

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 (LGCH)

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN 3^{ème} CYCLE

Domaine : Architecture, Urbanisme et Métiers de la Ville Filière : Architecture
Spécialité : Architecture durable et projet urbain

Présentée par
HARBI Ikram

Intitulée

**LA CONCEPTION URBAINE OPTIMISEE PAR LES SYSTEMES
ENERGETIQUES HYBRIDES**

Soutenue le : 24/04/2025

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr Lazri Youcef	Professeur	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Président
Mme Salah Salah Hana	M.C. A	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Encadreur
Mme Gherraz Halima	M.C. A	Univ. d'Oum El Bouaghi	Co-encadreur
Mr Alkama Djamel	Professeur	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Examinateur
Mme Djouad Fatima-Zahra	M.C. A	Univ. de 8 Mai 1945 Guelma	Examinatrice
Mme Ariane Houria	Professeur	Univ. de Constantine 3	Examinatrice

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

À mon Père
À la Mémoire de ma Mère

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu DIEU.

Miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour achever cette thèse.

Un grand merci à mon père, mes sœurs, mon frère et mon mari et aussi mes chers collègues les plus proches et toutes ma famille.

J'adresse ma profonde et respectueuse gratitude à Madame ***Dr. Salah-Salah Hana*** directrice de cette thèse, qui a dirigé ce travail de recherche attentivement et efficacement.

Je tiens à la remercier pour son soutien qu'elle m'a apporté dans les moments les plus difficiles de cette thèse, ses idées, son expérience et la confiance qu'elle m'a accordé, ses conseils jusqu'à la dernière minute.

Je remercie vivement ***Pr. Lazri Youcef*** pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury d'examen de cette thèse.

Je désire très sincèrement remercier ***Pr. Alkama Djamel, Pr. Ariane Houria et Dr. Djouad Fatima-Zahra*** pour avoir accepté d'en être les examinateurs, malgré leurs multiples responsabilités.

Je tiens à remercier ***Dr. Gherraz Halima***, co-encadreur de cette thèse.

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont aidé : le directeur de la Société algérienne de distribution de l'électricité et du gaz - Région Est pour avoir fourni les données avec tous les personnels de la société et surtout à ***Dr. Jérôme Kaempf*** pour m'avoir offert l'opportunité et les conseils essentiels pour travailler avec le brillant outil de modélisation de l'énergie des bâtiments CitySim Pro.

Une pensée sincère va enfin à mes enseignements et les personnes qui m'ont aidé de près et de loin à accomplir ce modeste travail

Résumé

L'intérêt mondial croissant pour le changement climatique a entraîné une mobilisation politique en faveur de l'intégration des énergies renouvelables, lesquelles sont de plus en plus perçues comme une solution essentielle pour garantir un avenir durable. Étant donné que plus de 40 % de la consommation totale d'énergie primaire dans le monde et 24 % des émissions de gaz à effet de serre sont attribuables à l'environnement bâti, les professionnels et les chercheurs ont exploré l'intégration des technologies d'énergie renouvelable à petite échelle dans les zones urbaines. Cette thèse se penche sur la capacité des zones urbaines à générer de l'énergie renouvelable, en mettant l'accent sur trois catégories de structures résidentielles urbaines présentes dans le climat semi-aride de Guelma, en Algérie. L'attention est portée sur deux catégories de technologies renouvelables : l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et l'énergie solaire thermique (ST). Une approche ascendante basée sur la modélisation énergétique à l'aide de CitySim Pro est utilisée pour analyser le potentiel solaire des formes urbaines et pour déterminer les configurations urbaines optimales pour l'implémentation de systèmes solaires hybrides PV/ST. Suite à une analyse approfondie de divers paramètres dans la littérature scientifique existante, cinq indicateurs essentiels ont été déterminés pour caractériser la morphologie des modèles sélectionnés. Les paramètres pris en compte sont la densité, la compacité, la couverture du site, le rapport hauteur des bâtiments/largeur de la rue et le coefficient d'occupation du sol. L'analyse de corrélation a révélé que la configuration urbaine exerce une influence notable sur la capacité de production d'énergie solaire hybride. Néanmoins, il convient de noter que les paramètres morphologiques exercent une influence distincte sur la production d'électricité photovoltaïque (PV) et solaire thermique (ST), ce qui se traduit par des effets différents sur ces deux types de production. En raison de l'absence d'une configuration urbaine optimale pour la production hybride, il semble que l'archétype des ensembles issus de l'intervention publique ou privé à cadre sociale des années 2000 soit un modèle approprié pour le contexte spécifique de Guelma. Ce modèle caractérise par une production d'électricité photovoltaïque élevée (992,25 kWh/m²/an) et une production solaire thermique basse (193,2 kWh/m²/an). Les résultats obtenus sont en accord avec les conclusions des études précédentes, démontrant que les paramètres choisis présentent une corrélation significative avec les indicateurs de la technologie photovoltaïque et une corrélation faible avec la technologie solaire thermique. Les résultats indiquent que le déploiement de panneaux hybrides PV/ST sur une section de toit d'un bâtiment peut efficacement satisfaire ses exigences en matière d'énergie.

Mots clés : Forme urbaine, énergie renouvelable, panneau solaire hybride, énergie photovoltaïque, énergie solaire thermique, modélisation énergétique des bâtiments urbains.

Abstract

Growing global interest in climate change has led to a political push for the integration of renewable energies, which are increasingly seen as a key solution for securing a sustainable future. With over 40% of the world's total primary energy consumption and 24% of greenhouse gas emissions attributable to the built environment, practitioners and researchers have been exploring the integration of small-scale renewable energy technologies in urban areas. This thesis investigates the capacity of urban areas to generate renewable energy, focusing on three categories of urban residential structures present in the semi-arid climate of Guelma, Algeria. The focus is on two categories of renewable technologies: solar photovoltaic (PV) and solar thermal (ST). A bottom-up approach based on energy modelling using CitySim Pro is used to analyze the solar potential of urban forms and to determine the optimal urban configurations for the implementation of PV/ST hybrid solar systems. Following an in-depth analysis of various parameters in the existing scientific literature, five key indicators were determined to characterize the morphology of the selected models. The parameters taken into account are density, compactness, site coverage, the ratio of building height to street width and the land-use coefficient. The correlation analysis revealed that urban configuration has a significant influence on hybrid solar energy production capacity. However, it should be noted that morphological parameters have a distinct influence on the production of photovoltaic (PV) and solar thermal (ST) electricity, resulting in different effects on these two types of production. In the absence of an optimal urban configuration for hybrid production, it seems that the archetypal public or private social housing developments of the 2000s is an appropriate model for the specific context of Guelma. This model is characterized by high photovoltaic electricity production (992.25 kWh/m²/year) and low solar thermal production (193.2 kWh/m²/year). The results obtained are in line with the conclusions of previous studies, demonstrating that the selected parameters show a significant correlation with the indicators for photovoltaic technology and a weak correlation with solar thermal technology. The results indicate that the deployment of PV/ST hybrid panels on a section of a building's roof can effectively meet its energy requirements.

Keywords: Urban form, Renewable energy, Hybrid solar panel, Photovoltaic energy, Solar thermal energy, Urban building energy modeling.

أدى الاهتمام العالمي المتزايد بتغير المناخ إلى دفع سياسي لدمج الطاقات المتجددة، التي يُنظر إليها بشكل متزايد على أنها حل رئيسي لتأمين مستقبل مستدام. ومع وجود أكثر من 40٪ من إجمالي استهلاك الطاقة الأولية في العالم و24٪ من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري التي تعزى إلى البيئة المدنية، يستكشف الممارسون والباحثون دمج تكنولوجيات الطاقة المتجددة على نطاق صغير في المناطق الحضرية. تبحث هذه الأطروحة في قدرة المناطق الحضرية على توليد الطاقة المتجددة، مع التركيز على ثلاث فئات من الهياكل السكنية الحضرية الموجودة في المناخ شبه الجاف في قالة بالجزائر.

ينصب التركيز على فئتين من تكنولوجيات الطاقة المتجددة: الطاقة الشمسية الكهروضوئية والطاقة الشمسية الحرارية. يتم استخدام نهج تصاعدي يعتمد على نمذجة الطاقة باستخدام برنامج لتحليل الإمكانات الشمسية للأشكال الحضرية وتحديد التكوينات الحضرية المثلى لتنفيذ أنظمة الطاقة الشمسية الهجينة الكهروضوئية/الحرارية الشمسية. وبعد إجراء تحليل متعمق لمختلف المعايير في الأدبيات العلمية الموجودة، تم تحديد خمسة مؤشرات رئيسية لتوصيف شكل النماذج المختارة. المؤشرات المأخوذة في الاعتبار هي الكثافة والانتظام وتغطية الموقع ونسبة ارتفاع المبنى إلى عرض الشارع ومعامل استخدام الأرض. كشف تحليل الارتباط أن التكوين الحضري له تأثير كبير على قدرة إنتاج الطاقة الشمسية الهجينة. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن المؤشرات المورفولوجية لها تأثير واضح على إنتاج الطاقة الكهربائية الكهروضوئية والطاقة الشمسية الحرارية، مما يؤدي إلى تأثيرات مختلفة على هذين النوعين من الإنتاج. وفي ظل عدم وجود تكوين حضري مثالي للإنتاج الهجين، يبدو أن نموذج مشروعات الإسكان الاجتماعي العامة أو الخاصة المخطط لها في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين هو نموذج مناسب للسياق المحدد لمدينة قالة. ويتميز هذا النموذج بإنتاج عالي للكهرباء الكهروضوئية (992.25 كيلوواط/ساعة/م²/سنة) وإنتاج منخفض للطاقة الشمسية الحرارية (193.2 كيلوواط/ساعة/م²/سنة). تتماشى النتائج التي تم الحصول عليها مع استنتاجات الدراسات السابقة، مما يدل على أن المؤشرات المختارة تظهر ارتباطًا كبيرًا بمؤشرات التكنولوجيا الكهروضوئية وارتباطًا ضعيفًا بالتكنولوجيا الشمسية الحرارية. تشير النتائج إلى أن نشر الألواح الكهروضوئية/الحرارية الشمسية الهجينة على جزء من سطح المبنى يمكن أن يلبي احتياجاته من الطاقة بشكل فعال.

الكلمات المفتاحية: الشكل الحضري، الطاقة المتجددة، الألواح الشمسية الهجينة، الطاقة الكهروضوئية، الطاقة الشمسية الحرارية، نمذجة الطاقة في المباني الحضرية

Table des matières

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements.....	II
Résumé	III
Table des matières	VI
Nomenclature.....	XIII
Liste des tableaux.....	XVI
Liste des figures	XVII

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Introduction	2
Problématique.....	4
Hypothèses	5
Objectives.....	6
Structure de thèse	8

CHAPITRE 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

INTRODUCTION	10
I.1 Cadre conceptuel.....	11
I.1.1. Transition énergétique.....	11
I.1.2 Efficacité énergétique.....	12
I.1.3 Sobriété énergétique	13
I.1.4 Sources d'énergies renouvelables	13
I.2 Transition énergétique dans l'espace urbain.....	14
I.2.1 Transition énergétique et géopolitique globale	14
I.2.1.1 Approche entreprise par l'union européenne	14
I.2.1.2 Approche entreprise par l'Etats-Unis	15
I.2.1.3 Approche entreprise par la Chine.....	17
I.2.2 Initiatives entreprise par l'Algérie	18
I.2.2.1 Politique nationale de gestion de l'énergie	18
I.2.2.2 Politique nationale de gestion d'énergie dans le secteur résidentiel	19
I.2.2.3 Initiatives entreprise par l'Algérie dans le domaine des constructions écoénergétiques.....	20
I.2.3 Contraintes rencontrées lors de la transition énergétique dans les espaces	VI

Table des matières

urbains.....	21
I.3 Aperçu des technologies liées aux énergies renouvelables.....	21
I.3.1 Production d'énergies renouvelables.....	21
I.3.2 Typologies des sources d'énergies renouvelables	22
I.3.2.1 Energie solaire.....	22
I.3.2.1.1 Energie solaire thermique.....	23
I.3.2.1.2 Energie solaire photovoltaïque	23
I.3.2.2 Energie géothermique	24
I.3.2.2.1 Géothermie à haute et moyenne énergie	24
I.3.2.2.2 Géothermie basse énergie	24
I.3.2.2.3 Géothermie très basse énergie : les pompes à chaleur	24
I.3.2.3 Energie éolienne	25
I.3.2.3.1 Production d'énergie mécanique grâce au vent	25
I.3.2.3.2 Production d'électricité par aérogénérateurs.....	26
I.3.2.4 Energie hydraulique.....	26
I.3.2.5 Biomasse.....	26
I.3.2.5.1 Bois énergie	27
I.3.2.5.2 Biocarburant	27
I.3.2.5.3 Biogaz	28
I.3.3 Initiatives de l'Algérie en faveur du développement des sources d'énergies alternatives	28
I.4 Systèmes énergétiques hybrides dans l'espace urbain	29
I.4.1 Définition.....	29
I.4.2 Classification des systèmes hybrides	29
I.4.2.1 Régime du fonctionnement	29
I.4.2.2 Structure du système hybride.....	30
I.4.3 Etude des configurations des systèmes hybrides.....	31
I.4.3.1 Systèmes hybrides intégrant une source d'énergie conventionnelle	31
I.4.3.1.1 Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle	31
I.4.3.1.2 Systèmes éolien/source conventionnelle	31
I.4.3.2 Systèmes hybrides intégrant des sources d'énergie renouvelable.....	32
I.4.3.2.1 Système hybride solaire/éolien.....	32
I.4.3.2.2 Système hybride hydroélectrique/éolien	32
I.4.3.2.3 Système hybride solaire PV/solaire thermique	33
CONCLUSION	34

Table des matières

CHAPITRE 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

INTRODUCTION	36
II.1 Forme urbaine : une concrétisation physique du design urbain	37
II.1.1 Genèse du design urbain	37
II.1.2 Domaine du design urbain	38
II.1.2.1 Design urbain dans le cadre du design environnemental	38
II.1.2.2 Design urbain en tant que processus de conception et de recherche	38
II.1.3 Importance du design urbain.....	39
II.1.4 Logique, méthodes et processus	39
II.2 Autours de la forme urbaine.....	40
II.2.1 Définition de la forme urbaine	40
II.2.1.1 Contexte historique.....	41
II.2.1.2 Typo-morphologique italienne (depuis 1955)	41
II.2.1.3 Morphologie urbaine britannique (années 1960).....	41
II.2.1.4 Morphologie urbaine française (années 1970)	41
II.2.2 Définition de la morphologie urbaine	42
II.2.2.1 Morphologie du système viaire.....	43
II.2.2.1.1 Trame viaire linéaire	43
II.2.2.1.2 Trame viaire arborescente.....	43
II.2.2.1.3 Trame viaire quadrillée	44
II.2.2.1.4 Trame viaire en boucle	44
II.2.2.2 Morphologie du système bâti.....	45
II.2.2.2.1 Bâti ponctuel (pavillonnaire)	45
II.2.2.2.2 Bâti linéaire (en rangées).....	46
II.2.2.2.3 Bâti planaire (massif).....	46
II.2.2.3 Morphologie du système parcellaire	47
II.2.2.3.1 Parcelle trapézoïdale.....	47
II.2.2.3.2 Parcelle triangulaire	47
II.2.2.3.3 Parcelle en L ou en T	48
II.2.2.4 Morphologie des espaces libres	48
II.2.3 Evaluation de la forme urbaine à travers des indicateurs.....	50
II.3 Synergie entre forme urbaine et énergétique des bâtiments.....	51
II.3.1 Forme urbaine vs énergie.....	51
II.3.2 Analyse comparative des niveaux de consommation énergétique associé aux divers types de formes urbaines archétypales	52

Table des matières

II.3.3 Etat actuel de la situation énergétique.....	54
II.3.3.1 Consommation interne et transition énergétique	55
II.3.4 Energétique du bâtiment.....	56
II.3.4.1 Secteur du bâtiment est un gros consommateur d'énergie.....	56
II.3.4.2 Secteur du bâtiment devrait être confortable	56
II.3.4.3 Applications de l'énergétique dans le domaine du bâtiment.....	57
II.3.5 Impact de la forme urbaine sur la production énergétique	58
CONCLUSION.....	59

CHAPITRE 03 : Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

INTRODUCTION	61
III.1 Indicateurs morpho énergétiques dans la littérature scientifique.....	62
III.1.1 Contexte	62
III.1.2 Etat de l'art sur le rapport entre l'énergie et les paramètres typomorphologiques.....	63
III.1.2.1 Analyse multicritère de l'influence de la forme urbaine sur le potentiel solaire	67
III.1.2.1.1 Analyse morpho-énergétique à la base de trois critères.....	72
III.1.2.1.2 Analyse morpho-énergétique à la base de deux critères	74
III.1.2.2 Analyse monocritère de l'influence de la forme urbaine sur le potentiel solaire	74
III.1.3 Approche retenue.....	75
III.2 Les méthodes et les outils d'évaluation énergétique des systèmes solaires dans la littérature scientifique.....	75
III.2.1 Contexte	75
III.2.2 Evaluation du potentiel solaire des bâtiments en milieu urbain.....	75
III.2.2.1 Méthodes fondées sur l'utilisation des cartes d'irradiation	77
III.2.2.1.1 Systèmes d'information géographique (SIG)	78
III.2.2.1.2 Données géographiques du bâtiment et images aériennes	79
III.2.2.1.3 Google Street View	79
III.2.2.2 Méthodes basées sur l'analyse de la géométrie solaire et les cartes d'ombre	79
III.2.2.3 Méthodes de quantification énergétique sur une géométrie 3D	80
III.2.2.4 Techniques de traitement d'images	81
III.2.3 Approche retenue.....	82
CONCLUSION.....	83

Table des matières

CHAPITRE 04 : Guelma contexte urbain et climatique

INTRODUCTION	85
IV.1 Présentation générale de Guelma.....	86
IV.1.1 Aperçu socio-économique de la wilaya de Guelma	87
IV.1.1.1 Population.....	87
IV.1.1.2 Tourisme.....	87
IV.1.1.3 Economie	87
IV.1.2 Contexte et caractéristique de la ville de Guelma	88
IV.1.2.1 Situation géographique de la wilaya.....	88
IV.1.2.2 Situation géographique de la commune.....	88
IV.1.3 Evolution historique de la ville de Guelma.....	89
IV.2 Etude climatologique de Guelma	89
IV.2.1 Climat de la wilaya.....	89
IV.2.2 Analyse bioclimatique de la commune	89
IV.2.2.1 Ecart de température	90
IV.2.2.2 Gamme d'éclairage.....	91
IV.2.2.3 Couverture de ciel	92
IV.2.2.4 Plage de vitesse du vent.....	92
IV.2.2.5 Humidité relative.....	94
IV.2.2.6 Diagramme solaire	95
IV.2.2.7 Diagramme psychométrique	96
IV.2.2.8 Rose du vent	97
IV.2.3 Optimisation de la conception urbaine à Guelma : recommandations clés ...	98
IV.3 Approche morphologique de la ville de Guelma.....	99
IV.3.1 Processus de formation du tissu urbain de la ville de Guelma	99
IV.3.2 Aperçu sur les typologies du résidentiel collectif à Guelma.....	103
IV.3.3 Sélection des Cas d'étude.....	105
CONCLUSION.....	107

CHAPITRE 05 : Matériels et méthodes

INTRODUCTION	109
V.1 Processus analytique	110
V.2 Elaboration du corpus d'analyse	111
V.2.1 Présentation des spécimens choisis.....	111
V.2.2 Métriques typo-morphologique du corpus d'analyse.....	115

