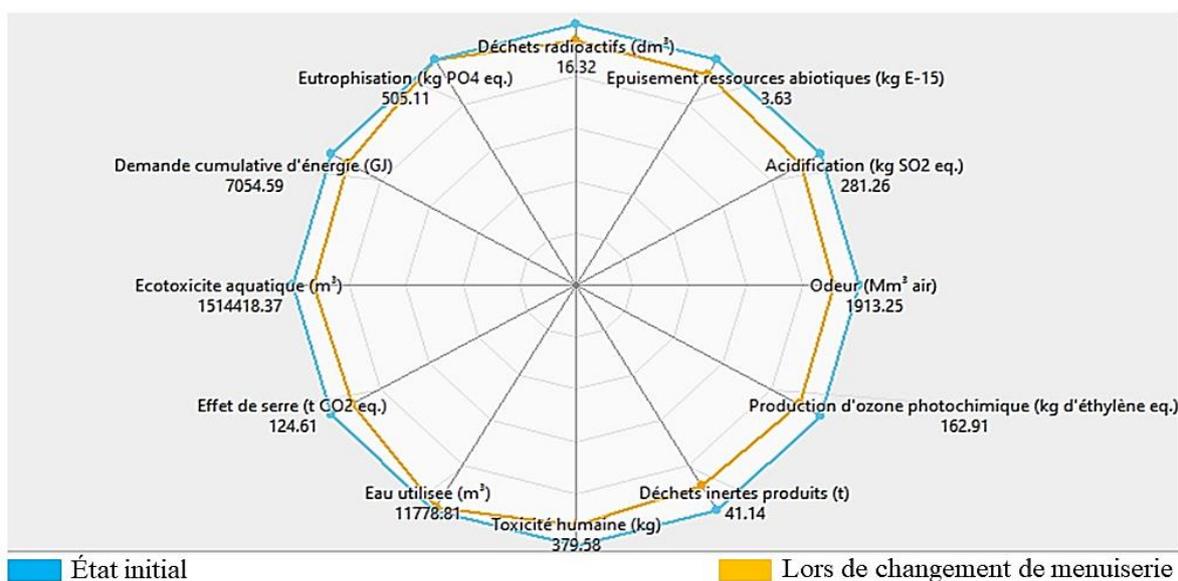
Impact	Chauffage	Climatisation	Eau	ECS	Electricité spécifique	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	61.57	6.03	6.68	30.57	13.06	117.90
Acidification (kg SO2 eq.)	73.00	38.95	42.29	36.25	60.02	250.51
Demande cumulative d'énergie (GJ)	1 142.60	1 537.67	212.94	567.40	3 493.86	6 954.47
Eau utilisée (m ³)	75.98	701.87	9 528.75	37.73	1 365.94	11 710.27
Déchets inertes produits (t)	5.00	1.65	1.12	2.48	3.42	13.68
Épuisement ressources abiotiques (kg)	0.32	0.96	0.00	0.16	2.19	3.63
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	8.68	2.22	481.92	4.31	4.80	501.93
Production d'ozone photochimique (t)	61.80	12.77	12.00	30.69	25.97	143.22
Ecotoxicité aquatique (m ³)	274 062.13	292 371.03	171 792.02	136 096.44	548 681.53	1 423 003.14
Déchets radioactifs (dm ³)	0.38	4.66	0.48	0.19	10.44	16.15
Toxicité humaine (kg)	98.05	52.86	56.36	48.69	74.66	330.62
Odeur (Mm ³ air)	1 168.27	21.89	16.91	580.15	102.08	1 889.30

2. Cas du scénario de choix des menuiseries

2.1. Résultats d'analyse de cycle de vie de la chambre lors de changement de menuiserie

Etapas						Export tableur
Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	Total	
Effet de serre (t CO2 eq.)	5.42	108.05	0.20	0.11	113.77	
Acidification (kg SO2 eq.)	22.20	232.36	2.80	1.21	258.57	
Demande cumulative d'énergie (GJ)	72.61	6 481.59	13.21	1.72	6 569.14	
Eau utilisée (m³)	50.29	11 556.84	11.38	0.81	11 619.32	
Déchets inertes produits (t)	1.59	12.64	1.50	20.72	36.44	
Épuisement ressources abiotiques (kg E-15)	0.00	3.39	0.00	0.00	3.39	
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	2.38	500.26	0.19	0.19	503.02	
Production d'ozone photochimique (kg d'éq.)	14.23	131.97	1.27	1.31	148.77	
Ecotoxicité aquatique (m³)	64 325.41	1 325 133.18	11 240.77	3 463.77	1 404 163.12	
Déchets radioactifs (dm³)	0.13	15.15	0.03	0.01	15.31	
Toxicité humaine (kg)	31.77	306.13	10.19	1.45	349.54	
Odeur (Mm³ air)	16.33	1 721.20	1.00	0.12	1 738.64	

2.2. Radars comparatifs des impacts environnementaux du scénario initial et lors du changement de menuiserie



3. Cas du scénario de la nature d'isolant sur les façades

3.1. Les besoins énergétiques annuelles de la chambre avec isolation de 5 cm de la fibre de bois

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T* Min	T* Moyenne	T* Max
	kWh	kWh/m²	kWh	kWh/m²	W	W	°C	°C	°C
Total	2 230	81	2 978	108	4 175	4 231	11.5	22.6	33.6
zone (3eme étage)	2 230	81	2 978	108	4 175	4 231	11.5	22.6	33.6

3.2. Les besoins énergétiques annuelles de la chambre avec isolation de 5 cm de la laine de chanvre

Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	W	W	°C	°C	°C
Total	2 105	77	2 904	106	4 115	4 157	11.5	22.7	33.8
zone (Beme étage)	2 105	77	2 904	106	4 115	4 157	11.5	22.7	33.8

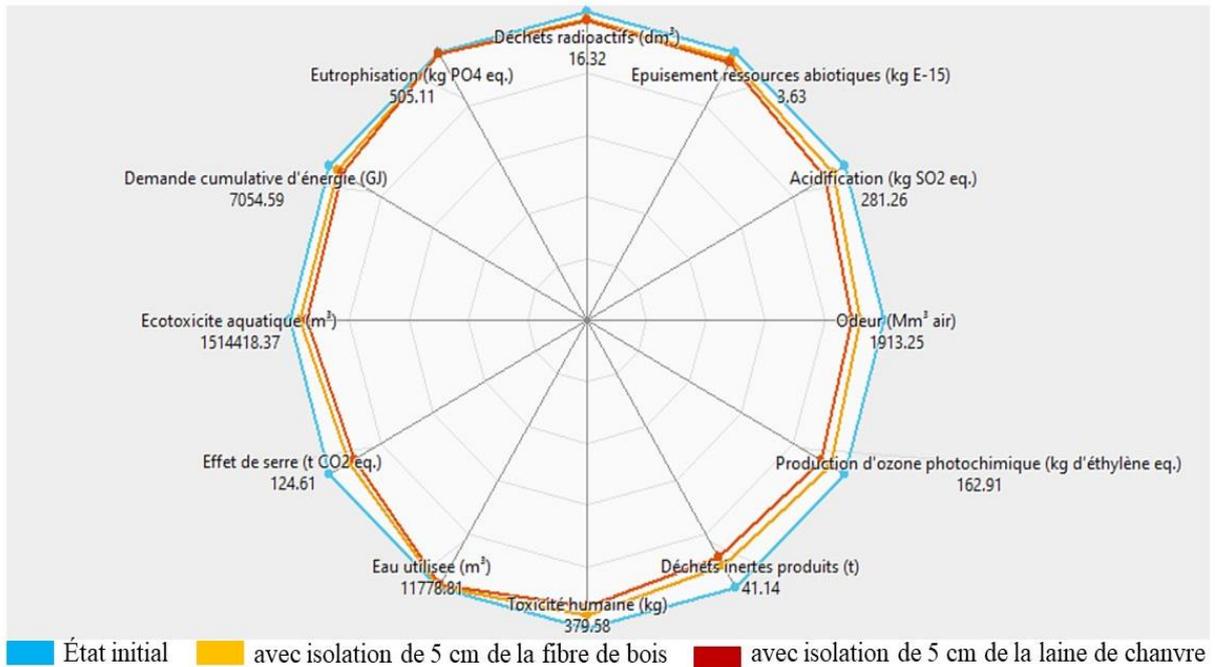
3.3. Résultats d'analyse de cycle de vie de la chambre avec isolation de 5 cm de la fibre de bois