Table des matières

V.2.3	Caractéristiques technique et propriétés physique du corpus d'analyse.....	117
V.3	Données de la consommation énergétique.....	118
V.3.1	Saison de chauffage et de climatisation.....	119
V.4	Modélisation énergétique des bâtiment urbaine (UBEM).....	121
V.4.1	Modélisation énergétique par Citysim Pro.....	121
V.4.1.1	Modélisation 2D par AutoCAD.....	124
V.4.1.2	Modélisation 3D par SketchUp.....	125
V.4.2	Modélisation climatique par Météonorm.....	126
V.4.2.1	Présentation du logiciel.....	126
V.4.3	Calibration du corpus d'analyse.....	127
V.4.4	Choix de la technologie solaire optimale.....	127
V.4.4.1	Motivation du choix de la technologie solaire.....	127
V.4.4.2	Panneaux solaires hybrides PV/T versus les panneaux photovoltaïques	128
V.4.4.3	Modélisation des panneaux hybrides PV/ST retenue.....	129
	CONCLUSION.....	132

CHAPITRE 06 : Résultats et discussions

INTRODUCTION.....	134	
VI.1	Résultat de la calibration et réduction des incertitudes.....	135
VI.1.1	Identification des incertitudes liées aux plages de température intérieur modélisé.....	135
VI.1.2	Interpréter les écarts de consommation.....	138
VI.2	Evaluation de la production solaire.....	139
VI.2.1	Dimensionnement et emplacement des panneaux hybrides.....	139
VI.2.1.1	Surface et orientation.....	139
VI.2.1.2	Choix de l'emplacement des panneaux dans les toitures.....	140
VI.2.1.3	Nombre de panneau à retenir.....	141
VI.3	Amélioration de l'énergie dans le cas d'étude par l'évaluation de la production énergétique des techniques solaires utilisées (photovoltaïque et thermique).....	142
VI.3.1	Analyse énergétique pour les études de cas (PV/ST).....	142
VI.3.2	Evaluation de la production électrique/thermique par rapport aux besoin énergétiques.....	146
VI.4	Impact des indicateurs de la forme urbaine sur la production solaire hybride (photovoltaïque et thermique).....	147
VI.4.1	Corrélations forme urbaine-Energie solaire hybride.....	147
VI.4.2	Description statistique des résultats de la corrélation.....	150

Table des matières

VI.4.3 Corrélations forme urbaine-technologie PV et technologie ST selon la revue de littérature.....	151
CONCLUSION.....	152
Références bibliographiques.....	161
Annexes	186

Nomenclature

AADL	Agence nationale pour l'amélioration et le développement du logement
APC	Assemblée populaire communale
APRUE	Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie
BiPV	Installations photovoltaïques intégrées au bâtiment
BP	Compagnie britannique de recherche, d'extraction, de raffinage et de vente de pétrole
BTP	Bâtiment et travaux publics
CAD	Conception assistée par ordinateur
CDD	Degré-jour de refroidissement (C°)
CDER	Centre de développement des énergies renouvelables
CEREFÉ	Commissariat aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique
COP21	Conférence des Parties
DAO	Dessin assisté par ordinateur
DTR	Document technique réglementaire
ECS	Eau chaude sanitaire
FNME	Fonds national de maîtrise de l'énergie
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Nomenclature

GNC	Gaz naturel comprimé
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
GWh	Gigawattheure
HCFC	Hydro chlorofluorocarbones
HDD	Degré-jour de chauffage (C°)
HLM	Habitat à loyer modéré
I	Indice d'aridité de Martonne
Ktep	Kilotonne équivalent pétrole
MTEp	Mégatonne d'équivalent pétrole
MW	Mégawatt
ODD	Objectif de développement durable
ONG	Organisation non gouvernementale
ONU-Habitat	Programme des Nations Unies pour les établissements humains
OPGI	Office de promotion et de gestion immobilière
PIB	Produit intérieur brut
PNDER	Programme national des énergies renouvelables
PNEE	Programme Algérien d'efficacité énergétique
POS	Plan d'occupation des sols
PV/ST	Photovoltaïque/Solaire thermique
RPC	Rétribution à prix coûtant

Nomenclature

RTE	Réseau de transport d'électricité
SAT	Surface agricole totale
SAU	Surface agricole utile
SER	Systèmes des énergies renouvelables
SIG	Système d'information géographique
T _b	Température de base (C°)
TEP	Tonne d'équivalent pétrole
T _{max}	Température maximale du point de consigne intérieur (C°)
T _{min}	Température minimale du point de consigne intérieur (C°)
T _{out}	Température moyenne journalière de l'air extérieur (C°)
TVA	Taxe sur la valeur ajoutée
Valeur U de la toiture	Transmission thermique de la toiture [W/m ² -K]
Valeur U du mur	Transmittance thermique du mur [W/m ² -K]
VMC	Ventilation mécanique contrôlée
ZHUN	Zone d'habitation urbaine nouvelle

Liste des tableaux

Tableau 1 : La relation système bâti/système viaire.....	49
Tableau 2 : Production des énergies primaire en Algérie pour les années 2017-2018.....	54
Tableau 3 : Récapitulatif des flux énergétiques pour l'année 2018	55
Tableau 4 : Consommation des énergies en Algérie pour l'année 2018.....	56
Tableau 5 : Les études pertinentes portant sur la relation entre l'énergie solaire et les indicateurs de la forme urbaine	64
Tableau 6 : Les quinze études les plus cités qui traitent les outils et/ou méthodes d'évaluation du potentiel solaire en milieu urbain.....	77
Tableau 7 : Les recommandation clés proposé par le logiciel Climate Consultant.....	98
Tableau 8 : Fiche technique du spécimen A	112
Tableau 9 : Fiche technique du spécimen B	113
Tableau 10 : Fiche technique du spécimen C	114
Tableau 11 : Les facteurs typo-morphologiques des trois formes urbaines	115
Tableau 12 : Les propriétés physiques des formes urbaines étudiées	118
Tableau 13 : Les données réelles de la consommation énergétique dans les formes urbaines étudiées.....	119
Tableau 14 : La comparaison des technologies photovoltaïque, thermique et hybride.....	128
Tableau 15 : Caractéristiques électriques et thermiques du panneau hybride retenu	130
Tableau 16 : Plage de températures intérieures modélisées et incertitudes de modélisation pour le chauffage et la climatisation	135
Tableau 17 : Tableau récapitulatif qui montre la plage de température intérieure modélisée, la consommation estimé, l'erreur de modélisation du chauffage et de climatisation pour les trois spécimens	137
Tableau 18 : Consommation réelle et estimée, incertitude de la modélisation du chauffage et du refroidissement pour trois spécimens.....	139
Tableau 19 : La production photovoltaïque et thermique dans les trois spécimens sélectionnés	146
Tableau 20 : Calibration du spécimen A	186
Tableau 21 : Calibration du spécimen B.....	186
Tableau 22 : Calibration du spécimen C.....	186
Tableau 23 : La consommation type des équipements électroménagers dans notre corpus d'analyse	187
Tableau 24 : Comparaison entre panneaux photovoltaïque et panneau hybride selon leurs production.....	188

Liste des figures

Figure 1 : Division de la consommation selon les secteurs d'activité.....	19
Figure 2 : Composants d'une turbine éolienne	26
Figure 3 : Types de biomasse	27
Figure 4 : Classement des systèmes hybrides	30
Figure 5 : Différents types de systèmes viaire linéaire	43
Figure 6 : Le système viaire arborescent.....	44
Figure 7 : Différents types de système viaire quadrillé	44
Figure 8 : Différents types de système viaire en boucle	45
Figure 9 : Différents types de système bâti ponctuel.....	45
Figure 10 : Différents types de système bâti linéaire	46
Figure 11 : Différents types de système bâti planaire.....	46
Figure 12 : La parcelle trapézoïdale.....	47
Figure 13 : La parcelle triangulaire.....	47
Figure 14 : La parcelle en L ou en T	48
Figure 15 : Identification de quatre sous-systèmes de la forme urbaine.....	48
Figure 16 : Les six configurations urbaines analysées et leurs dimensions	53
Figure 17 : Comparaison entre les six configurations urbaines étudiées selon leur performance énergétique	53
Figure 18 : Progression des températures intérieurs, sans prendre en compte des installations de chauffage ou de climatisation	57
Figure 19 : Les recherches les plus citées qui traitent la corrélation entre l'énergie solaire et les indicateurs de la forme urbaine	67
Figure 20 : Les divers indicateurs de compacité urbaine de l'étude de Mohajeri	69
Figure 21 : Les blocs urbains étudiés partagée sur six classes de typologie	70
Figure 22 : Les recherches les plus citées qui traitent les différents méthodes et outils d'évaluation du potentiel solaire en milieu urbain	76
Figure 23 : Théâtre romain de Guelma	86
Figure 24 : Cascade de Hammam Debagh à Guelma	86

Liste des figures

Figure 25 : Localisation de la wilaya de Guelma sur la carte d'Algérie (a) et celle de la commune par rapport à la wilaya de Guelma (b)	88
Figure 26 : L'écart de température	90
Figure 27 : La gamme d'éclairage	91
Figure 28 : La couverture de ciel.....	92
Figure 29 : La plage de vitesse du vent.....	93
Figure 30 : L'humidité relative.....	94
Figure 31 : Le diagramme solaire.....	95
Figure 32 : Le diagramme psychométrique.....	96
Figure 33 : La rose du vent	97
Figure 34 : Localisation des vestiges romains par rapport à la ville de Guelma.....	100
Figure 35 : La ville de Guelma en 1858.....	100
Figure 36 : La ville de Guelma en 1963.....	101
Figure 37 : La ville de Guelma en 1977.....	101
Figure 38 : La ville de Guelma en 1997.....	102
Figure 39 : La ville de Guelma aujourd'hui.....	102
Figure 40 : Habitat collectif en ilot (immeuble Ali Chouchana) (a) et habitat à loyer modéré (b) à Guelma.....	103
Figure 41 : Cité Guehdour Taher (a) et cité Agabi (b) à Guelma.....	104
Figure 42 : La nouvelle ville AADL à Hdjer Mengoub.....	105
Figure 43 : La localisation de notre corpus d'analyse par rapport à la ville de Guelma.....	106
Figure 44 : Schéma représentatif de la méthodologie de notre étude.....	110
Figure 45 : La forme urbaine de spécimen A.....	112
Figure 46 : La façade urbaine de spécimen A.....	112
Figure 47 : La forme urbaine de spécimen B.....	113
Figure 48 : La façade architecturale de spécimen B.....	113
Figure 49 : La forme urbaine de spécimen C.....	114
Figure 50 : La façade architecturale de spécimen C.....	114
Figure 51 : Degrés-jours de chauffage (HDD) et de climatisation (CDD) dans la ville de Guelma.....	120
Figure 52 : L'interface utilisateur graphique (IUG) de Citysim Pro	122

Liste des figures

Figure 53 : Les trois formes urbaine étudiées	123
Figure 54 : Interface du logiciel AutoCAD, 2018	124
Figure 55 : Exemple de modélisation 3D par le logiciel AutoCAD	125
Figure 56 : Interface du logiciel SketchUp, 2018.....	126
Figure 57 : Vue des stations météo algériennes disponible sur le logiciel Météonorm 7.2	127
Figure 58 : Gisement solaire (a) et rayonnement solaire directe (b) de l'Algérie reçue par jour sur une surface d'un mètre carré.....	128
Figure 59 : Le panneau solaire hybride Abora solaire (a) est ses couches constructives (b)	130
Figure 60 : Le pourcentage de suspicion pour les consommations estimées des chauffages (a) et des climatisations (b) pour le spécimen A.....	136
Figure 61 : Le pourcentage de suspicion pour les consommations estimées des chauffages (a) et des climatisations (b) pour le spécimen B.....	136
Figure 62 : Le pourcentage de suspicion pour les consommations estimées des chauffages (a) et des climatisations (b) pour le spécimen C.....	137
Figure 63 : Les consommations estimées des chauffages (a) et climatisations (b) pour les trois spécimens choisis selon les températures intérieures minimales et maximales	138
Figure 64 : Orientation des panneaux hybrides dans le spécimen A (a) et les spécimens B et C (b).....	140
Figure 65 : Rayonnement solaire annuel dans les trois spécimens sélectionnés	141
Figure 66 : La production solaire photovoltaïque et thermique pour les trois spécimens choisis	143
Figure 67 : La production solaire photovoltaïque pour les trois spécimens choisis	144
Figure 68 : La production solaire thermique pour les trois spécimens choisis.....	145
Figure 69 : Production PV/ST et : densité (a) / compacité (b) / couverture du site (c) du corpus d'analyse pour les trois spécimens sélectionnés.....	148
Figure 70 : Production PV/ST et : rapport d'aspect (a) / coefficient d'occupation du sol (b) du corpus d'analyse pour les trois spécimens sélectionnés	149
Figure 71 : Description du panneau solaire hybride (Abora Solar).....	188

Introduction générale

Introduction

Générale

Introduction générale

Introduction

L'énergie revêt une importance capitale pour le bien-être et la prospérité, exerçant une influence sur tous les domaines de la société et jouant un rôle crucial dans l'évolution et la stabilité d'un pays (Benalouache, 2017 ; Hadjadj, 2019). Néanmoins, l'énergie est une ressource précieuse qui engendre des émissions nocives et requiert des investissements financiers conséquents (TachTache & Halloufi, 2020). De plus, son impact financier a des répercussions sur les finances des ménages, des entreprises et des nations.

La sécurité énergétique représente un enjeu majeur pour la stabilité économique, sociale et stratégique d'une nation (Kapsalaki, 2012). D'après Greggio et Mafféi (2016), l'augmentation rapide de la demande d'énergie trouve son origine dans la croissance démographique et l'expansion économique. Ainsi, la diminution de la consommation énergétique s'avère cruciale et la société est confrontée à un choix complexe lors de sa transition vers un modèle énergétique et économique durable (Durand & Landel, 2020).

En plus de viser à diminuer progressivement la dépendance aux ressources conventionnelles, cette transition favorisera l'émergence rapide d'énergies renouvelables et durables dans le contexte de la lutte contre le changement climatique (Hamiti & Bouzadi, 2021). D'après les données de l'ONU-Habitat, les zones urbaines absorbent 78% de la consommation énergétique mondiale et génèrent plus de 60% des émissions de gaz à effet de serre, exposant ainsi fortement leurs habitants aux impacts du changement climatique (Nordhaus, 2019 ; Escaffre & Gambino, 2023). Le domaine de la construction est fortement impacté, comptabilisant 44,4% de la consommation globale d'énergie et 25% des émissions de CO₂ (Cao et al., 2016 ; Li et al., 2019).

Par conséquent, en l'absence de mesures plus performantes, la demande mondiale d'énergie dans ce domaine devrait croître de 50 % d'ici à 2050 (Mousseau, 2015 ; Pisani-Ferry et Martin, 2017 ; Bouramdane, 2022). L'Algérie, un pays d'Afrique du Nord situé dans la région du Maghreb, a une population de 44,9 millions d'habitants. Il s'agit du pays le plus vaste d'Afrique, couvrant une superficie totale de 2 381 741 km². L'Algérie possède une abondance de ressources énergétiques conventionnelles, notamment le pétrole et le gaz naturel. Néanmoins, la disponibilité abondante des ressources énergétiques non renouvelables entrave l'adoption des énergies renouvelables malgré le potentiel significatif du pays dans ce secteur.

Introduction générale

D'après les données statistiques, les combustibles fossiles représentent 99,6 % de la consommation totale d'énergie, avec une répartition de 35 % pour le pétrole, 64 % pour le gaz naturel et 0,6 % pour le charbon, alors que les énergies renouvelables ne contribuent qu'à hauteur de 0,4 % (CDER). Conformément aux tendances mondiales, l'Algérie a pris conscience de l'importance de contrôler et d'optimiser la consommation d'énergie, en particulier dans le domaine du bâtiment (Maiza, 2010).

Elle a adopté une dynamique énergétique verte, en lançant d'ambitieux programmes de soutien aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique (Astrid & Baradiy, 2014). Parmi ces programmes figure le programme de soutien, dénommé « Taka Nadhifa, signifiant littérairement énergie propre », et qui s'inscrit dans le cadre du partenariat stratégique énergétique de l'Union européenne avec l'Algérie (Salah-Salah & Harbi, 2023).

Taka Nadifa a été pris en charge par les autorités gouvernementales en février 2011, soumis à une révision en mai 2015, et élevé au statut de priorité nationale en février 2016. La stratégie du gouvernement algérien repose sur l'exploitation des ressources renouvelables telles que l'énergie solaire, dans le but de diversifier les sources d'énergie et de préparer l'avenir de l'Algérie. En associant les initiatives et les compétences, l'Algérie se lance dans une nouvelle ère de transition énergétique durable.

Ce programme participe de manière active aux initiatives nationales visant à atteindre les objectifs de développement durable (ODD) de l'agenda 2030 des Nations Unies en matière de développement durable, en particulier l'ODD n°7 qui vise à assurer l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable, ainsi que les ODD n°9 qui visent à développer une infrastructure résiliente et à promouvoir une industrialisation durable bénéfique à tous, et n°13 qui appelle à des actions urgentes pour lutter contre les changements climatiques et leurs impacts.

La mise à jour du programme des énergies renouvelables vise à déployer une capacité d'origine renouvelable d'environ 22 000 MW d'ici 2030 pour répondre aux besoins du marché national, tout en gardant comme objectif stratégique la possibilité d'exportation, sous réserve des conditions du marché. Le programme révisé d'efficacité énergétique a pour objectif de générer des économies d'énergie d'environ 63 millions TEP d'ici 2030, couvrant tous les secteurs (bâtiment, éclairage public, transport, industrie). Le programme d'efficacité énergétique aura pour effet de diminuer les émissions de CO₂ de 193 millions de tonnes.

C'est ainsi que l'Algérie a fait de la sécurité énergétique l'un des axes prioritaires de sa stratégie nationale, positionnant ce secteur comme un pilier central de son développement. La présente thèse s'inscrit dans ce cadre en abordant cette priorité stratégique, avec pour objectif de mettre en lumière l'intégration des énergies renouvelables dans le tissu urbain existant.

Introduction générale

Problématique

L'intégration des sources d'énergie renouvelable dans les zones urbaines pourrait représenter une solution significative pour relever le défi climatique auquel ces zones sont confrontées. L'élévation de la consommation des combustibles fossiles est responsable du phénomène du changement climatique à l'échelle planétaire, comme indiqué par le GIEC en 2007. L'adoption rapide, efficace et étendue des énergies propres et renouvelables est désormais une mesure cruciale pour diminuer les émissions futures de gaz à effet de serre provenant des combustibles fossiles et pour atténuer le risque de changement climatique (Hoffert, Caldeira et al., 1998). Face à la croissance des émissions de gaz à effet de serre en milieu urbain, il deviendra impératif d'intégrer les technologies d'énergie renouvelable dans les processus de planification et de conception des villes. En raison de la croissance continue de l'urbanisation et de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, la proportion des émissions provenant du secteur résidentiel devrait connaître une augmentation plus marquée dans les pays en développement. Au cours des deux décennies à venir, on prévoit que les émissions de gaz à effet de serre provenant du "secteur du bâtiment" atteindront leur niveau le plus élevé. L'intégration des énergies renouvelables à petite échelle dans les villes pourrait offrir un approvisionnement en énergie propre précieux, répondant ainsi à la demande croissante. Ces sources d'énergie renouvelable urbaines supplémentaires sont exploitées en tant que petites sources distribuées, ce qui contribue à la diversification de l'approvisionnement énergétique. Contrairement aux installations de production d'énergie renouvelable de grande envergure situées en dehors des zones urbaines, les systèmes d'énergie renouvelable urbains peuvent être incorporés dans les structures existantes sans besoin de terrains supplémentaires et être directement raccordés au réseau électrique.

La production d'énergie renouvelable en milieu urbain, étant localisée à proximité des zones de consommation, contribue à minimiser les pertes lors du transport de l'énergie. Par ailleurs, le déploiement des énergies renouvelables pourrait engendrer des impacts sociaux en encourageant les résidents et les entreprises à réaliser des économies d'énergie, étant donné que leur production et leurs performances peuvent être évaluées et comprises au niveau local. L'accroissement de l'utilisation des énergies renouvelables, notamment de l'énergie solaire, incite les urbanistes et les architectes à incorporer les technologies solaires dans les processus de planification et de conception urbaine. Cette évolution a été marquée par une croissance de la recherche scientifique ces dernières décennies, avec de nombreuses études se concentrant sur les liens entre l'urbanisme et l'efficacité solaire (Ahmad et al., 2017 ; Ahmadian et al., 2021 ; de Lemos Martins et al., 2016 ; Morganti et al., 2017 ; Reinhart & Davila, 2016 ; Sarralde et al., 2015 ; Zhang et al., 2019). L'aménagement physique des quartiers d'habitation a été analysé en vue de maximiser l'exploitation de l'énergie solaire. Alors que la littérature académique se focalise principalement sur l'impact de la morphologie des quartiers résidentiels sur la consommation énergétique des bâtiments (Bellini, 2017 ; Cao et al., 2016 ; de Lemos Martins et al., 2019 ; Trepci et al., 2020 ; Vartholomaios, 2015).

Introduction générale

Une nouvelle orientation de recherche émerge concernant la capacité de ces structures urbaines à générer de l'énergie à partir de sources renouvelables (Mohajeri et al., 2016 ; Ranjgar & Niccolai, 2023 ; Zhang et al., 2019), y compris des sources multiples (hybrides) (Mohajeri et al., 2019). Cependant, il est important de souligner que la plupart de ces recherches portent sur les agglomérations urbaines en Europe et leurs environnements particuliers (Agence internationale de l'énergie, 2018).

Pour combler les lacunes identifiées dans la littérature cette étude examine l'intégration des technologies d'énergie solaire hybride PV/ST dans l'espace urbain existant et l'impact de ce dernier sur la demande de refroidissement et de chauffage, en tenant compte de la consommation d'énergie dans l'espace urbain existant.

Pour ce faire la ville Guelma a été choisi comme terrain d'étude pour aborder la question cruciale de l'intégration des énergies renouvelables dans l'espace urbain existant. En tant que ville moyenne du nord-est algérien, caractérisée par un climat semi-aride, Guelma offre un cadre urbain diversifié et représentatif notamment en ce qui concerne les bâtiments résidentiels pour explorer le potentiel des technologies solaires, telles que le photovoltaïque et les systèmes solaires thermiques.

Après ce blindage du sujet cible, la question qui peut être extraites pour une investigation plus approfondie dans l'intérêt du sujet c'est :

Comment peut-on intégrer les systèmes énergétiques hybrides multi-source dans l'espace urbain existant pour promouvoir l'efficacité énergétique en milieu urbain à Guelma ?

Hypothèses

A la base des éléments annoncés dans la problématique précédemment notre recherche propose les deux hypothèses suivantes :

Hypothèse 01 :

Il existe une corrélation significative entre la forme urbaine et le potentiel d'intégration des systèmes énergétiques hybrides multi-sources dans les quartiers résidentiels existants. L'identification et l'application des indicateurs typo-morphologiques pertinents permettent de maximiser la capacité de production d'énergie renouvelable et d'améliorer l'efficacité énergétique dans les environnements urbains.

Hypothèse 02 :

L'examen de plusieurs configurations urbaines, issues de différentes périodes historiques dans le tissu urbain existant de Guelma, permettrait d'identifier les paramètres typo-morphologiques optimaux susceptibles de maximiser simultanément les rendements de la production d'énergie photovoltaïque (PV) et thermique (ST), tout en évitant une distinction marquée entre les deux technologies.

Introduction générale

Objectifs

Objectif principal

Explorer l'impact de la forme urbaine sur la capacité de production d'énergie solaire hybride au niveau des quartiers résidentiels, en mettant l'accent sur l'incorporation de systèmes énergétiques hybrides à sources multiples (photovoltaïque et thermique) et en examinant de quelle manière les caractéristiques typo-morphologiques impactent ces deux technologies de manière simultanée.

Objectifs secondaires

- Identifier les conditions optimales des agencements et configurations urbaines pour maximiser la production d'énergie renouvelable tout en harmonisant l'utilisation des ressources solaires disponibles.
- Déterminer les paramètres typo-morphologiques les plus influents sur l'efficacité énergétique des configurations urbaines étudiées, en comparant les méthodes axées sur un critère unique avec ou encore les approches multicritères (intégrant des variables telles que la densité, le rapport hauteur/largeur de la rue, l'orientation, la couverture de site, la compacité, le coefficient d'occupation du sol, et l'indice de facteur de vue du ciel).
- Évaluer la viabilité de l'intégration des énergies renouvelables hybrides dans les bâtiments résidentiels urbains qui se caractérise d'un climat semi-aride en Algérie.
- Fournir des recommandations pour orienter la planification de la forme urbaine en Algérie dans le contexte de la transition énergétique envisagée à l'horizon 2030.

Méthodologie

Pour tester les hypothèses de recherche et répondre à l'objectif assigné à cette thèse, nous avons adopté une approche Bottom-up, axée sur la modélisation énergétique urbaine (Urban building Energy modeling UBEM). Cette approche consiste à analyser les configurations urbaines à partir des caractéristiques spécifiques des bâtiments dans leur interaction et leurs agencements avec leur environnement immédiat au sein du quartier, pour ensuite évaluer leur impact global sur la performance énergétique.

Pour cela nous allons suivre la démarche méthodologique suivante :

Introduction générale

- **Elaboration du corpus d'analyse :**

Dans cette perspective, l'approche méthodologique débutera par la sélection des configurations urbaines qui formeront notre corpus d'analyse. Il est essentiel de constituer un échantillon représentatif des formes urbaines développées à Guelma pour cela il sera question d'effectuer une analyse de la morphogenèse du tissu urbain en insistant sur le développement du résidentiel collectif pris ici comme cas d'étude. Notre corpus d'analyse devra être constitué de formes urbaines qui seront des archétypes représentatifs de l'évolution du résidentiel collectif dans la ville. Cette sélection sera effectuée en tenant compte de plusieurs critères, notamment les typologies les plus répandues dans le tissu urbain et celles présentant des variations morphologiques significatives, telles que la superficie, la forme des quartiers, la densité urbaine, la forme des bâtiments et la hauteur.

- **Modélisation des formes urbaines**

Les modèles urbains sélectionnés seront élaborés en utilisant CitySim Pro, un outil de modélisation énergétique des bâtiments urbains basé sur le solveur CitySim développé au Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment de l'EPFL. Nous débuterons en utilisant les logiciels de conception AutoCAD et SketchUp afin de réaliser une modélisation précise des formes géométriques urbaines en trois dimensions. Par la suite, le modèle tridimensionnel sera intégré dans CitySim Pro, ce qui implique l'incorporation de toutes les données d'entrée relatives aux bâtiments et au climat du site via Météonorm 7.2.

- **Intégration des données et calibration**

Une fois les modèles importés dans CitySim Pro, nous calculerons l'énergie solaire globale incidente reçue par les enveloppes des bâtiments. Ce processus inclura également l'étalonnage des modèles choisis pour assurer leur précision et leur représentativité par rapport aux conditions réelles.

- **Intégration et analyse des technologies solaires**

En dernier lieu, nous procéderons à l'intégration et à la modélisation des technologies solaires déployées sur les toits des bâtiments examinés. La production d'énergie de ces technologies solaires sera calculée en fonction de la superficie totale des enveloppes des bâtiments, ce qui permettra une évaluation approfondie de leur efficacité dans les configurations urbaines choisies.

Introduction générale

Structure de thèse

Afin d'explorer la problématique de notre recherche et de répondre aux objectifs proposés, notre thèse est structurée en six chapitres. Tout on commence par une introduction générale qui contient le contexte général de l'étude, le résumé, la problématique, l'hypothèse, l'objectif et l'approche méthodologique. Par la suite on va aborder deux parties (théorique et expérimentale), dont lequel chaque partie contient trois chapitres et on se terminera par une conclusion générale.

Chapitre 01 :

Examine la transition énergétique et les systèmes énergétiques hybrides en milieu urbain, en analysant leurs caractéristiques techniques, leurs types, leurs contraintes, leurs coûts et leur impact environnemental. Ces éléments sont essentiels pour guider la prise de décision des concepteurs et favoriser le développement.

Chapitre 02 :

Vise à analyser l'influence de la forme urbaine sur la génération d'énergie photovoltaïque et thermique en mettant en lumière les interactions entre la forme urbaine et l'énergétiques des bâtiments.

Chapitre 03 :

Analyse la littérature existante concernant les indicateurs morpho-énergétiques, ainsi que les méthodes et les outils utilisés pour évaluer le potentiel solaire en milieu urbain.

Chapitre 04 :

Concentre sur le contexte urbain et climatique de notre étude, il a semblé pertinent dans un premier temps de fournir une vue d'ensemble de la ville de Guelma, en abordant son historique, sa localisation géographique et sa morphologie. Ensuite, nous allons examiner l'analyse climatologique de notre étude de cas.

Chapitre 05 :

Focalise sur la méthodologie de notre étude, en débutant par l'introduction de notre corpus d'analyse, suivi par l'exposition des données relatives à la consommation énergétique, pour conclure par la présentation de la modélisation énergétique urbaine à l'aide de CitySim Pro.

Chapitre 06 :

Examine la discussion des résultats. Il se concentre sur les résultats de la calibration, l'évaluation de la production d'énergie solaire, ainsi que l'importance de cette étude pour l'amélioration de l'efficacité énergétique dans notre cas spécifique. Ensuite, nous examinerons l'influence des indicateurs de la forme urbaine sur la production d'énergie solaire hybride.

Chapitre 1,

Transition Énergétique Urbaine

Positionnement Théorique

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

INTRODUCTION

La mise en place d'une politique énergétique efficace et cohérente, indépendamment des ressources disponibles, de la localisation géographique et des moyens financiers, requiert une anticipation significative et une détermination à ancrer durablement les décisions prises. Au cours des dix dernières années, le concept de transition énergétique a gagné en popularité dans le discours politique, en particulier en Europe. L'Allemagne a été précurseur dans ce domaine, en utilisant dès le début des années 2000 l'expression "tournant énergétique". De manière générale, une transition de ce type implique une modification du mix énergétique d'un pays pour réduire la part des énergies fossiles au profit des énergies renouvelables.

Les chocs pétroliers survenus en 1973 et 1979 ont constitué un tournant majeur dans la sensibilisation internationale à l'impact significatif de la facture énergétique sur les économies mondiales. Un nouveau concept apparaît, la sobriété énergétique, qui englobe la gestion de la consommation d'énergie, l'efficacité énergétique, l'optimisation de l'énergie et la diversification des sources d'approvisionnement.

Le Protocole de Kyoto, adopté lors de la troisième Conférence des Parties en 1997, s'inscrit dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Il vise à établir des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les pays développés, tout en soulignant l'importance de mesures pour promouvoir l'efficacité énergétique à l'échelle internationale, nationale et locale.

Ce chapitre vise à mettre en évidence les concepts fondamentaux associés à la transition énergétique en milieu urbain, ainsi que les politiques visant à adapter cette transition à l'échelle internationale et nationale. Enfin, une synthèse des énergies renouvelables, qu'elles soient d'une source unique ou hybride, sera présentée.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.1 Cadre conceptuel

L'objectif de la transition énergétique consiste à définir le passage d'un système énergétique à un autre. Cette transition n'est pas inédite dans l'histoire, cependant, celle à laquelle les pays développés sont actuellement confrontés semble être d'une nature différente (Fouquet & Pearson, 2012). Actuellement, face aux enjeux du développement durable, de nombreux urbanistes ont opté pour la promotion de la ville compacte, qui incarne l'économie d'espace et d'énergie. Depuis les années 2000, les autorités se sont engagées dans la régulation de la consommation énergétique des bâtiments, tant au niveau national qu'europpéen (Pollard, 2011), sans toutefois aborder la question à l'échelle micro-urbaine. De nombreuses études de recherche préconisent également l'adoption de la compacité urbaine (Kirwan, 1992 ; Katz, 1994 ; Newman, 2000 ; Bertaud, 2003).

Cependant, aucune d'entre elles ne démontre de manière explicite l'importance de l'urbanisme compact en termes de performances énergétiques et environnementales, bien que de nombreux auteurs conviennent que le rendement énergétique d'un bâtiment, même s'il est isolé, est largement affecté par la configuration physique de son voisinage plus ou moins proche (Maizia, 2007). Les lacunes dans le domaine de la recherche ont été soulignées par G. Maignant en 2005, qui a proposé une analyse environnementale de la compacité et de la morphologie urbaine (Maignant, 2005).

L'optimisation de l'efficacité énergétique en milieu urbain offre plusieurs bénéfices, tels qu'une meilleure qualité de l'air intérieur, un confort accru et une diminution des coûts énergétiques. Le secteur des transports présente également des avantages supplémentaires. Pour faire face à la prévision d'un triplement du nombre de véhicules d'ici 2050, de nombreux pays mettent en place des réglementations sur la consommation de carburant, visant à réduire la dépendance au pétrole, les émissions de gaz à effet de serre et la pollution atmosphérique.

Les secteurs de la transition et de l'efficacité énergétique se caractérisent par leur fragmentation et nécessitent la participation de nombreux acteurs, tels que les gouvernements, les entreprises privées, les organisations internationales, les investisseurs et la société civile. Il est crucial que tous ces intervenants utilisent les données et informations à leur disposition pour prendre des décisions éclairées concernant les objectifs stratégiques, les politiques, les programmes et les investissements.

I.1.1. Transition énergétique

La transition énergétique comprend l'évolution historique de la répartition mondiale des sources d'énergie, telles que le bois, l'hydroélectricité, le charbon, le pétrole, le gaz naturel et le nucléaire. Il est également important de se concentrer sur l'objectif politique et technique visant à transformer en profondeur les méthodes de production et de consommation d'énergie pour l'avenir. Cela constitue un aspect essentiel de la transition vers un environnement plus durable.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

D'après [Henri Safa \(2013\)](#), il est envisageable d'adapter et de diversifier la consommation énergétique en tenant compte des progrès technologiques, des coûts et de la disponibilité des ressources énergétiques, ainsi que de la détermination des individus, des gouvernements et des entreprises à minimiser les impacts environnementaux.

De nombreuses institutions scientifiques, gouvernementales et ONG ont proposé des définitions et des scénarios relatifs à la transition énergétique. Les projections mettent souvent en lumière la nécessité de passer d'un système énergétique basé sur des ressources non renouvelables à un mix énergétique dominé par les énergies renouvelables, voire de réduire la consommation globale. Cela implique d'utiliser les énergies renouvelables pour remplacer les ressources limitées et non renouvelables, dans des secteurs clés comme le transport, l'industrie, l'éclairage et le secteur résidentiel.

La transition énergétique inclut également une diminution de la consommation d'énergie, notamment par l'amélioration des performances des bâtiments et des technologies (efficacité énergétique) ainsi que par un changement des modes de vie (sobriété énergétique). [Jean-Marc Jancovici \(2013\)](#) souligne que cette transition doit être perçue comme à la fois comportementale et sociotechnique.

I.1.2 Efficacité énergétique

En économie, le concept d'efficacité énergétique ou d'efficience énergétique est utilisé pour décrire un système qui parvient à réduire sa consommation d'énergie tout en maintenant un niveau de service équivalent. Il s'agit d'un cas particulier de la notion d'efficience. Son champ d'application se concentre principalement sur les secteurs des transports motorisés, du bâtiment et de l'industrie, qui représentent respectivement environ 40 % et 25 % de la consommation énergétique totale de l'Union européenne.

De manière générale, l'efficacité énergétique nécessitant une recherche d'une intensité énergétique réduite (tout en maintenant le même niveau de service), une utilisation rationnelle de l'énergie, ainsi que l'adoption de processus et d'outils plus performants. Les économies d'énergie a pour objectif de réduire les pertes et les dépenses inutiles. Cela revêt également une importance capitale en matière de performance environnementale.

Dans certaines circonstances, la diminution des coûts énergétiques peut potentiellement conduire à une amélioration de la qualité du service. Depuis quelques années, il est couramment lié au concept d'énergie intelligente ou de réseau intelligent ([Kris De Decker, 2018](#)). L'objectif fondamental de l'efficacité énergétique est de diminuer les coûts environnementaux, économiques et sociaux (qu'ils soient directs ou indirects) liés à la production et à la consommation d'énergie. Elle aide à atténuer l'empreinte environnementale en réduisant l'impact énergétique et, dans certains cas, l'empreinte carbone.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.1.3 Sobriété énergétique

La sobriété énergétique consiste à réduire la consommation d'énergie par des changements de mode de vie et des transformations sociales. Ce concept politique se traduit principalement par une diminution appropriée des biens et services produits et consommés. Elle se distingue des autres initiatives de transition énergétique par son approche non techniciste, mettant l'accent sur les comportements, l'organisation et la structure sociale.

Elle est souvent confondue avec l'efficacité énergétique. La conservation de l'énergie peut nécessiter une réévaluation des besoins en fonction de leur impact environnemental. En effet, la publicité peut jouer un rôle significatif dans la perception de ces besoins. La sobriété énergétique est mise en œuvre en réponse à des impératifs environnementaux. Selon [Barbara Nicoloso \(2021\)](#), ces ressources se caractérisent par leur non renouvelabilité (comme les énergies fossiles) et par des seuils à respecter (tels que les émissions de gaz à effet de serre et la pollution).

I.1.4 Sources d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables désignent des formes d'énergie dont le renouvellement est suffisamment rapide pour être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine. Selon [Elamé et Nkeng \(2022\)](#), le terme "énergie renouvelable" est souvent utilisé comme une version abrégée pour désigner des expressions plus précises telles que "sources d'énergie renouvelables" ou "énergies d'origine renouvelable".

Le rayonnement solaire est la principale source d'énergies renouvelables, car il alimente divers processus énergétiques, tels que la photosynthèse, le cycle de l'eau pour la production d'hydroélectricité, l'énergie des vagues (énergie houlomotrice), l'énergie thermique des mers, qui exploite l'écart de température entre les eaux de surface et les profondeurs océaniques, ainsi que l'énergie osmotique, générée par l'apport d'eau douce dans l'eau de mer. L'énergie solaire influence également la rotation de la terre, créant ainsi des vents (énergie éolienne) et des courants marins (énergie hydraulique).

La géothermie, qui provient de la chaleur interne de la terre, est également considérée comme une source d'énergie renouvelable. En outre, le système Terre-Lune est responsable des marées dans les océans et les mers, ce qui est essentiel pour l'exploitation de l'énergie marine. Les énergies renouvelables se distinguent des combustibles fossiles et des minéraux (matériaux fissiles) par le fait que leur consommation dépasse largement leur taux de production ou de disponibilité naturelle.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.2 Transition énergétique dans l'espace urbain

I.2.1 Transition énergétique et géopolitique globale

Selon [Mouseil \(1999\)](#), il est essentiel et urgent d'établir et de renforcer des politiques de contrôle de la consommation d'énergie, car 85 % des émissions de gaz à effet de serre dans les pays du Nord sont dues à l'utilisation d'énergie. Au niveau mondial, il est devenu crucial de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine et de lutter contre les changements climatiques. Depuis l'adoption du protocole de Kyoto, plus de 180 pays développés se sont engagés à diminuer leurs émissions. Entre 1990 et 2012, une réduction de 5,2 % des émissions de gaz à effet de serre était prévue.