Etapas					
Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	4.92	110.01	0.20	0.11	115.24
Acidification (kg SO2 eq.)	25.78	239.13	2.80	1.26	268.97
Demande cumulative d'énergie (GJ)	117.40	6 717.18	13.21	1.81	6 849.60
Eau utilisée (m ³)	59.27	11 656.31	11.38	0.85	11 727.82
Déchets inertes produits (t)	1.65	12.96	1.50	21.71	37.82
Epuisement ressources abiotiques (kg E-1)	0.00	3.53	0.00	0.00	3.53
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	2.74	500.73	0.19	0.20	503.86
Production d'ozone photochimique (kg c)	16.58	134.87	1.27	1.37	154.09
Ecotoxicité aquatique (m ³)	75 527.47	1 370 953.91	11 240.77	3 631.25	1 461 353.40
Déchets radioactifs (dm ³)	0.13	15.81	0.03	0.01	15.97
Toxicité humaine (kg)	36.42	315.30	10.19	1.52	363.43
Odeur (Mm ³ air)	17.55	1 745.39	1.00	0.12	1 764.06

3.4. Résultats d'analyse de cycle de vie de la chambre avec isolation de 5 cm de la laine de chanvre

Étapes					
Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	5.42	106.85	0.20	0.11	112.57
Acidification (kg SO2 eq.)	22.20	234.64	2.80	1.21	260.85
Demande cumulative d'énergie (GJ)	72.61	6 625.38	13.21	1.72	6 712.93
Eau utilisée (m³)	50.29	11 636.23	11.38	0.81	11 698.72
Déchets inertes produits (t)	1.59	12.68	1.50	20.72	36.48
Épuisement ressources abiotiques (kg E-1)	0.00	3.49	0.00	0.00	3.49
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	2.38	500.25	0.19	0.19	503.01
Production d'ozone photochimique (kg c)	14.23	131.55	1.27	1.31	148.35
Ecotoxicité aquatique (m³)	64 325.41	1 350 717.52	11 240.77	3 463.77	1 429 747.46
Déchets radioactifs (dm³)	0.13	15.68	0.03	0.01	15.84
Toxicité humaine (kg)	31.77	309.26	10.19	1.45	352.67
Odeur (Mm³ air)	16.33	1 687.66	1.00	0.12	1 705.10

3.5. Radars comparatifs des impacts environnementaux du scénario initial, d'isolation des murs extérieurs en fibre de bois et d'isolation des murs extérieurs en laine de chanvre



4. Cas du scénario d'augmentation d'épaisseur d'isolation existante au niveau de toiture

4.1. Les besoins énergétiques annuelles de la chambre après l'augmentation d'épaisseur d'isolation

Annexe 5

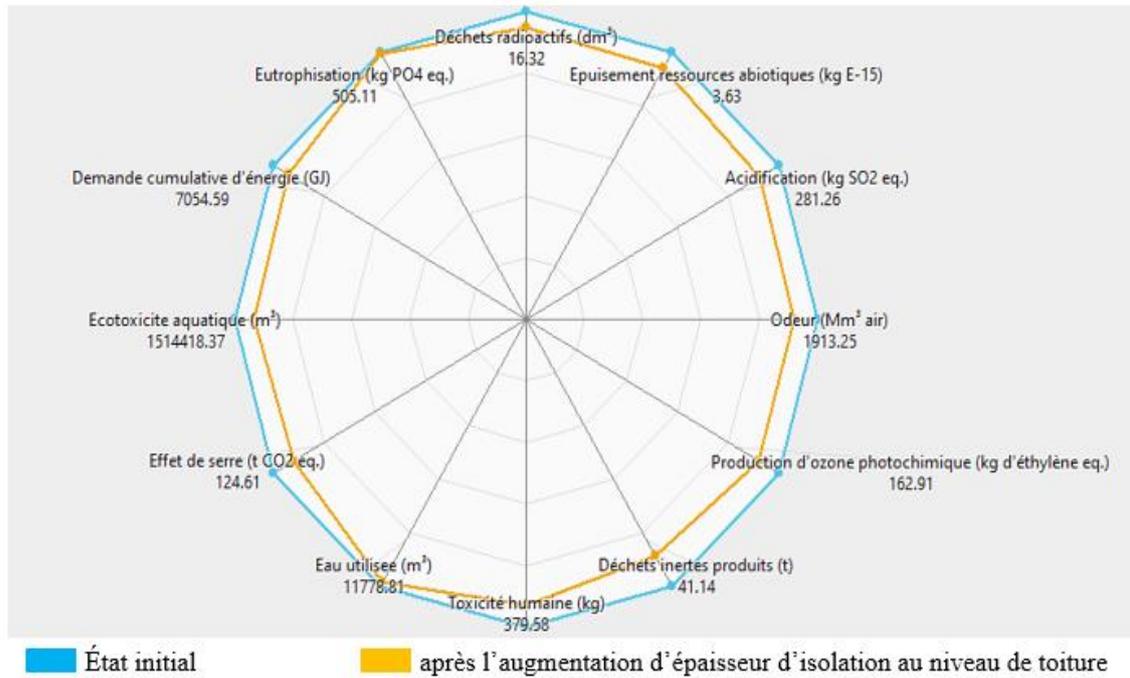
Synthèse	Consommation	Confort	Graphiques	Coût global	Photovoltaïque	Rapport	Comparaison	M et V	
Diagramme de Sankey		Export vers tableur							
Zones	Besoins Ch.	Besoins Ch.	Besoins Clim.	Besoins Clim.	Puiss. Chauff.	Puiss. Clim.	T° Min	T° Moyenne	T° Max
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	W	W	°C	°C	°C
Total	2 224	81	2 636	96	4 156	4 061	11.5	22.4	33.2
zone (3eme étage)	2 224	81	2 636	96	4 156	4 061	11.5	22.4	33.2