D'après un rapport du GIEC, l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est la principale cause de l'augmentation de la température moyenne mondiale, qui a augmenté de 0,74 °C entre 1906 et 2005, avec des prévisions d'augmentation pouvant atteindre entre 1,4 et 5,8 °C d'ici 2100. L'impact réel de cette hausse dépendra de l'engagement des nations à élaborer des stratégies pour renforcer les politiques de gestion de l'énergie, visant à réduire de moitié les émissions mondiales de CO₂ d'ici 2050, notamment par des initiatives d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment ([Jeanne Merzaux, 2023](#)).

L'efficacité énergétique devient de plus en plus importante et se positionne comme un objectif politique majeur. La demande mondiale d'énergie fossile devrait doubler d'ici le milieu du siècle, contribuant ainsi de manière significative à l'effet de serre. Les États signataires sont donc tenus de mettre en œuvre des mesures concrètes pour réguler leur consommation énergétique, assurer leur sécurité énergétique, promouvoir les énergies renouvelables et minimiser les impacts environnementaux par des politiques d'efficacité énergétique adaptées.

I.2.1.1 Approche entreprise par l'union européenne

Actuellement, 53 pays de l'Union européenne ont ratifié le protocole de Kyoto et se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 8 %. Face à la hausse de la demande énergétique, aux fluctuations des prix et aux risques de pénurie, l'Union européenne a élaboré une stratégie énergétique reposant sur trois piliers fondamentaux : la sécurité d'approvisionnement, la compétitivité et la durabilité. La commission européenne a nommé ce projet "L'Union européenne pour l'énergie", qui s'appuie principalement sur la feuille de route pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030. Selon [Epaulard et al. \(2024\)](#), l'objectif de cette stratégie de sécurité énergétique est d'assurer un approvisionnement durable, respectueux de l'environnement et économiquement accessible. Dans le domaine de l'énergie et du climat, l'Union européenne a établi des objectifs à long terme, notamment :

- Une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 20 % par rapport à 1990 d'ici 2020, de 40 % d'ici 2030, et de 80 à 95 % d'ici 2050.
- L'objectif est d'atteindre une part de 20% d'énergie provenant de sources renouvelables d'ici 2020, et d'au moins 27% d'ici 2030.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

- Il est préconisé de promouvoir une amélioration de 20% de l'efficacité énergétique d'ici 2020, et de 27% à 30% d'ici 2030, [Epaulard et al. \(2024\)](#).

Les émissions de CO₂ du secteur du bâtiment représentent 36 % du total des émissions de CO₂, et la consommation d'énergie liée à ce secteur atteint 40 % de la consommation totale d'énergie dans les 27 pays de l'Union européenne. Pour optimiser les performances énergétiques des constructions, diverses réglementations, comme la directive 2002/91/CE, ont été mises en place. Celles-ci mettent l'accent sur l'isolation, les systèmes de chauffage, la climatisation et la promotion des énergies renouvelables. Selon [Bouamama \(2013\)](#), cette notion englobe :

- Une méthode pour évaluer l'efficacité énergétique des bâtiments.
- Les exigences minimales pour les grands bâtiments, qu'ils soient neufs ou existants.
- L'exploitation des énergies renouvelables et la certification de l'efficacité énergétique.

1.2.1.2 Approche entreprise par l'Etats-Unis

Pendant plus d'un siècle, les États-Unis ont dominé la consommation mondiale d'énergie, quelle que soit la source. Grâce à des ressources nationales abondantes et à des coûts accessibles, les citoyens américains ont pu profiter de cette situation, favorisant ainsi la croissance économique et renforçant la position dominante du pays. Les États-Unis sont reconnus pour leur avantage économique découlant de leurs ressources en combustibles fossiles, en hydroélectricité et en énergie nucléaire. Au cours des dernières décennies, le domaine de l'énergie aux États-Unis a subi de nombreuses transformations.

Toutefois, l'année 2009 marque un tournant majeur caractérisé par des changements significatifs. Après une période prolongée des présidents, les États-Unis ont progressivement augmenté leur dépendance à l'égard des importations, (le pétrole brut, les dérivés pétroliers et le gaz naturel). Malgré les efforts d'exploration, le niveau d'autosuffisance énergétique a diminué en raison de la baisse de la production nationale. Les politiques énergétiques ont donc mis l'accent sur la diversification des fournisseurs et des sources d'énergie, tant sur le plan national qu'international.

Étant donné que les ressources pétrolières et gazières classiques se trouvent principalement dans des pays souvent instables sur le plan géopolitique, les États-Unis se sont retrouvés en concurrence directe avec l'Asie et l'Europe pour garantir l'accès à ces ressources. En 2009, la Chine est devenue le premier consommateur d'énergie au monde, surpassant ainsi les autres pays. Cette situation, associée à l'augmentation de la dépendance énergétique et à la crise économique, a soulevé pour la première fois dans l'histoire des États-Unis la question de la sécurité d'approvisionnement en énergie.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

Le programme du président Obama, instauré en janvier 2009, envisageait des changements majeurs dans la politique énergétique américaine, notamment à travers l'élaboration d'une nouvelle législation sur l'énergie. Elle comprenait des mesures visant à accroître l'efficacité énergétique, c'est-à-dire à réduire la consommation d'énergie tout en maintenant le même niveau de service, ainsi qu'à atténuer les effets du changement climatique. La problématique du changement climatique, autrefois ignorée par les autorités et le secteur industriel, occupe désormais une place centrale dans les discussions politiques, avec des résultats plus ou moins probants. Malgré le fait que les États-Unis n'aient pas ratifié le protocole de Kyoto, cette problématique est devenue essentielle.

Il a été qualifié de révolution écologique, se distinguant par des initiatives destinées à relever les défis industriels et technologiques liés à la lutte contre le changement climatique. Il s'agissait principalement de la première initiative fédérale visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, représentant ainsi une avancée significative pour les États-Unis dans ce domaine.

Malgré l'absence de législation fédérale à ce jour, le Président Obama, dans sa vision d'une Amérique durable, insiste sur la perspective du changement climatique non seulement comme un défi, mais également comme une opportunité de générer des millions d'emplois favorisant l'indépendance énergétique, la croissance économique et la protection de l'environnement.

D'après John Kerry, qui est coauteur du projet examiné au Sénat, la question environnementale représentait une occasion pour les États-Unis de retrouver leur position de leader mondial dans le secteur de l'énergie. Depuis lors, l'objectif est resté inchangé, cependant, en moins de trois ans, la situation aux États-Unis a connu une transformation structurelle ([Renaud Lassus, 2022](#)).

À l'avenir, les pays qui sont actuellement les plus grands consommateurs d'énergie par habitant et qui sont également les principaux importateurs, pourraient devenir des exportateurs nets d'énergie d'ici 2035. En 2010, les États-Unis ont surpassé la Russie en devenant le principal producteur mondial de gaz naturel. Grâce à des réserves multipliées par six, ils pourraient commencer à exporter du gaz dès 2017. Ils pourraient également devenir le premier producteur de pétrole devant l'Arabie saoudite la même année. À partir de l'année 2014, ils auraient acquis le statut de premiers importateurs, il est possible d'atteindre l'autosuffisance énergétique en se concentrant sur le développement de la production nationale. La revitalisation des ressources énergétiques a joué un rôle clé dans le statut de puissance mondiale des États-Unis. Les impacts de cette transformation sur la santé économique du pays, ainsi que sur les équilibres énergétiques et géopolitiques mondiaux, ne doivent pas être sous-estimés.

Le Président Obama s'est engagé à mettre en œuvre une transition énergétique mondiale significative afin de réduire l'empreinte environnementale des États-Unis. La révolution énergétique aux États-Unis est indéniable, cependant, il est important de reconnaître que la réalité économique et géopolitique peut parfois diverger du discours politique, notamment en ce qui concerne la vitesse, l'ampleur et les répercussions tant au niveau national qu'international.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.2.1.3 Approche entreprise par la Chine

La première mesure prise par Pékin pour réduire la consommation d'énergie du pays remonte aux années 1980. Cette politique novatrice a été exposée dans le cadre du VIe plan quinquennal (1981-1985), mettant en lumière la nécessité d'effectuer des ajustements structurels et industriels pour la consommation d'énergie en Chine. Elle soulignait également l'importance cruciale de la conservation d'énergie et du développement de nouvelles sources énergétiques. Ces mesures étaient destinées à réduire progressivement la part du charbon dans le bilan énergétique global. Ainsi, le VIe plan quinquennal a mis en place un premier cadre administratif pour la transition énergétique en Chine, bien que, à ce moment-là, ces mesures étaient davantage de nature recommandatoire que contraignante et exécutoire. Toutefois, ce contexte a encouragé l'établissement des différentes agences gouvernementales chargées de surveiller et de gérer les enjeux liés à la transition énergétique du pays.

Parallèlement, les autorités chinoises ont initié l'élaboration de la première législation relative à la conservation de l'énergie, qui a été approuvée par l'assemblée nationale populaire en 1997 après des discussions prolongées. Cette nouvelle loi a permis aux autorités provinciales de promulguer une série de règlements visant à préserver et à réguler la consommation d'énergie. Cela s'est concrétisé par l'établissement officiel de normes et de limites d'utilisation de l'énergie par unité de production pour les industries à forte consommation d'énergie.

Depuis les années 2000, le gouvernement chinois a mis en œuvre diverses mesures en faveur de l'environnement et du développement durable. De plus, il a introduit de nouvelles directives et réglementations visant à promouvoir la préservation et l'efficacité énergétique. Ces actions illustrent une sensibilisation croissante à l'urgence de la crise écologique et énergétique actuelle. Par conséquent, des normes de construction plus strictes ont été établies, notamment des réglementations énergétiques contraignantes, obligeant les constructeurs à améliorer l'isolation des nouveaux bâtiments situés dans les régions froides (Li & Yao, 2012).

Depuis le Xe plan (2000-2005), les objectifs environnementaux sont systématiquement intégrés dans chaque plan quinquennal. Autrement dit, dans ce programme, Pékin visait à augmenter la couverture forestière à 18,2 % sur une période de cinq ans, à réduire la concentration des polluants urbains et ruraux de 10 %, et à faire passer la part des espaces verts en milieu urbain à 35 % (Zhongguo Wang, 2004). Les objectifs énergétiques du XIe plan quinquennal (2005-2010) reflètent les préoccupations du gouvernement chinois en matière de sécurité énergétique, notamment la réduction de 20 % de la consommation d'énergie de la république populaire de Chine d'ici 2010 et l'augmentation de 15 % de sa production d'énergies renouvelables d'ici 2020. En 2011, la république populaire de Chine a défini les grandes orientations pour son développement futur dans le cadre de son douzième plan quinquennal (2011-2015).

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

Ce plan, pour la première fois depuis le début des réformes et de la politique d'ouverture, ne met pas l'accent sur les mesures économiques visant à soutenir un rythme de croissance.

En 2015, la Chine s'est engagée à réduire sa consommation d'énergie de 16 % et ses émissions de dioxyde de carbone de 17 % par unité de PIB par rapport à 2010 (Bie et al., 2013).

L'objectif principal de ces nouvelles politiques est de transformer le système énergétique de l'économie chinoise en promouvant l'adoption d'énergies renouvelables ou à faible émission de carbone, tout en réduisant la dépendance du pays aux énergies fossiles, tout en maintenant un niveau élevé de croissance économique.

I.2.2 Initiatives entreprise par l'Algérie

I.2.2.1 Politique nationale de gestion de l'énergie

Concernant l'Algérie, le pays fait face aux impacts des changements climatiques, qui aggravent la désertification. Dans ses stratégies de croissance, l'Algérie a intégré la dimension du développement durable, visant principalement à réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Elle a mis en place des mesures pour améliorer l'efficacité énergétique et a élaboré une politique de promotion des énergies renouvelables (Astrid & El Hassar, 2014).

Depuis le début, l'Algérie a reconnu l'importance de maîtriser et d'optimiser l'utilisation de ses ressources énergétiques. À la suite de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement à Rio en 1992, les pays industrialisés sont tenus d'incorporer les principes du développement durable dans tous leurs projets de développement, comme le souligne Djerroufi (2014).

En accord avec les traités internationaux, l'Algérie a pris en compte la notion de durabilité dans son cadre politique. Afin de concilier les impératifs du développement socio-économique, de promouvoir une utilisation rationnelle des ressources naturelles et de renforcer sa politique énergétique, divers organes gouvernementaux ont été instaurés. En 1982, le conseil national de l'énergie et le commissariat aux énergies nouvelles ont été établis.

En 1985, l'Agence pour la promotion et l'optimisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) a été créée. Plusieurs lois, mentionnées en annexe, ont été adoptées pour réguler et rationaliser la consommation énergétique. La loi 99-09 joue un rôle clé dans la gestion de l'énergie en s'appuyant sur les avancées scientifiques récentes. Elle regroupe l'ensemble des mesures et actions visant à optimiser la consommation d'énergie, à promouvoir le développement et l'utilisation des énergies renouvelables, ainsi qu'à réduire l'impact des gaz à effet de serre sur l'environnement, qu'ils proviennent de l'industrie ou des émissions urbaines (Astrid, El Hassar, & Baradiy, 2014).

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.2.2.2 Politique nationale de gestion d'énergie dans le secteur résidentiel

Selon une recherche menée par l'APRUE en 2012, le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire contribue à hauteur de 33 % à la consommation finale d'énergie du pays, tandis que les secteurs industriels et de transport, en tant que grands consommateurs d'énergie, représentent collectivement 60 % de cette consommation finale (figure 1).

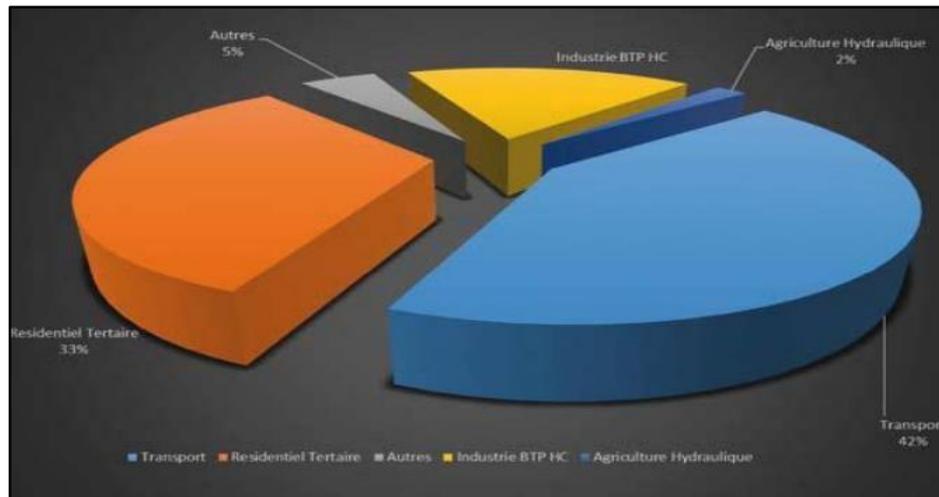


Figure 1 : Division de la consommation selon les secteurs d'activité

Source : Astrid, El Hassar, & Baradiy, 2014

La politique nationale de régulation de l'énergie s'articule autour de trois axes principaux :

- **Établissement des normes :**

Cela inclut des normes d'efficacité énergétique, comme celles relatives à l'isolation thermique des nouvelles constructions, ainsi que des critères pour l'efficacité énergétique et la conservation de l'énergie des équipements utilisant l'électricité, le gaz et les produits pétroliers.

- **Supervision de la performance énergétique :**

Cette supervision s'applique à divers secteurs, incluant les bâtiments, les équipements électriques, gaziers et pétroliers, ainsi que les véhicules et les machines à moteur.

- **Audits énergétiques périodiques :**

Il est exigé de réaliser des audits énergétiques réguliers pour les établissements à forte consommation d'énergie dans les secteurs de l'industrie, du transport et du tertiaire (Astrid & El Hassar, 2014).

Suite à la révision des documents du ministère du logement et de l'urbanisme, conformément aux normes européennes, il convient de mentionner qu'un arrêté ministériel a été publié le 10 décembre 1997 pour approuver le document technique réglementaire sur la réglementation thermique des bâtiments, connu sous le nom de "règle de calcul des déperditions calorifiques" (DTR C3.2).

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

Le ministère a donné son approbation au document technique réglementaire portant sur les "règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments fascicule 2, climatisation" (DTR C3.4) le 18 août 1998.

Le décret en date du 14 novembre 2005 a validé le document technique réglementaire DTR C 3.3.1 portant sur la ventilation naturelle dans les locaux destinés à l'habitation (Astrid, El Hassar & Baradiy, 2014).

Malgré la décision de l'État d'encourager des initiatives et d'adopter une politique énergétique conforme aux normes internationales et européennes, il est manifeste que cette dernière demeure inadéquate. Sur le plan économique, politique et technologique, divers obstacles entravent la pleine mise en œuvre de ces mesures. Devant les progrès réalisés par l'Europe en matière d'efficacité énergétique, l'Algérie doit encore accomplir des nombreux efforts. La crise du logement sévère rencontrée par l'Algérie n'a pas suscité une réflexion approfondie sur la conception des bâtiments et la mise en œuvre de la réglementation thermique. Les principaux critères de construction à prendre en compte sont la vitesse d'exécution, l'urgence et la minimisation des coûts. On constate également que des difficultés techniques et économiques sont fréquemment rencontrées :

- Le manque des compétences et des connaissances des professionnels du secteur résidentiel concernant les technologies d'efficacité énergétique. Identifier des solutions techniques et conceptuelles dès les premières étapes de la conception constitue un enjeu majeur.
- Les acteurs du secteur de la construction tels que les professionnels du bâtiment, les fournisseurs et les ouvriers peuvent manquer de connaissance sur les produits et matériaux d'isolation, ce qui peut entraver la concrétisation des projets envisagés

I.2.2.3 Initiatives entreprise par l'Algérie dans le domaine des constructions écoénergétiques

Depuis l'adoption de la loi n°90-99 sur la maîtrise de l'énergie, les réalisations en matière de construction en Algérie ont été limitées. Jusqu'en 2011, l'Agence de promotion et de rationalisation des usages de l'énergie (APRUE) a lancé un projet visant à construire 600 logements dans différentes régions du pays. Le programme EcoBat est conçu comme un projet pilote et exemplaire qui a pour objectif de sensibiliser le grand public et les professionnels aux enjeux de l'efficacité énergétique. Son but est également de mobiliser les acteurs du secteur de la construction en s'inspirant des bonnes pratiques écologiques observées à l'étranger. Ces produits offrent une gamme des matériaux d'isolations, de revêtement et de finition qui sont largement méconnus et peu accessibles. Le projet Taka Nadifa a pour objectif de promouvoir le secteur des énergies renouvelables, en particulier dans le domaine de l'électricité, ainsi que l'efficacité énergétique (EE) en Algérie.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

Ce domaine revêt une importance capitale dans les relations entre l'Union européenne et l'Algérie, étant donné que l'Algérie occupe la troisième place en tant que fournisseur de gaz naturel pour l'UE. L'objectif du programme est d'apporter un soutien à la mise en œuvre de deux initiatives gouvernementales en Algérie, à savoir le Programme national des énergies renouvelables 2015-2030 (PNDER) et le Programme Algérien d'efficacité énergétique 2015-2030 (PNEE). D'après [Salah-Salah & Harbi \(2023\)](#), ces programmes soutiennent les autorités nationales dans l'élaboration d'un modèle économique axé sur la transition énergétique, l'économie circulaire et le développement durable.

I.2.3 Contraintes rencontrées lors de la transition énergétique dans les espaces urbains

Les obstacles à l'adoption de l'efficacité énergétique dans les espaces urbains peuvent être synthétisés comme suit par l'expert britannique Bill BORDAS :

- Une compréhension insuffisante des améliorations requises dans le secteur du bâtiment et des moyens pour parvenir à une performance énergétique.
- La performance énergétique est souvent considérée comme un investissement onéreux par les parties prenantes et les utilisateurs.
- Les prévisions de performance énergétique durant la phase de conception sont souvent peu fiables, ce qui conduit fréquemment à une consommation énergétique finale des bâtiments deux fois supérieure aux estimations initiales.

Au niveau national, d'autres contraintes sont également présentes, telles que :

- Bien qu'il n'existe pas de loi nationale sur la transition énergétique, le gouvernement a réaffirmé son engagement à soutenir cette transition en mettant en place un plan d'action pour renforcer la capacité de production d'énergies renouvelables d'ici 2035.
- En outre, les systèmes énergétiques urbains, qui revêtent une importance stratégique dans la conduite des transitions énergétiques, ont été relativement peu régulés en raison de l'absence de cadre réglementaire urbain.

I.3 Aperçu des technologies liées aux énergies renouvelables

I.3.1 Production d'énergies renouvelables

Conformément à la réglementation en vigueur en Algérie, les énergies renouvelables sont définies comme suit : les énergies électriques, mécaniques, thermiques ou gazeuses produites par la conversion du rayonnement solaire, de l'énergie éolienne, de la géothermie, des déchets organiques, de l'énergie hydraulique et des technologies de valorisation de la biomasse. Cependant, de nombreux experts estiment que, malgré l'augmentation de la part des énergies renouvelables, celle-ci demeurera relativement limitée à court terme.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

D'une part, les réserves de pétrole restent significatives, avec des estimations de 40 ans pour le gaz, 62 ans pour le charbon et 400 ans pour le pétrole. Par ailleurs, il est probable que les énergies renouvelables demeurent plus coûteuses que les sources traditionnelles. La quantité de rayonnement solaire atteignant la surface terrestre est en moyenne 8000 fois supérieure à la consommation d'énergie primaire, soit environ 20 MW par habitant, compte tenu de la population mondiale actuelle. Ce flux énergétique peut être exploité via des technologies thermiques, photovoltaïques, ou à l'énergie éolienne, aux centrales hydroélectriques et aux biocarburants.

La plupart des énergies renouvelables peuvent être facilement converties en électricité, mais des sources comme le solaire, la géothermie ou la biomasse peuvent aussi produire de la chaleur. Ces ressources peuvent offrir les mêmes services que les sources traditionnelles, tels que le chauffage, la réfrigération et l'électricité, même en cas de difficultés ou de coûts élevés de transport. La conversion d'une source d'énergie renouvelable en électricité n'est pas toujours nécessaire ; par exemple, des systèmes de chauffage solaire de l'eau et des éoliennes entraînant des pompes à eau peuvent fonctionner de manière autonome, sans connexion au réseau électrique.

Cependant, pour mieux répondre aux demandes des consommateurs, les énergies renouvelables seront surtout utilisées pour la production d'électricité. Aucune source d'énergie n'est écologiquement neutre ; chaque type entraîne des compromis environnementaux. L'objectif principal est d'atteindre un développement durable, qui se caractérise par sa durabilité dans le temps sans épuiser les ressources rares, sa viabilité économique et sa capacité à promouvoir l'harmonie du développement économique mondial, en particulier pour les nations les moins favorisées.

I.3.2 Typologies des sources d'énergies renouvelables

I.3.2.1 Energie solaire

Depuis quelque temps, la production d'électricité solaire n'est plus considérée comme une utopie. Des petits panneaux solaires d'une capacité de quelques kilowatts aux centrales de plusieurs mégawatts, ces dispositifs contribuent à une production d'énergie respectueuse de l'environnement et offrent de vastes perspectives grâce à leur grande adaptabilité. L'énergie solaire peut également être exploitée à grande échelle pour produire de l'électricité via des centrales héliothermiques, qui convertissent le rayonnement solaire en chaleur. Bien que l'énergie solaire reçue par la terre puisse être variable, intermittente et peu concentrée, elle reste inépuisable, gratuite et non polluante.

Le solaire thermique, qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, et le solaire photovoltaïque, qui convertit la lumière en électricité, illustrent deux des nombreuses applications de cette technologie (Mahi & Kadri, 2021).

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.3.2.1.1 Energie solaire thermique

L'énergie thermique est produite par le rayonnement solaire. Ce dernier, est employé afin d'élever la température d'un fluide, qu'il s'agisse d'un liquide ou d'un gaz. Par la suite, le fluide absorbe l'énergie qu'il peut exploiter pour la production d'eau chaude sanitaire et de chauffage. Il s'agit d'une forme d'énergie solaire dérivée de la chaleur émise par le soleil à travers son rayonnement (Chebouat, A & Chebouat, F, 2023).

La production d'énergie repose sur des principes physiques fondamentaux, notamment l'absorption et la conduction thermique. La réflexion revêt également une importance capitale dans le contexte des systèmes à concentration tels que les centrales solaires thermodynamiques, les fours solaires, etc. Depuis 2014, le domaine de l'énergie solaire thermique a connu un important ralentissement. La Chine représente à elle seule 72,8 % de la capacité installée des capteurs, cependant elle est devancée par sept pays en ce qui concerne la puissance par habitant, notamment Chypre, la Palestine, l'Autriche, la Grèce et l'Australie.

I.3.2.1.2 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque, désigne la production d'électricité à partir du rayonnement solaire. D'après Daher & Taini (2020), un module photovoltaïque produit entre 19 et 38 fois plus d'énergie qu'il n'en consomme lors de sa fabrication et de son recyclage en fin de vie. La cellule photovoltaïque, composant électronique crucial d'un système, exploite l'effet photoélectrique pour transformer les ondes électromagnétiques solaires en électricité. Un module photovoltaïque est composé de plusieurs cellules interconnectées, lesquels sont ensuite assemblés pour constituer un système photovoltaïque.

L'électricité peut être utilisée de diverses manières, que ce soit en la stockant localement dans un système d'alimentation autonome ou en l'injectant dans le réseau de distribution et de transport. La création de l'alliance solaire internationale (ASI) en novembre 2015 a mis en lumière l'importance mondiale de l'énergie photovoltaïque lors de la conférence de Paris sur les changements climatiques (COP21). En 2020, l'énergie photovoltaïque représentait 3,1 % de la production électrique mondiale. D'après les estimations de BP, la part de l'énergie solaire a progressé pour atteindre 3,6 % en 2021.

La production mondiale d'électricité photovoltaïque est dominée par cinq pays, qui totalisent 65,9 % de la production la Chine (31,7 %), les États-Unis (14,2 %), le Japon (8,6 %), l'Inde (6,6 %) et l'Allemagne (4,8 %). D'après Moussaoui et al. (2023), il est à noter que sept des dix principaux producteurs de modules photovoltaïques proviennent de Chine, un autre est sino-canadien, un autre coréen et enfin un américain. Il est théoriquement nécessaire de produire une superficie photovoltaïque de 100 000 km², pour satisfaire l'intégralité des besoins mondiaux en électricité.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.3.2.2 Energie géothermique

La géothermie consiste à exploiter la chaleur naturelle du sous-sol, en faisant d'elle une source d'énergie renouvelable sans émission de gaz à effet de serre. Selon [Boumaouche & Bouchahem \(2017\)](#), la température du sol augmente d'environ 1°C tous les 30 à 40 mètres de profondeur. Ce processus permet de convertir l'énergie géothermique en chauffage ou en électricité. La température augmente de manière constante, allant de la surface jusqu'au noyau terrestre, avec des variations selon les régions, allant en moyenne de 3 °C par tranche de 100 m, et pouvant atteindre jusqu'à 15 °C voire 30 °C.

La chaleur provient principalement de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, ainsi que des échanges thermiques avec les couches internes de la terre, où les températures varient entre 1000°C et 4300°C. Selon [Mahi & Kadri \(2021\)](#), on distingue quatre types de géothermie haute énergie, moyenne énergie, basse énergie et très basse énergie.

I.3.2.2.1 Géothermie à haute et moyenne énergie

La géothermie à haute énergie (supérieure à 180 °C) et à moyenne énergie (entre 100 °C et 180 °C) est exploitée pour produire de l'électricité à partir des ressources géothermiques.

I.3.2.2.2 Géothermie basse énergie

Les applications de la géothermie basse énergie, qui se situe entre 30 °C et 100 °C, sont variées. Elles comprennent le chauffage urbain, le chauffage des serres, l'utilisation de la chaleur dans divers procédés industriels, ainsi que le thermalisme. Un avantage notable de la géothermie par rapport à d'autres sources d'énergie renouvelable est qu'elle n'est pas affectée par les conditions météorologiques (comme le soleil, la pluie ou le vent) ni par la disponibilité d'un substrat, contrairement à la biomasse.

Il s'agit donc d'une source d'énergie fiable et pérenne. Cependant, il convient de noter que cette source d'énergie n'est pas infinie, ce qui signifie qu'à un moment donné, la capacité calorifique du puits s'épuisera. Dans certaines situations, malgré le caractère technologiquement avancé des installations géothermiques et la gratuité de l'énergie qu'elles produisent, leur coût demeure considérable.

I.3.2.2.3 Géothermie très basse énergie : les pompes à chaleur

Depuis environ vingt ans, le concept des pompes à chaleur (PAC) utilisant l'énergie géothermique pour le chauffage des planchers est bien connu. Ces avancées techniques ont connu un développement notable, ce qui a permis à ce système de chauffage de rivaliser avec les méthodes traditionnelles de chauffage. Cependant, une proportion significative de l'énergie générée par une pompe à chaleur est issue de l'électricité.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

Les pompes à chaleur géothermiques font appel à des capteurs enfouis, constitués d'un ensemble de tubes à travers lesquels circule un fluide caloporteur, tel qu'un fluide frigorigène de type HCFC. Diverses techniques peuvent être mises en œuvre afin de transférer cette chaleur au sein du système de chauffage par le sol de la résidence. La méthode la plus fréquemment employée consiste en l'utilisation d'un "module de transfert" comprenant le compresseur, un ou deux échangeurs...

Il est recommandé que la surface de captage soit comprise entre 1,5 et 3,5 fois la superficie chauffée de l'appartement. L'utilisation d'une pompe à chaleur réversible permet également de rafraîchir le sol pendant l'été. En général, une pompe à chaleur génère entre 2 et 4 kWh de chaleur pour chaque kWh d'électricité consommé, ce qui en fait une option de chauffage électrique plus efficace. La chaleur est diffusée par un système de plancher chauffant à basse température, qui intègre une part d'énergie renouvelable, caractéristique de cette méthode, similaire aux planchers solaires directs. Il est également important de noter que certains fluides frigorigènes, en raison de leur impact sur la couche d'ozone, ont été interdits.

I.3.2.3 Energie éolienne

La production décentralisée d'électricité peut être facilitée par l'utilisation de l'énergie éolienne à petite échelle, offrant ainsi une alternative pour réduire la dépendance au réseau et minimiser les pertes de transmission. Les gratte-ciels offrent une opportunité significative dans le contexte urbain en raison de leur hauteur importante (Criil-García et al., 2022). La rotation d'une hélice sous l'effet du vent permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ou électrique, surtout dans les zones où la vitesse du vent est adéquate. Les applications de l'énergie éolienne sont variées, mais la génération d'électricité reste sa fonction principale, réalisée via des parcs éoliens ou des centrales éoliennes. Ces installations utilisent des équipements d'une puissance moyenne à élevée, allant de 200 à 2000 kW.

Pour des sites isolés, comme des îles ou des villages, il est également pertinent d'installer des systèmes autonomes d'une puissance allant de 500 W à plusieurs dizaines de kW. Cela permet de fournir de l'électricité à des infrastructures modernes, comme les tours jumelles algériennes, et de répondre aux besoins énergétiques sans dépendre du réseau électrique traditionnel.

I.3.2.3.1 Production d'énergie mécanique grâce au vent

Les éoliennes mécaniques sont principalement employées dans le but de pomper de l'eau. Un piston est actionné par l'hélice, laquelle élève l'eau depuis les profondeurs du sous-sol. D'après Lachi Elyas (2017), cette approche est particulièrement adaptée pour satisfaire les besoins en eau pour l'agriculture, l'alimentation et l'hygiène des communautés rurales éloignées.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.3.2.3.2 Production d'électricité par aérogénérateurs

La figure 2 ci-dessous met en lumière les composants essentiels de la machine. Les pales de l'éolienne récupèrent l'énergie cinétique du vent, puis le rotor, qui est relié à la génératrice, convertit cette énergie mécanique en énergie électrique. Par la suite, elle est distribuée conformément aux normes du réseau électrique, en passant par un transformateur.

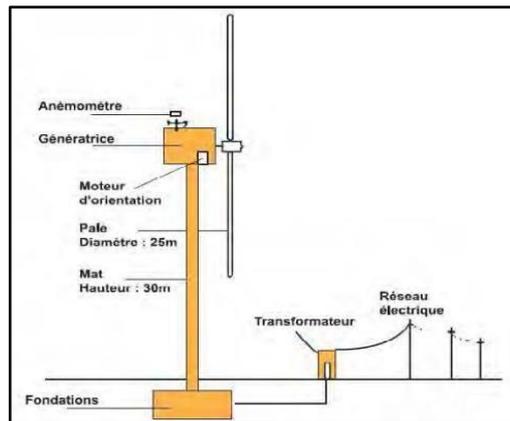


Figure 2 : Composants d'une turbine éolienne

Source : Guide des énergies renouvelables, 2007

I.3.2.4 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est exploitée dans les centrales hydroélectriques pour générer de l'électricité en utilisant la puissance de l'eau. Selon [Ginocchio & Viollet \(2012\)](#), cette puissance dépend de la hauteur de la chute d'eau pour les centrales de haute ou moyenne chute, ou du débit des cours d'eau pour les centrales au fil de l'eau. L'efficacité hydraulique repose sur le cycle naturel de l'eau, rendant cette source d'énergie renouvelable particulièrement importante.

Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, tandis que le vent facilite la condensation en nuages. Une installation hydraulique se compose généralement de trois éléments un barrage pour retenir l'eau, une centrale électrique pour produire de l'électricité, et des réseaux de lignes électriques pour acheminer et distribuer cette énergie. Cette infrastructure est essentielle pour tirer parti de l'énergie renouvelable que représente l'hydraulique.

I.3.2.5 Biomasse

La photosynthèse est un processus essentiel pour les plantes, qui leur permet d'absorber le dioxyde de carbone (CO_2) de l'atmosphère et de le convertir en hydrates de carbone, tout en libérant de l'oxygène. Il est manifeste que les ancêtres de l'humanité ne possédaient pas de connaissances sur ce phénomène physico-chimique, cependant ils ont rapidement pris conscience de la valeur de la "biomasse" en tant que source de chaleur. Récemment, le concept de biomasse est employé pour englober l'ensemble de la matière organique, incluant les végétaux exploités comme ressources énergétiques. Le bois de chauffage est la source la plus ancienne parmi celles-ci.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

Actuellement, il est possible d'intégrer la biomasse humide, qui inclut les résidus organiques de l'agriculture, les déchets végétaux, les boues des stations d'épuration et les déchets ménagers, comme ressources énergétiques à petite échelle. Cependant, leur impact environnemental n'est pas toujours optimal. Bien que la biomasse puisse contribuer à la production d'énergie renouvelable, des considérations doivent être prises en compte concernant les émissions de gaz à effet de serre et la gestion des déchets pour assurer une approche durable (Mahi & Kadri, 2021).

I.3.2.5.1 Bois énergie

Le bois est effectivement considéré comme une source d'énergie renouvelable prometteuse dans le domaine des énergies renouvelables. Sa combustion ou sa décomposition libère le dioxyde de carbone absorbé durant la croissance des arbres, ce qui contribue à un bilan écologique neutre, à condition que des pratiques de sylviculture durable et de reforestation soient en place. Cependant, les impacts de la déforestation, particulièrement dans les régions tropicales, soulignent l'importance d'une gestion responsable des ressources forestières pour maintenir cet équilibre environnemental (Lachi Elyas, 2017).

I.3.2.5.2 Biocarburant

Un autre avantage inhérent à la biomasse (figure 3) est sa capacité à générer des biocarburants. On distingue deux catégories les éthanol tels que le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre et les biodiesels telles que le colza, le tournesol ou le soja. En général, les biocarburants sont souvent utilisés en mélange avec des carburants fossiles comme l'essence et le gazole, contribuant ainsi à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à diversifier les sources d'énergie. Toutefois, il convient de noter un inconvénient majeur associé à ces biocarburants, à savoir la compétition pour l'utilisation des terres agricoles au détriment des cultures alimentaires (Bafrouh et al., 2021).



Figure 3 : Types de biomasse

Source : CDER

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.3.2.5.3 Biogaz

Le biogaz est principalement constitué de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂) (Bencheikh & Kaki, 2018). La production de biogaz est le résultat d'un processus de fermentation anaérobie des matières organiques d'origine animale ou végétale, catalysé par des bactéries spécifiques. Le méthane se forme de manière spontanée dans les sites d'enfouissement des déchets urbains, mais il peut également être généré de manière artificielle dans des installations appelées « digesteurs », où des déchets organiques solides ou liquides ainsi que des cultures bactériennes sont introduits simultanément. Plusieurs méthodes de valorisation du biogaz sont envisageables, y compris :

- **Génération de chaleur** : le biogaz peut être brûlé pour produire de la chaleur.
- **Production d'électricité** : utilisé dans des centrales à cogénération pour produire simultanément électricité et chaleur.
- **Carburant pour véhicules** : il peut être comprimé pour alimenter des véhicules.
- **Injection dans le réseau de gaz naturel** : après purification, il peut être injecté dans le réseau de distribution de gaz.

Ces approches permettent non seulement de réduire les déchets, mais aussi de produire de l'énergie renouvelable de manière durable.

I.3.3 Initiatives de l'Algérie en faveur du développement des sources d'énergies alternatives

L'Algérie, consciente des enjeux liés aux énergies renouvelables, a donc intégré leur développement dans sa politique énergétique. Cela s'est traduit par l'adoption d'un cadre juridique qui facilite la mise en place des infrastructures nécessaires. Parmi les mesures :

- **Incentives financiers** : la législation offre des incitations fiscales pour les projets visant à améliorer l'efficacité énergétique et développer les énergies renouvelables.
- **Fonds national de maîtrise de l'énergie (FNME)** : a été créé pour soutenir les investissements dans l'efficacité énergétique.
- **Promotion des produits locaux** : visent également à créer un environnement attractif pour les investisseurs intéressés dans le domaine des énergies renouvelables.
- **Réduction des droits de douane et de la TVA** : pour encourager l'importation des matières de fabrication des équipements d'énergies renouvelables, des réductions sur les droits de douane et la TVA sont envisagées.

Ces initiatives visent à renforcer le secteur des énergies renouvelables en Algérie et à favoriser un développement durable et respectueux de l'environnement.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

L'Algérie a mis en place plusieurs mesures pour encourager le développement des énergies renouvelables, notamment :

- **Électrification solaire des villages** : entre 1995 et 1999, 18 villages du Grand Sud ont été électrifiés grâce à l'énergie solaire. Une initiative similaire a été menée dans le cadre du Programme de soutien à la croissance 2005-2009, visant à fournir de l'électricité à 16 villages des hauts plateaux et du sud.
- **Équipement en énergie renouvelable** : un programme important a été lancé pour la région steppique des hauts plateaux, permettant d'équiper plus de 3000 foyers en électricité solaire. Ce programme inclut également des installations d'irrigation fonctionnant à l'énergie solaire et éolienne.

Ces initiatives témoignent de l'engagement de l'Algérie à promouvoir les énergies renouvelables et à améliorer l'accès à l'électricité dans des zones reculées, contribuant ainsi au développement durable du pays. En 2002, la création de la société Neal visait à renforcer la politique sectorielle en partenariat avec des acteurs publics tels que Sonatrach et Sonelgaz, ainsi que des acteurs privés comme la société Sim. Elle a initié le développement d'une installation éolienne d'une capacité de 10 MW dans la région de Tindouf. D'après [Eddrief-Cherf \(2019\)](#), ces initiatives s'inscrivent dans un vaste programme de promotion des énergies renouvelables visant à accroître la part de ces dernières dans le mix énergétique national à hauteur de 5% d'ici 2017.