4.2. Résultats d'analyse de cycle de vie de la chambre après l'augmentation d'épaisseur d'isolation

Etapas					
Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	5.42	109.21	0.20	0.11	114.93
Acidification (kg SO2 eq.)	22.20	234.77	2.80	1.21	260.97
Demande cumulative d'énergie (GJ)	72.61	6 549.15	13.21	1.72	6 636.70
Eau utilisée (m ³)	50.29	11 580.68	11.38	0.81	11 643.16
Déchets inertes produits (t)	1.59	12.77	1.50	20.72	36.58
Epuisement ressources abiotiques (kg E-1)	0.00	3.43	0.00	0.00	3.43
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	2.38	500.47	0.19	0.19	503.23
Production d'ozone photochimique (kg c)	14.23	133.35	1.27	1.31	150.15
Ecotoxicité aquatique (m ³)	64 325.41	1 338 870.39	11 240.77	3 463.77	1 417 900.33
Déchets radioactifs (dm ³)	0.13	15.31	0.03	0.01	15.47
Toxicité humaine (kg)	31.77	309.38	10.19	1.45	352.79
Odeur (Mm ³ air)	16.33	1 740.25	1.00	0.12	1 757.69

4.3. Radars comparatifs des impacts environnementaux du scénario initial et après l'augmentation d'épaisseur d'isolation

Annexe 5



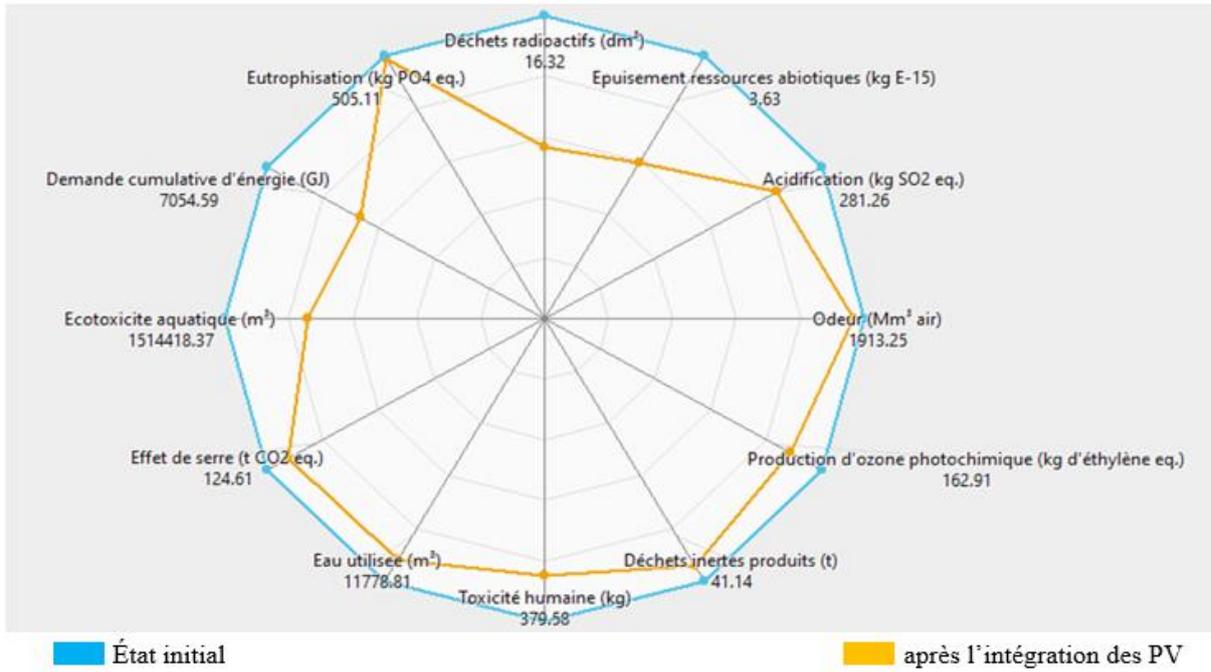
5. Cas du scénario d'énergie renouvelable (PV)