I.4 Systèmes énergétiques hybrides dans l'espace urbain

I.4.1 Définition

Il est envisageable de remédier à l'instabilité de la puissance produite par les sources d'énergie renouvelables en intégrant ces sources et en mettant en place un système hybride (SH). D'après [Lazarov et al. \(2005\)](#), c'est un ensemble électrique qui combine plusieurs sources d'énergie, dont au moins une source renouvelable, pour produire de l'électricité de manière plus efficace et durable. Ces systèmes peuvent inclure des dispositifs de stockage d'énergie pour gérer la variabilité et garantir une fourniture d'énergie stable.

I.4.2 Classification des systèmes hybrides

Les classifications les plus couramment utilisées sont exposées ci-dessous.

I.4.2.1 Régime du fonctionnement

Selon le régime du fonctionnement ces systèmes hybrides peuvent être classés comme suit :

- La première catégorie comprend les systèmes hybrides qui opèrent en parallèle du réseau électrique, également désignés sous le terme de systèmes connectés au réseau. Ces systèmes revêtent une importance capitale dans la réponse aux besoins en électricité du pays.
- Le deuxième ensemble de systèmes hybrides peut opérer en mode isolé ou en mode autonome.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.4.2.2 Structure du système hybride

Le classement basé sur la configuration du système peut être réalisé en se basant sur trois critères distincts (figure 4).

- Le critère principal réside dans la présence ou l'absence d'une source d'énergie conventionnelle. Les sources traditionnelles d'énergie électrique peuvent consister en un générateur diesel, une micro turbine à gaz, voire une centrale électrique complète lors d'une analyse approfondie du réseau.
- Un autre facteur à considérer est la présence d'un dispositif de stockage. L'utilisation du stockage est essentielle pour garantir une satisfaction optimale des besoins en électricité lorsque aucune ressource primaire n'est disponible pour la conversion en électricité.
- La classification la plus récente est basée sur le type de sources d'énergie renouvelable employées. Le critère décisif pour sélectionner la source d'énergie appropriée dépend du potentiel énergétique disponible, lequel varie en fonction de l'emplacement où le système hybride est déployé. Un autre élément essentiel à prendre en compte est la consommation électrique, son importance influence la nécessité d'avoir recours à une source supplémentaire, à un dispositif de stockage et/ou à une source conventionnelle, parmi d'autres éléments.

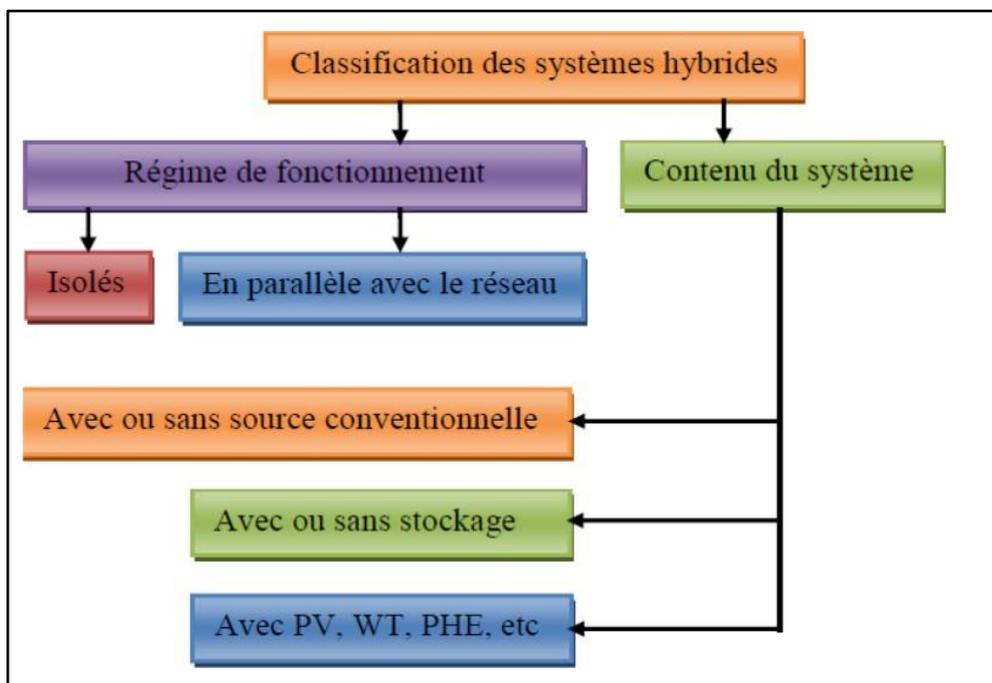


Figure 4 : Classement des systèmes hybrides

Source : Fartas, 2019

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.4.3 Etude des configurations des systèmes hybrides

I.4.3.1 Systèmes hybrides intégrant une source d'énergie conventionnelle

I.4.3.1.1 Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle

Ce type de systèmes hybrides est particulièrement adaptés aux zones à climat chaud (Shaahid & Elhadidy, 2003 ; Muñoz et al, 2004 ; van Sark et al, 2006), où l'ensoleillement est abondant. Ils sont conçus pour fonctionner de manière autonome et fournir une alimentation électrique continue à divers types de consommateurs :

- **Résidences** : fournissent une source fiable pour les foyers dans des régions isolées.
- **Immeubles résidentiels et commerciaux** : assurent l'alimentation électrique pour des bâtiments plus grands, facilitant les activités commerciales et les services.
- **Ensembles villageois** : soutiennent des communautés entières, offrant une solution collective pour l'accès à l'électricité (Oldach et al, 2004 ; Suponthana et al, 2006).
- **Centres de recherche** : peuvent être alimentés par des systèmes autonomes ou connectés au réseau électrique pour une flexibilité accrue (Tina et al, 2005).

Les composants de stockage, tels que les batteries, jouent un rôle essentiel dans ces systèmes, permettant de stocker l'électricité produite par les panneaux solaires, généralement en courant continu (Oldach et al, 2004). Pour répondre aux besoins en courant alternatif, des moteurs diesel peuvent être intégrés pour alimenter des générateurs, ce qui rend le système plus polyvalent.

I.4.3.1.2 Systèmes éolien/source conventionnelle

Les recherches sur les systèmes hybrides éolien/diesel se différencient de celles portant sur les systèmes photovoltaïques, principalement en raison de la compatibilité du courant alternatif produit par les éoliennes avec celui généré par les générateurs diesel. Ces systèmes ont été étudiés sur diverses îles, (Notton et al., 2001 ; Bowen et al., 2001 ; Carta et al., 2003).

Certaines études se concentrent sur des systèmes hybrides déjà en place, en présentant des données de mesure pour évaluer leur performance (Bowen et al., 2001). Ulleberg & Pryor (2002) ont intégré des aérogénérateurs pour diversifier les sources d'énergie, renforçant ainsi la résilience des systèmes. Des recherches ont également exploré des aspects politiques liés aux systèmes hybrides (Lund & Østergaard, 2000 ; Lund & Clark, 2002), l'analyse des flux d'énergie (Muljadi & Bialasiewicz, 2003 ; Elhadidy & Shaahid, 2004) et l'optimisation de la configuration des systèmes (Garcia & Weisser, 2006 ; Notton et al., 2001).

Ces systèmes hybrides approvisionnent une variété de charges, incluant des habitations isolées, des immeubles résidentiels (Elhadidy & Shaahid, 2005), des bâtiments publics (Elhadidy & Shaahid, 2004), des communautés villageoises (Bowen et al., 2001) et même des territoires insulaires (Carta et al., 2003). Cette diversité d'applications souligne leur flexibilité et leur pertinence dans différents contextes énergétiques.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

I.4.3.2 Systèmes hybrides intégrant des sources d'énergie renouvelable

I.4.3.2.1 Système hybride solaire/éolien

L'association d'un générateur photovoltaïque et d'une éolienne illustre parfaitement un système d'alimentation hybride. En hiver, l'énergie éolienne est généralement plus abondante, tandis qu'en été, les panneaux solaires atteignent leur rendement optimal. Ces systèmes hybrides offrent souvent de meilleures performances économiques et environnementales que les systèmes autonomes, comme les éoliennes ou les panneaux solaires pris isolément.

Un exemple notable est le système hybride installé à Pélican Rapids, dans l'ouest du Minnesota, pour un coût de 5 millions de dollars. Ce système combine une éolienne de 2 MW avec la capacité de générer 500 kW d'énergie solaire, ce qui a permis d'augmenter la capacité de production tout en réduisant les coûts d'exploitation de 150 000 \$ par an.

À Guangzhou, en Chine, la Tour de la Rivière des Perles intègre des panneaux solaires dans ses fenêtres et plusieurs éoliennes à différents niveaux. Bien que l'intégration de micro-turbines à gaz ait été envisagée, des contraintes administratives ont empêché sa mise en œuvre.

Cependant, l'expérimentation de panneaux solaires sur des éoliennes a soulevé des préoccupations, notamment des reflets lumineux éblouissants, créant des risques pour la sécurité aérienne. Pour atténuer ce problème, des panneaux solaires teintés ont été développés. De plus, l'éolienne à axe vertical, avec son design innovant, intègre des cellules solaires qui captent la lumière sous différents angles. Les avantages de cette combinaison incluent :

- **Complémentarité** : les périodes de fonctionnement à pleine capacité varient selon les saisons et les heures de la journée.
- **Stabilité de la production** : la production d'énergie est moins variable que celle des systèmes individuels, ce qui améliore la fiabilité de l'approvisionnement énergétique.

I.4.3.2.2 Système hybride hydroélectrique/éolien

L'énergie électrique générée par un système combinant des éoliennes et le stockage par pompage-turbinage est un excellent exemple de synergie entre différentes sources d'énergie renouvelable. Nova Scotia Power a été pionnière dans ce domaine, en élevant une installation expérimentale au site hydroélectrique de Wreck Cove à la fin des années 1970, où des éoliennes ont été testées pendant une décennie.

Dans ce type de configuration, les éoliennes exploitent leur potentiel éolien pour pomper de l'eau vers des réservoirs situés en altitude. Cette méthode de stockage par pompage permet de conserver l'énergie potentielle de l'eau, qui peut ensuite être libérée pour produire de l'électricité dans une centrale hydroélectrique lorsque la demande énergétique le nécessite.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

En combinant éolien et hydroélectrique, on maximise la fiabilité du système électrique, permettant une meilleure gestion des fluctuations de la production d'énergie renouvelable. Cela représente une avancée significative vers des solutions énergétiques durables et résilientes. Il a été souligné que cette combinaison est spécifiquement appropriée pour les îles non connectées aux réseaux électriques.

I.4.3.2.3 Système hybride solaire PV/solaire thermique

L'intégration des systèmes solaires photovoltaïques et thermiques dans une centrale hybride représente une solution innovante pour assurer une production d'électricité continue et économique. En exploitant l'énergie solaire photovoltaïque pendant la journée, lorsqu'elle est la plus disponible, on peut réduire les coûts d'exploitation tout en garantissant une production d'énergie fiable.

Les centrales solaires thermiques à accumulation, en utilisant des technologies comme les tours solaires ou les miroirs cylindro-paraboliques, offrent un moyen efficace de stocker l'énergie sous forme de chaleur. Cette chaleur peut ensuite être convertie en électricité lorsque la demande est plus élevée, ce qui permet d'atténuer les fluctuations de la production d'énergie.

En période de faible ensoleillement, si la centrale de stockage thermique ne peut pas fonctionner, il est possible de recourir à l'excédent d'énergie généré par d'autres sources renouvelables, telles que les éoliennes ou les centrales hydroélectriques.

En utilisant des sels fondus comme moyen de stockage, il est possible d'élever la température et de transformer cette énergie thermique en électricité lors des pics de demande. Cela permet non seulement d'optimiser le coût de l'électricité mais aussi de maximiser l'utilisation des ressources renouvelables disponibles, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'énergie non renouvelables. Ce modèle hybride offre une voie prometteuse vers une production d'énergie durable et résiliente, capable de répondre aux défis actuels de la transition énergétique.

Chapitre 01 : Transition énergétique urbaine positionnement théorique

CONCLUSION

En conclusion, ce chapitre met en lumière la pertinence fondamentale de l'énergie pour toutes les activités humaines et son impact sur l'amélioration du bien-être. L'évolution historique des ressources énergétiques, passant des combustibles fossiles aux énergies renouvelables, a joué un rôle majeur à cet égard.

Néanmoins, la consommation d'énergie des bâtiments actuelle est largement identifiée comme étant une des principales causes du changement climatique. Afin de relever ce défi, il est primordial d'opter pour une gestion plus efficace de l'énergie en favorisant des constructions à haute performance énergétique, des équipements efficaces, des technologies industrielles de pointe et des systèmes de transport optimisés, tout en renforçant le recours aux sources d'énergie renouvelable. Les mesures de gestion et d'efficacité énergétique adoptées par différentes nations sont essentielles pour diminuer la consommation d'énergie et résoudre les enjeux environnementaux. En Algérie, la transition énergétique est actuellement un sujet émergent qui attend la mise en place du cadre réglementaire indispensable pour la réalisation effective des nombreux projets et programmes en cours.

Dans un contexte urbain, il est crucial de contrôler les niveaux de consommation et d'optimiser l'utilisation de l'énergie, tout en opérant une transition graduelle vers des sources d'énergie renouvelables. Ces mesures sont fondamentales non seulement pour accroître l'efficacité énergétique des constructions, mais également pour l'ensemble de l'environnement urbain. Il est donc essentiel d'évaluer le degré d'adaptabilité des formes urbaines actuelles à l'intégration des nouvelles technologies dites énergies renouvelables.

Chapitre 2,

Design Urbain

Éléments De Conceptualisation

INTRODUCTION

La forme urbaine découle de la coordination des aménagements effectués à diverses échelles (agglomération, quartier, rue et bâtiment) en relation avec l'occupation humaine du territoire. Elle constitue également l'une des expressions majeures du design urbain. Il est crucial de saisir la forme urbaine et ses répercussions afin de mieux comprendre les dynamiques et les résultats des environnements urbains, et également pour déterminer les leviers permettant d'optimiser la qualité et la durabilité de l'espace urbain.

Ce chapitre vise à établir un cadre conceptuel sur le design urbain et la forme urbaine dans le but d'approfondir la compréhension de ces notions fondamentales. Nous allons également examiner la forme urbaine dans sa relation avec l'efficacité énergétique de l'environnement urbain, en mettant particulièrement l'accent sur son potentiel de génération d'énergie en intégrant de manière simple et efficace des sources d'énergie renouvelables. Ce chapitre portera sur une analyse des différents éléments qui impactent les performances énergétiques au niveau micro-urbain.

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

II.1 Forme urbaine : une concrétisation physique du design urbain

II.1.1 Genèse du design urbain

Un programme universitaire interdisciplinaire conçu par l'architecte allemand Walter Gropius a été exposé dans le premier manifeste de l'école du Bauhaus en 1919. Gropius avait pour ambition d'accomplir l'intégration de l'architecture, de la sculpture et de la peinture, ce qui constituait une caractéristique distinctive du Bauhaus, selon [Giedion \(1954\)](#). Son objectif était de convaincre les étudiants d'accepter des solutions qui n'avaient pas encore été envisagées par leur instinct, en utilisant des arguments logiques. Cette conception de Gropius reflète sa pratique artistique, laquelle se distingue par une capacité à anticiper les évolutions et les mutations à venir, résultant à la fois de la rationalité et de l'instinct ([Giedion, 1954](#)).

Dans les années 1930, lorsqu'il est arrivé à l'Université Harvard à Cambridge, il a réintroduit ce concept intégratif, en se concentrant cette fois sur l'intégration de l'architecture, de l'urbanisme et de la planification régionale. Il a désigné cette collaboration sous le terme de "travail d'équipe". Ce projet devait être étroitement lié aux autres facultés de l'université, correspondant à un potentiel accru de travail et de productivité créative. Il visait à promouvoir une architecture de qualité, privilégiant l'aspect fonctionnel plutôt que des projets esthétiquement attrayants mais de qualité médiocre. Pour lui, l'aspect du "comment" était plus crucial que celui du "quoi", car il considérait que c'était un moyen efficace de rejeter les idées préconçues ([Giedion, 1954](#)).

Grâce à ses concepts novateurs, Gropius a précédé l'architecte José Luis Sert, qui a introduit, en collaboration avec son homologue suisse Siegfried Giedion, le concept de "design urbain" au début des années 1950. Le terme "Urban Design" a été introduit pour la première fois lors d'une conférence de Sert en 1953, et en 1954, un cours dispensé par Giedion à la Graduate School of Design de Harvard a été intitulé "History of Urban Design" ([Mumford, 2006](#)). Lors de la première conférence intitulée « Harvard Urban Design » qui s'est tenue en 1956, le design urbain a été défini comme un processus collaboratif impliquant des architectes, des architectes paysagistes et des urbanistes ([Barnett, 2006](#)).

Selon Sert, le designer urbain jouerait le rôle d'orchestrateur ([Scott Brown, 2006](#)). Sert avait pour objectif d'initier une réforme parmi les urbanistes, mettant l'accent sur l'importance d'une vision globale ([Marshall, 2006](#)) qui prend en compte la dimension sociologique, l'environnement naturel et la structure urbaine. Placer de nouveau l'accent sur le piéton est certainement l'un des principaux objectifs de Sert ([Mumford, 2006](#)). Il exprimait son intérêt pour la "réorganisation du quotidien" ([Marshall, 2006](#)). Il critiquait la dernière génération d'urbanistes pour avoir conçu des villes surchargées, à une échelle inhumaine. Il soutenait donc le concept du Modernisme qui préconise, par exemple, des centres-villes et s'intéresse à la conception d'environnements sains ([Lang, 1994](#)).

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

II.1.2 Domaine du design urbain

Le design urbain, qu'il soit une discipline, une profession, une approche pratique ou théorique, un art ou une science, ne se limite pas à un domaine spécifique et ne peut être réduit à une simple formule. Cependant, il est souligné que la collaboration constitue le fondement de ce concept. En plus des architectes, architectes paysagistes et urbanistes mentionnés par Sert, on doit également inclure les ingénieurs civils, les élus, les investisseurs et la population (Barnett, 2006).

II.1.2.1 Design urbain dans le cadre du design environnemental

L'objectif essentiel du design consiste à trouver des solutions aux problèmes. Ces problèmes identifiés, qui ne sont pas le fruit de l'imagination de quiconque, constituent le sujet d'analyse du designer et le point de départ d'un projet. Selon Rapoport (2003), il est essentiel que le projet repose sur une compréhension approfondie des interactions entre les individus et leur environnement. Ces interactions, abordées par Rapoport, s'inscrivent dans le champ de l'écologie humaine, qui se concentre sur l'analyse des relations entre les individus et leur environnement immédiat ou plus large.

II.1.2.2 Design urbain en tant que processus de conception et de recherche

Certains soutiendront que la question ne réside pas dans la hiérarchisation et l'échelle d'intervention spécifiques au design urbain, mais plutôt dans l'approche. Dans cette perspective, le design urbain se focalise sur les relations entre les éléments physiques ou les espaces publics et leur intégration dans un contexte donné, à toutes les échelles (Scott Brown, 2006). Le designer opère en tenant compte des implications à long terme et des évolutions potentielles du milieu urbain.

Ainsi, le design urbain peut être décrit comme le processus de conception et de mise en œuvre d'aménagements physiques visant à structurer un réseau de relations et à contrôler, de manière durable et adaptable, l'organisation formelle et l'évolution des zones urbaines (Barré, 2005). La notion de temps est largement présente. En tant que processus ou approche, le design peut servir de méthode empirique de recherche pour favoriser l'innovation technologique et scientifique.

Étant donné qu'il articule de manière systématique de multiples aspects, le design contribue à la production de nouvelles connaissances scientifiques, favorisant ainsi le développement de principes organisationnels spatiaux et de modèles théoriques interdisciplinaires (Klaasen, 2004). L'éclectisme est une qualité appréciée chez les designers, car il s'agit d'un mouvement philosophique consistant à sélectionner les éléments les plus pertinents de divers systèmes existants pour en créer un nouveau. Il reflète une ouverture d'esprit qui englobe tous les domaines, voire tous les sujets, dans un domaine spécifique (Maubourguet, 1997).

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

Selon [Lynch & Hack \(1984\)](#), dans les cas où il n'est pas psychologiquement réalisable d'adopter une approche éclectique, les concepteurs devraient chercher d'autres méthodes de travail et reconnaître les types de problèmes pour lesquels leur approche est la plus appropriée. Le design urbain peut être considéré comme un domaine transdisciplinaire vaste, agissant à divers niveaux d'intervention, allant du niveau architectural au niveau territorial, et établissant des liens physiques et interdisciplinaires.

II.1.3 Importance du design urbain

Orienter l'évolution urbaine représente un enjeu majeur pour l'urbaniste, comme le souligne [Barnett \(2006\)](#). D'après [Marshall \(2006\)](#), une approche idéale du design urbain consisterait à harmoniser la configuration spatiale et les éléments fonctionnels des contextes urbains au sein d'une composition globale, sophistiquée et harmonieuse. Ainsi, selon [Marshall \(2006\)](#), le rôle du designer n'est pas de concevoir une solution unique, mais de fournir des orientations pour la création et l'évolution d'une ville harmonieuse dans sa globalité. Cependant, l'opinion sur la position de Denise Scott Brown n'est pas unanime. Le design urbain est mis en œuvre en tenant compte de divers aspects, avec une attention particulière portée aux détails, ce qui peut entraîner des économies significatives ([Bergmann, 2006](#)).

En d'autres termes, le design urbain englobe la gestion des liaisons à diverses échelles ; de l'incorporation d'un luminaire dans une façade, à l'ajustement d'un ensemble de logements à un contexte géomorphologique particulier, en passant par la structuration syntaxique de nouveaux quartiers urbains afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire ou la conception d'un élément architectural reliant un bâtiment à une esplanade publique ([Frampton, 2003](#)). Le designer joue également un rôle essentiel en tant que communicateur et vulgarisateur des multiples facteurs complexes qui influent sur la création des conditions urbaines uniques et variées ([Marshall, 2006](#)). Le concepteur principal joue un rôle d'intermédiaire, de guide, de facilitateur et d'animateur au sein de la plateforme de l'innovation sociale ([Lemieux, 2005](#)).

Le design urbain doit également prendre en compte les exigences physiologiques, sécuritaires, identitaires, cognitives, éducatives, d'intimité et d'estime d'une communauté ([Lang, 1994](#)). En plus des contributions du designer à la société, il s'engage également à promouvoir la préservation de l'environnement naturel et la gestion durable des ressources naturelles dans les zones urbanisées.

II.1.4 Logique, méthodes et processus

Les méthodes et les processus de conception peuvent varier. Les premières approches du design urbain mettaient en avant l'importance de l'intuition et de la logique, tandis que d'autres insistaient sur divers processus systématiques et prônaient une approche philosophique du design ([Shirvani, 1985](#)). On peut noter une cohérence entre ces deux courants de pensée, sans qu'il soit nécessaire de les hiérarchiser : selon [Lang \(1994\)](#), le processus de conception se distingue nettement par son caractère pragmatique par rapport à la prédominance actuelle d'une logique essentiellement financière.

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

Le design implique des processus cycliques selon [Lynch & Hack \(1984\)](#) ; il doit faciliter des retours fréquents en arrière afin de mettre en parallèle ou d'alterner de manière itérative des aspects nouveaux ou des dimensions initialement insoupçonnées. Cette métaphore continue d'être utilisée tout au long d'un projet car elle constitue un instrument de communication ([Manzini, 1991](#) ; [Pickett, 2004](#)). Diverses idées émergent et chaque problème identifié ouvre la voie à de nouvelles pistes de réflexion. Le problème est réévalué, ce qui est suivi par un nouveau cycle d'innovation et d'expérimentation ([Lynch & Hack, 1984](#)).

L'évolution du processus de conception a été significative. En réalité, le design, en tant qu'activité créative visant à répondre à un besoin, trouve ses origines dans les premiers actes intuitifs de conception d'outils par les hommes préhistoriques pour répondre à leurs besoins. Par la suite, le processus s'est progressivement complexifié en incorporant de nouvelles boucles méthodologiques dans le parcours qui va de l'identification d'un besoin à sa satisfaction. La première étape consiste à définir le problème ou à identifier le besoin. L'objectif est de formuler le problème de manière si explicite que cette formulation devienne le point de départ de la résolution, comme l'ont souligné [Chermayeff & Alexander \(1972\)](#).

Ensuite, il est essentiel que le processus expérimental accorde une place prépondérante à l'intuition pour explorer de nouvelles pistes de recherche, qui constitueront la prochaine étape de l'étude. Le processus de conception est fréquemment segmenté en différentes étapes bien définies, et il existe un accord général à ce sujet. D'après [Jon Lang \(1994\)](#), cinq phases sont également identifiées, bien qu'elles soient caractérisées de manière différente : l'étape d'intelligence, l'étape de conception, l'étape décisionnelle, l'étape d'exécution et l'étape opérationnelle ([Lang, 1994](#)).

II.2 Autours de la forme urbaine

II.2.1 Définition de la forme urbaine

La morphologie urbaine peut être définie de différentes manières selon l'échelle considérée, allant de la configuration générale de la ville à celle des îlots. Pierre Merlin la décrit, dans le contexte de l'urbanisme et de l'aménagement, comme l'ensemble des éléments de l'environnement urbain formant une entité homogène.

De son côté, Kevin Lynch, dans "L'image de la cité", définit un secteur aux formes urbaines comme une partie spécifique du territoire urbain, identifiée de manière globale et correspondant à une zone homogène sur le plan morphologique. Ce secteur peut avoir des limites clairement définies ou se terminer par des frontières floues. En matière d'aménagement urbain, il peut englober la notion de quartier ou représenter une division totalement distincte.

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

II.2.1.1 Contexte historique

À la fin du XIII^e siècle, le terme "morphologie" a été introduit en biologie par Johann Wolfgang Goethe, qui l'a utilisé dans le domaine des sciences naturelles, notamment en botanique. D'après le dictionnaire "Le Petit Robert, 2006", le terme "morphé", associé au suffixe "logie", renvoie à l'étude de la forme externe et de la structure des organismes vivants, incluant l'analyse de l'évolution des formes à travers le temps.

Pendant l'entre-deux-guerres, le concept de morphologie urbaine a été introduit pour la première fois par des géographes allemands et britanniques tels que [Leighley, J & Fleure, H \(1928\)](#). Dans les années 1960-1970, l'émergence de la morphologie urbaine a été une réponse critique aux abus du mouvement moderne et de l'urbanisme fonctionnaliste. Elle est caractérisée par trois courants principaux : la typo morphologie italienne, la morphologie britannique et l'école française.

II.2.1.2 Typo-morphologique italienne (depuis 1955)

Il s'agit d'une méthode élaborée par Saverio Muratori en Italie, connue sous le nom « d'histoire opérationnelle », qui se concentre sur la préservation des centres-villes historiques et sur l'analyse de l'évolution des édifices à travers le temps. Cette approche implique d'appréhender l'environnement bâti dans son contexte historique afin de prendre en compte les facteurs externes tels que l'économie, la fonctionnalité, qui influent sur la morphologie urbaine.

II.2.1.3 Morphologie urbaine britannique (années 1960)

Il s'agit d'une méthode analytique de l'organisation urbaine, élaborée par M.R.G. Conzen à l'Institut géographique de Berlin, et ensuite adoptée par Jeremy Whitehand en Angleterre. Cette approche se base sur l'analyse des schémas parcellaires.

II.2.1.4 Morphologie urbaine française (années 1970)

Son émergence remonte aux années 1970 avec la parution, sous la direction d'André Chastel, de l'ouvrage intitulé "Système de l'architecture urbaine : le quartier des Halles à Paris". Cette approche a été élaborée à Versailles, en France, par Panerai Philippe, Jean Castex et Jean-Charles Depaule, et se concentre sur la relation dialectique entre la configuration urbaine et les interactions sociales. L'objectif est d'analyser les données provenant de l'espace physique afin de révéler ses principes intrinsèques ou ceux qu'il représente.

Cette approche souligne la relation dialectique entre ces deux dimensions de la ville. À l'échelle macro, l'analyse de l'évolution historique de la forme urbaine se base sur des éléments comme le plan de la ville et la configuration des voies ([Panerai, 1997](#)). En revanche, l'échelle micro en architecture se concentre sur la classification des différents types de bâtiments urbains selon leur position dans le réseau routier, ainsi que sur des critères dimensionnels, fonctionnels et esthétiques, comme l'indique [Panerai \(1997\)](#).

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

Ce nouveau concept de "typologie" fait référence à la discipline étudiant les types architecturaux. Il a émergé en réaction à l'échec du mouvement moderne, appelant à une réévaluation du patrimoine bâti afin de développer une méthode d'analyse des sociétés humaines. Les édifices sont considérés comme étant en interaction avec les groupes sociaux, étant conçus pour répondre à leurs besoins et évoluant en fonction de leurs évolutions et exigences.

II.2.2 Définition de la morphologie urbaine

Selon [Allain Rémy \(2004\)](#), la morphologie urbaine se définit comme l'étude de la configuration spatiale des villes, de l'évolution de leur structure urbaine et des interactions entre les différents éléments qui la composent. Cela donne lieu à des agencements spécifiques et à des formes urbaines distinctes. L'analyse urbaine diffère selon les objectifs des urbanistes : certains se concentrent sur la causalité (le pourquoi), tandis que d'autres s'intéressent à la manière dont les phénomènes se manifestent (le comment).

Aymonino se concentre sur l'analyse des raisons sous-jacentes, définissant la morphologie urbaine comme l'examen et la catégorisation des facteurs qui influent sur la création et l'évolution de la configuration physique d'une ville. Caniggia, Castex, Gerosa, Lévy et Vernez Moudon, soulignent le processus de formation, les lois d'évolution et de transformation de la structure physique de la ville (le comment), en tant qu'objectif principal de la discipline de la morphologie urbaine. L'objectif de l'étude de la morphologie urbaine est d'offrir une approche analytique de la ville, en examinant l'évolution de sa forme en corrélation avec les évolutions sociales, économiques et démographiques.

Cette approche vise à proposer une vision normative et maîtrisable du développement urbain ([Merlin, 1988 & Lévy, 2005](#)). La morphologie urbaine est fréquemment employée comme approche pour résoudre les problématiques liées à l'aménagement, à l'analyse des transports, à la circulation ([Millot 2003](#), [Hankey et al. 2010](#), [Liu et al. 2011](#), [Zahabia et al. 2012](#)), à l'environnement thermique ou climatique ([Shashua-Bar et al. 2006](#), [Zhao et al. 2011](#), [Norte Pinto 2014](#)), ainsi qu'aux aspects sociaux et économiques. [Bouchair & Tebbouche \(2013\)](#) soutiennent la vision de [Steemers & Steane \(2004\)](#) qui vise ; la morphologie urbaine se réfère à la configuration tridimensionnelle d'un ensemble de bâtiments ainsi qu'aux espaces publics qui les entourent.

Ils soulignent que l'utilisation novatrice des techniques d'analyse d'images appliquées aux textures urbaines tridimensionnelles permet d'établir des liens simplifiés entre les caractéristiques microclimatiques et la morphologie urbaine. L'incidence de la configuration architecturale des bâtiments sur l'exposition au soleil, la circulation du vent et la propagation du bruit dans un environnement ouvert peut être analysée.

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

De nombreuses recherches ont été menées pour élaborer des indicateurs morpho-énergétiques afin de mesurer le microclimat urbain et la relation entre l'environnement urbain et l'énergie. Certains chercheurs se basent sur des approches théoriques de la géométrie urbaine (Adolphe, 2001), tandis que d'autres les développent en utilisant des données provenant d'études à l'échelle des projets urbains afin de synthétiser les potentialités bioclimatiques et énergétiques de ces projets (Groleau & Bourges, 2005).

II.2.2.1 Morphologie du système viaire

II.2.2.1.1 Trame viaire linéaire

Elle se caractérise principalement par un alignement linéaire en raison de sa forme allongée. Elle est définie par l'unicité du chemin reliant un point à un autre. Ceci représente l'un des systèmes les plus contraignants et contrôlables en matière d'organisation urbaine, car il implique une absence de liberté de choix dans les trajets pour se rendre d'un endroit à un autre (figure 5). Cette particularité est amplifiée davantage lorsque le système est configuré en impasse, devenant ainsi un point de passage incontournable pour l'entrée et la sortie (Pinon, 1991 ; Matallah, 2015).

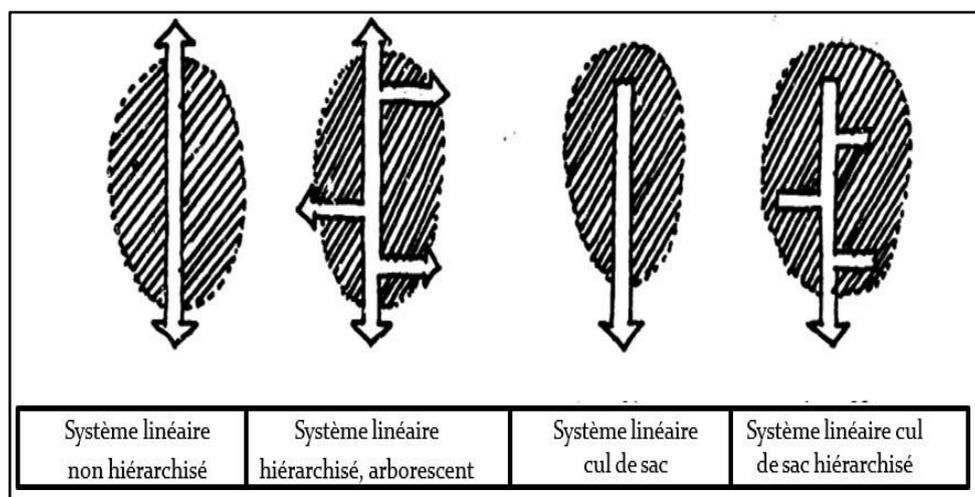


Figure 5 : Différents types de systèmes viaire linéaire

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

II.2.3.2 Trame viaire arborescente

Chaque branche est subordonnée à une entité plus importante, qui à son tour dépend d'un tronc principal (ramification). La structure arborescente du réseau routier implique un principe de hiérarchisation, cette dernière génère des confluences naturelles de circulation dans les branches les plus significatives, qui se caractérisent généralement par des dimensions plus grandes en termes de longueur et de largeur (figure 6) (Pinon, 1991 ; Matallah, 2015).

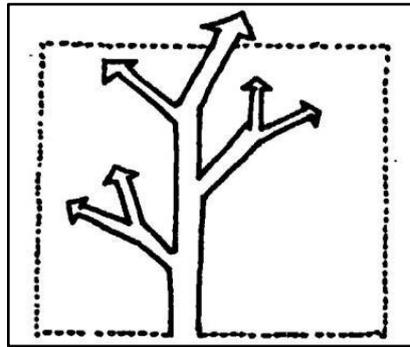


Figure 6 : Le système viaire arborescent

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

II.2.2.1.2 Trame viaire quadrillée

Les rues sont agencées selon une grille orthogonale, cette structure peut donner naissance à des formes simples ou plus complexes en combinant ou en retranchant des unités modulaires définies par la grille. Ainsi, cette structure se distingue par la présence de nombreux chemins reliant différents points, créant ainsi des îlots isolés entourés de rues de similarité presque équivalente. La trame viaire quadrillée est généralement considérée comme étant la moins hiérarchisée (figure 7).

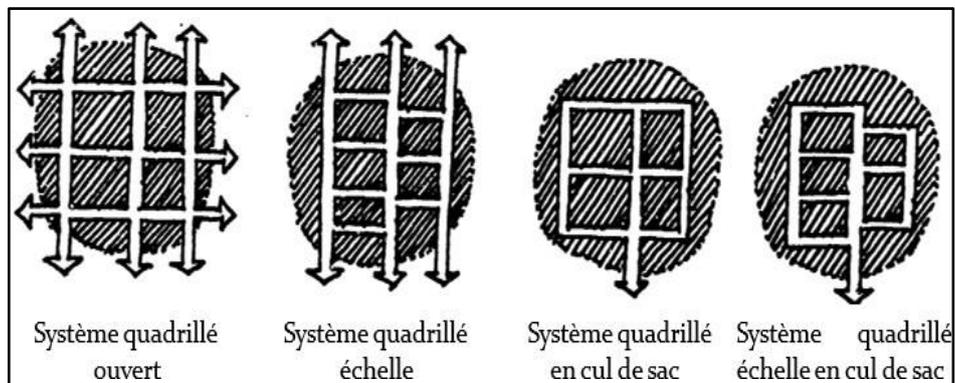


Figure 7 : Différents types de système viaire quadrillé

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

II.2.2.1.3 Trame viaire en boucle

Un espace central entouré par une boucle de rues, cette configuration urbaine se distingue par son design. Il existe deux itinéraires pour se rendre d'un point à un autre.

La configuration en boucle du réseau routier se distingue par la formation d'un type d'îlot particulier, en contraste avec le reste du schéma urbain, du fait de son emplacement à l'intérieur de la boucle (figure 8). Dans ce contexte, il est préférable d'utiliser le terme "noyau" (Pinon, 1991 ; Matallah, 2015).

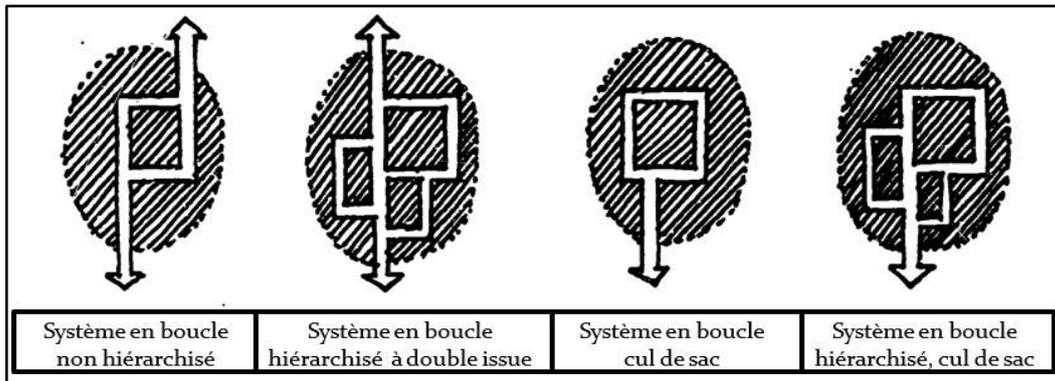


Figure 8 : Différents types de système viaire en boucle

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

II.2.2.2 Morphologie du système bâti

Pour une meilleure compréhension, l'analyse se concentre sur la distribution des bâtiments construits, qui peuvent être regroupés de manière continue ou discontinue, en fonction de leur proximité les uns par rapport aux autres. Le cadre bâti peut être catégorisé en trois niveaux distincts (Pinon, 1991 ; Matallah, 2015).