5.1. Résultats d'analyse de cycle de vie de la chambre après l'intégration des PV

Etapas						
Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	Total	
Effet de serre (t CO2 eq.)	6.39	108.97	0.20	0.12	115.68	
Acidification (kg SO2 eq.)	26.54	205.32	2.80	1.41	236.06	
Demande cumulative d'énergie (GJ)	84.90	4 592.19	13.21	2.01	4 692.31	
Eau utilisée (m³)	56.21	10 749.64	11.38	0.94	10 818.17	
Déchets inertes produits (t)	1.80	11.31	1.50	24.16	38.77	
Epuisement ressources abiotiques (kg E-15)	0.00	2.15	0.00	0.00	2.15	
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	2.77	498.65	0.19	0.22	501.83	
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	16.89	125.17	1.27	1.53	144.86	
Ecotoxicité aquatique (m³)	76 130.26	1 033 283.84	11 240.77	4 044.20	1 124 699.07	
Déchets radioactifs (dm³)	0.13	9.07	0.03	0.01	9.24	
Toxicité humaine (kg)	37.08	272.78	10.19	1.69	321.74	
Odeur (Mm³ air)	22.82	1 828.76	1.00	0.14	1 852.71	

5.2. Radars comparatifs des impacts environnementaux du scénario initial et après l'intégration des PV

Annexe 5



6. Cas du scénario optimal du cas d'étude

6.1. Les besoins énergétiques de la chambre à son état optimal

▲ Besoins de chauffage (kWh)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
zone (3eme étage)	483	408	194	0	0	0	0	0	0	0	0	197
Total	483	408	194	0	197							

▲ Besoins de rafraîchissement (kWh)

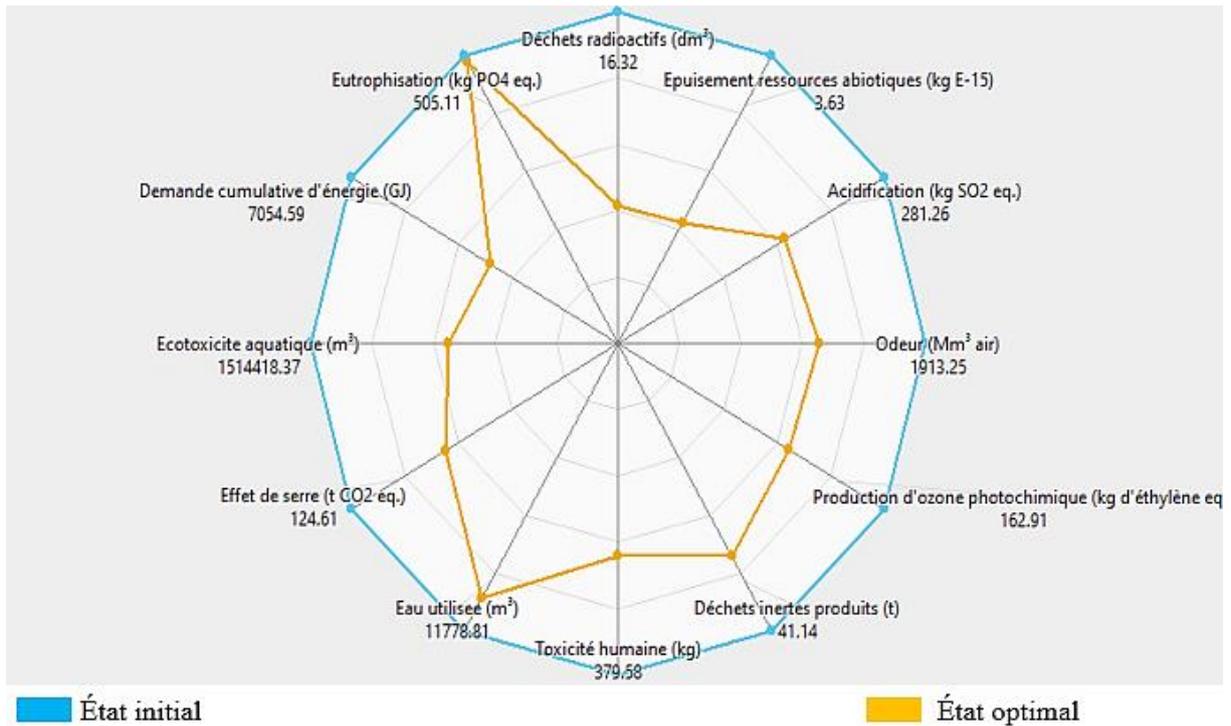
Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
zone (3eme étage)	0	0	0	0	0	262	575	545	173	0	0	0
Total	0	0	0	0	0	262	575	545	173	0	0	0

6.2. Résultats d'analyse de cycle de vie de la chambre à son état optimal

Etapas					
Impact	Construction	Utilisation	Rénovation	Déconstruction	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	5.07	75.62	0.20	0.10	80.99
Acidification (kg SO2 eq.)	20.67	152.28	2.80	1.13	176.89
Demande cumulative d'énergie (GJ)	68.28	3 287.24	13.21	1.62	3 370.35
Eau utilisée (m ³)	48.21	10 389.51	11.38	0.76	10 449.86
Déchets inertes produits (t)	1.51	8.06	1.50	19.51	30.58
Epuisement ressources abiotiques (kg E-15)	0.00	1.53	0.00	0.00	1.53
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	2.24	493.29	0.19	0.18	495.91
Production d'ozone photochimique (kg d'éthylène eq.)	13.29	88.62	1.27	1.23	104.41
Ecotoxicité aquatique (m ³)	60 163.42	764 515.42	11 240.77	3 259.12	839 178.73
Déchets radioactifs (dm ³)	0.12	6.65	0.03	0.01	6.81
Toxicité humaine (kg)	29.90	201.75	10.19	1.36	243.20
Odeur (Mm ³ air)	14.04	1 236.20	1.00	0.11	1 251.34

6.3. Radars comparatifs des impacts environnementaux du scénario initial et optimal

Annexe 5



6.4. Impacts environnementaux de la chambre lors de la phase d'utilisation du bâtiment à son cas optimal

Impact	Chauffage	Climatisati...	Eau	ECS	Electricité spécifique	Production EnR	Total
Effet de serre (t CO2 eq.)	31.07	1.80	6.68	30.57	13.06	-7.56	75.62
Acidification (kg SO2 eq.)	36.84	11.62	42.29	36.25	60.01	-34.73	152.28
Demande cumulative d'énergie (GJ)	576.66	458.73	212.94	567.40	3 493.44	-2 021.94	3 287.24
Eau utilisée (m ³)	38.35	209.39	9 528.75	37.73	1 365.78	-790.49	10 389.51
Déchets inertes produits (t)	2.52	0.49	1.12	2.48	3.42	-1.98	8.06
Epuisement ressources abiotiques	0.16	0.29	0.00	0.16	2.19	-1.27	1.53
Eutrophisation (kg PO4 eq.)	4.38	0.66	481.92	4.31	4.80	-2.78	493.29
Production d'ozone photochimique	31.19	3.81	12.00	30.69	25.96	-15.03	88.62
Ecotoxicité aquatique (m ³)	138 317.19	87 222.39	171 792.02	136 096.44	548 615.83	-317 528.44	764 515.42
Déchets radioactifs (dm ³)	0.19	1.39	0.48	0.19	10.44	-6.04	6.65
Toxicité humaine (kg)	49.49	15.77	56.36	48.69	74.65	-43.20	201.75
Odeur (Mm ³ air)	589.62	6.53	16.91	580.15	102.07	-59.08	1 236.20

6.5. Radars comparatifs des impacts environnementaux de la chambre lors de la phase d'utilisation du bâtiment à son cas initial et optimal

Annexe 5