II.2.2.2.1 Bâti ponctuel (pavillonnaire)

La première catégorie se caractérise par une dispersion des structures urbaines, où les édifices sont espacés les uns des autres par des distances variables, entraînant une discontinuité du tissu bâti (figure 9). D'un point de vue perceptuel, cette configuration ne favorise pas vraiment une vue d'ensemble. Par conséquent, la perception sera morcelée et peu structurée. Ce type de construction ponctuelle est couramment observé dans les quartiers résidentiels modernes, les habitations individuelles, les complexes résidentiels, ainsi que dans certaines cités arabes traditionnelles caractérisées par des maisons-tours, telles que celles du Yémen (Sanaa), qui sont distinctes les unes des autres.

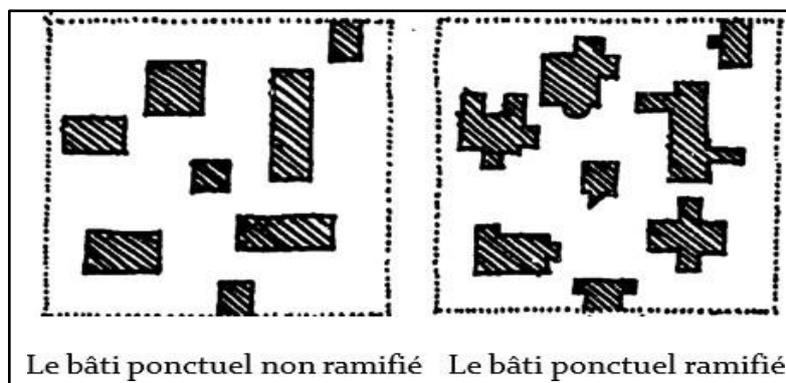


Figure 9 : Différents types de système bâti ponctuel

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

II.2.2.2.2 Bâti linéaire (en rangées)

Ce modèle architectural est agencé de manière contiguë, formant une ligne ininterrompue, assurant ainsi une continuité du tissu bâti dans une direction spatiale unique (figure 10). Cette formule, issue du modèle des maisons charitables, est considérée comme l'archétype du logement économique depuis des temps anciens. Elle a ensuite été formalisée dans le cadre du logement social ouvrier (Panerai et al., 1999). Il est instructif d'examiner les répercussions que ce phénomène peut avoir sur la perception singulière des structures construites en grand nombre. Les bâtiments de ce modèle forment une continuité architecturale qui favorise une appréhension hiérarchisée et graduelle de l'environnement bâti.

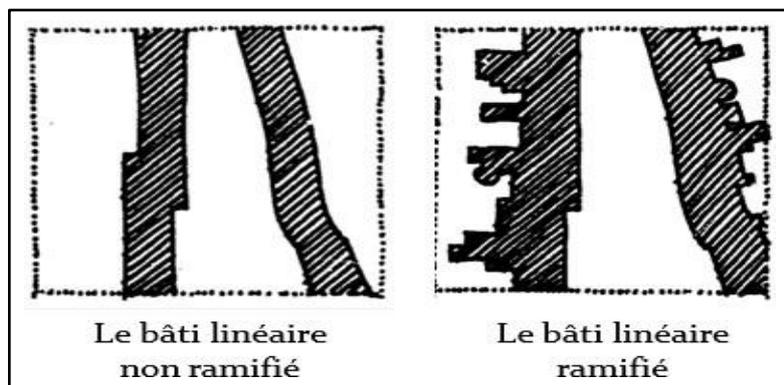


Figure 10 : Différents types de système bâti linéaire

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

II.2.2.2.3 Bâti planaire (massif)

Les bâtiments sont accolés les uns aux autres, formant une masse homogène interrompue uniquement par les rues, ce qui assure une continuité du tissu urbain dans plusieurs directions. En général, cette structure est traversée par des cours centrales qui ne perturbent pas sa continuité (figure 11) (Pinon, 1991 ; Matallah, 2015).

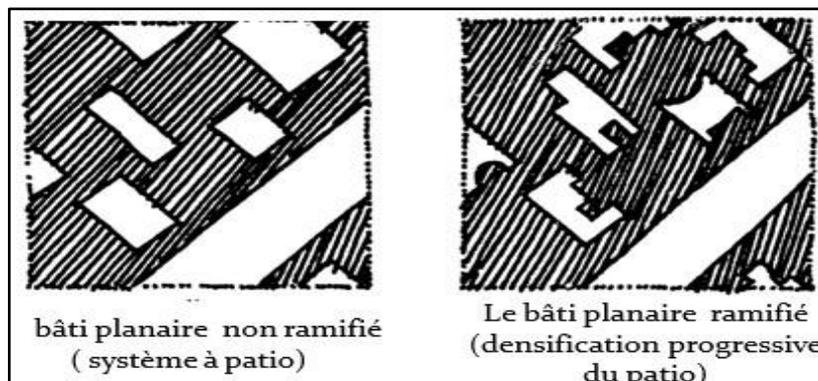


Figure 11 : Différents types de système bâti planaire

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

II.2.2.3 Morphologie du système parcellaire

Le système parcellaire consiste en la division de l'espace territorial en différentes unités foncières appelées parcelles.

II.2.2.3.1 Parcelle trapézoïdale

La forme trapézoïdale est fréquemment obtenue en modifiant la forme rectangulaire pour s'adapter aux courbes de niveau, ce qui peut entraîner un élargissement ou un rétrécissement. Cette déformation peut également résulter de la courbure de la rue. La relation entre le réseau routier et le découpage des parcelles est montrée dans la figure 12.

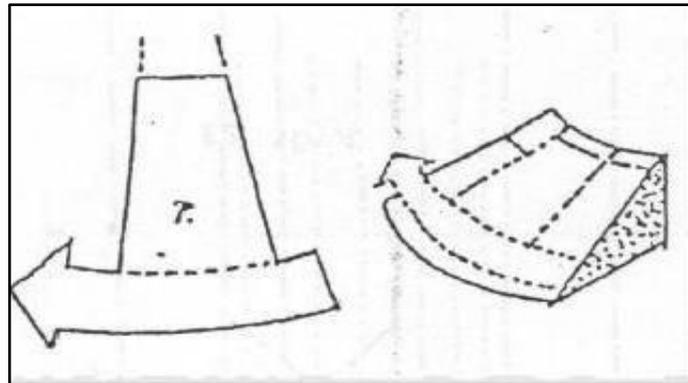


Figure 12 : La parcelle trapézoïdale

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

II.2.2.3.2 Parcelle triangulaire

Lorsqu'une parcelle se trouve à l'intersection de deux rues formant un angle aigu ou en cas de réduction de la trame urbaine, elle prend une forme triangulaire. La séparation géométrique entre la trame parcellaire et la trame routière est illustrée dans la figure 13.

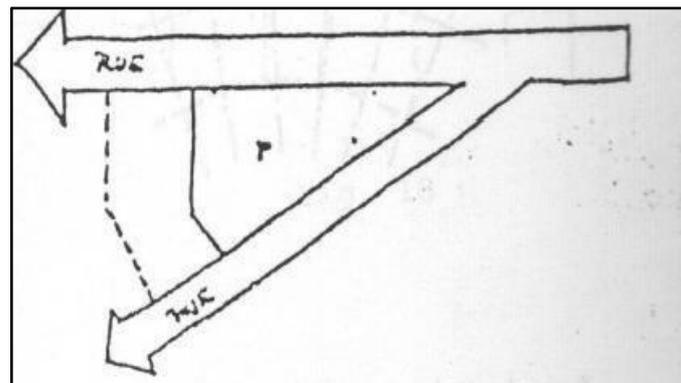


Figure 13 : La parcelle triangulaire

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

II.2.2.3 Parcelle en L ou en T

Il s'agit d'un découpage irrégulier impliquant la soustraction de parties de la parcelle initiale, que ce soit pour des raisons d'héritage ou d'expropriation en vue de l'aménagement d'infrastructures publiques (figure 14).

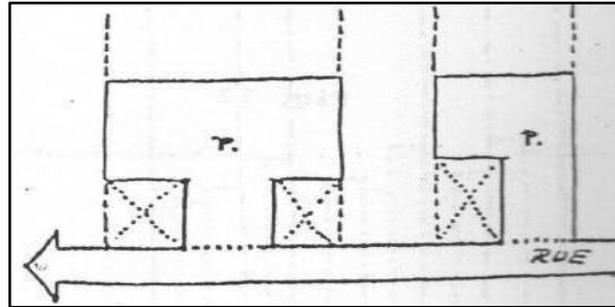


Figure 14 : La parcelle en L ou en T

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

II.2.2.4 Morphologie des espaces libres

Les espaces libres englobe l'ensemble des zones non bâties au sein de la structure urbaine. Cela comprend les espaces publics urbains (rues, places) ainsi que les espaces privés (cours, jardins). Ce système se compose de deux entités différentes :

- **Espaces privatifs extérieurs** : inclus dans les parcelles, tels que les cours intérieures, les jardins et les parcs.
- **Espaces publics vacants** : intégrés au réseau routier, englobant les voies de circulation et des espaces spécifiques comme les places et les carrefours.

Les quatre sous-systèmes interagissent et ne fonctionnent pas de manière complètement autonome (figure 15).

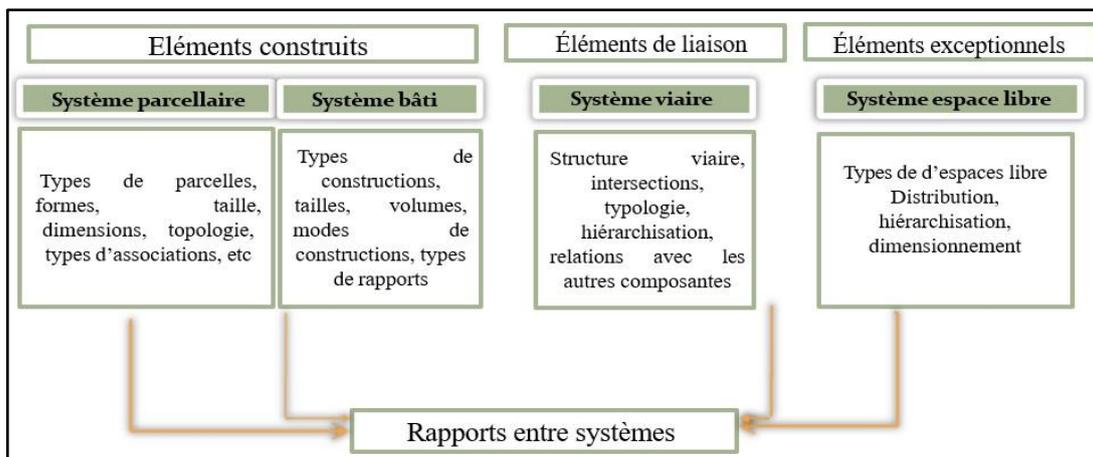


Figure 15 : Identification de quatre sous-systèmes de la forme urbaine

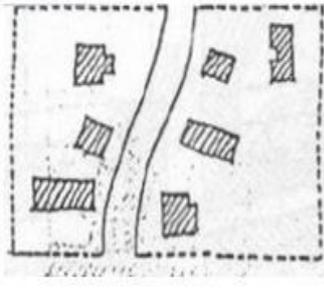
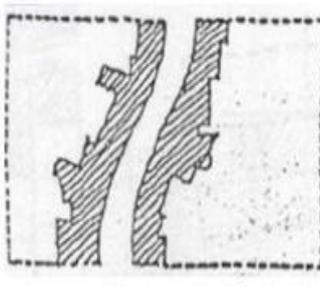
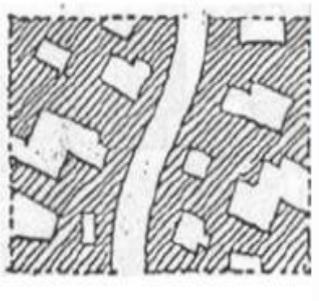
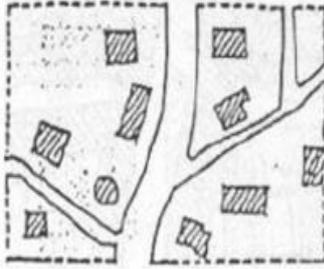
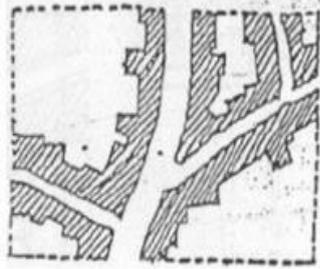
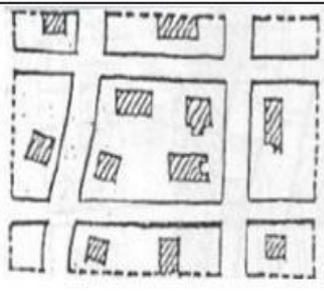
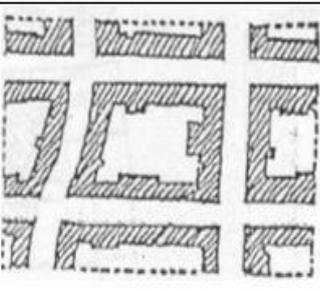
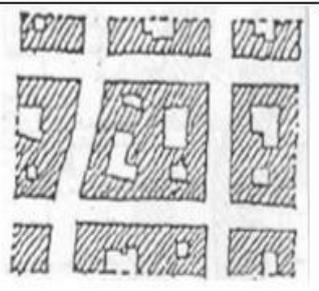
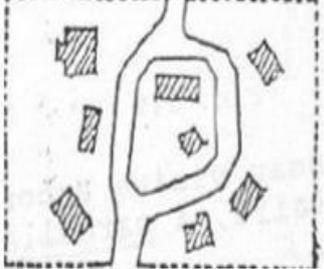
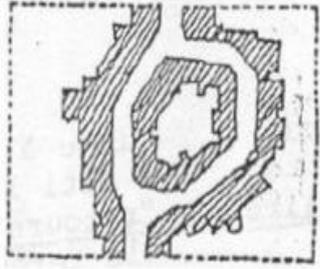
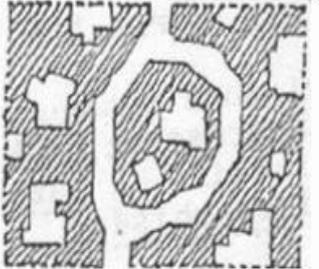
Source : Alain Borie et al., 2006

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

➤ Bâti / Voirie :

En règle générale, le système foncier est distinct du système de propriété foncière. Dans certaines situations, il arrive que des bâtiments surplombent une rue, comme c'est le cas des "Sabas" dans les médinas ou des équipements à cité Ryad.

Tableau 1 : La relation système bâti/système viaire

Système viaire/bâti	Système bâti ponctuel	Système bâti linéaire	Système bâti planaire
Système viaire linéaire			
Système viaire arborescent			
Système viaire quadrillé			
Système viaire en boucle			

Source : Kammou Lhoussaine, 2019

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

II.2.3 Evaluation de la forme urbaine à travers des indicateurs

En littérature, il est possible de distinguer deux catégories d'indicateurs utilisés pour mesurer et évaluer la configuration urbaine :

1. Des indicateurs au niveau du tissu urbain, c'est-à-dire à l'échelle du quartier, comprennent :
 - La densité d'occupation du bâti (D) : elle correspond au rapport entre le volume total des bâtiments d'un quartier et la superficie totale de son terrain, et constitue un indicateur clé pour l'aménagement urbain (Mohajeri et al., 2016 ; Morganti et al., 2017).
 - La rugosité urbaine (Ru) : il s'agit de la moyenne de la hauteur de la canopée urbaine, incluant les structures construites, les éléments végétaux en position verticale et horizontale, ainsi que les espaces non bâtis (Adolphe, 1999).
 - La densité végétale (Dv) : elle constitue un outil pour localiser tous les espaces verts, qu'il s'agisse de parcs publics ou de jardins privés, dans une zone donnée (Kitouni, 2020).
 - La porosité urbaine (Pu) : tel que défini par Adolphe (2001), représente la proportion des espaces ouverts par rapport à l'ensemble des volumes du tissu urbain étudié.
 - La compacité (Cf) : est définie comme le rapport entre la surface de son enveloppe et son volume (Sarralde et al., 2015).
 - Le coefficient d'occupation du sol : il s'agit du ratio entre la surface brute de plancher du bâtiment et la superficie totale du terrain d'un quartier. Cet indicateur est utilisé pour évaluer la densité de construction dans une zone urbaine (Tian & Xu, 2021).
 - La sinuosité : est un terme utilisé pour décrire la qualité d'une ligne ou d'une surface qui présente des courbes ou des méandres.
 - La couverture de site : elle est définie comme le pourcentage de la surface totale construite par rapport à la surface totale (Sun et al., 2016 ; Ahmadian et al., 2019, 2021).
2. Des indicateurs spatiaux à l'échelle publique, notamment à l'échelle micro, (la rue), comprennent :
 - Le prospect : il s'agit du rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments et la largeur de la rue (Poon et al., 2020).
 - Le facteur de vue du ciel (FVC) : est un paramètre important en urbanisme et en architecture selon Tsoka (2011). Tandis que du point de vue climatique, Watson & Johnson (1987) le définissent comme le rapport entre la radiation reçue par une surface plane et celle reçue par la totalité de l'environnement radiatif.
 - L'albédo : est une grandeur mesurant la réflectivité d'une surface, exprimant le rapport entre la lumière solaire réfléchie et la lumière solaire incidente (Agra et al., 2016).

II.3 Synergie entre forme urbaine et énergétique des bâtiments

II.3.1 Forme urbaine vs énergie

Plusieurs recherches ont été réalisées sur la réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments isolés (Labeeuw et al., 2011 ; Lévy et al., 2014 ; Rit et al., 2024). Peu de recherches ont été menées sur l'intégration de la conception urbaine afin de réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂, tout en diminuant la nécessité de recourir à la climatisation dans les zones présentant un climat chaud et aride. D'après Arantes et al. (2013), il est important de souligner que la diminution de la demande en énergie s'avère être une tâche complexe à mettre en œuvre au niveau du quartier, et plus encore à l'échelle du microclimat urbain (échelle intermédiaire).

La corrélation entre les configurations urbaines et la consommation d'énergie demeure largement méconnue, ce qui engendre des discussions au sein des chercheurs, en raison de la complexité morphologique et spatiale des zones urbaines. La première étude de l'incidence urbaine sur la consommation d'énergie a porté principalement sur l'effet de la densité et des infrastructures de transport en analysant la mobilité en milieu urbain. L'étude menée en 1988 par Newman & Kenworthy a mis en évidence une relation inverse suivant une progression logarithmique : à mesure que la densité urbaine augmente, la consommation d'énergie liée au transport diminue, comme indiqué par Arantes et al. (2016).

En réexaminant le débat séculaire entre les partisans de l'urbanisme compact et ceux de l'urbanisme étalé, une discussion qui a été largement documentée au sein de la communauté scientifique depuis la fin du 19^e siècle (Choay, 1965). Bien que la relation entre la densité et l'énergie de déplacement ait fait l'objet de nombreuses études (Massot, 2007), l'analyse énergétique des configurations urbaines reste un domaine relativement récent. De nombreuses études se focalisent sur l'influence de la morphologie urbaine sur l'efficacité énergétique des constructions dans le cadre de la morphogénèse durable des agglomérations.

Dans des recherches réalisées par Baker & Steemers (2000), ainsi que Carlo Ratti (2005), ont mis en évidence que les caractéristiques de la morphologie urbaine peuvent entraîner une diminution de 50 % de la consommation énergétique dans une zone urbaine (Baker, 2000 ; Ratti, 2005). Plusieurs recherches ont été menées pour élaborer des modèles énergétiques simplifiés dans le but d'analyser et d'évaluer les relations entre la structure urbaine et la consommation d'énergie (Ratti, 2000, 2005). L'étude menée par L O'Brien et al. (2010) a exploré la relation entre la densité et la consommation des formes urbaines à l'échelle du quartier, en analysant trois quartiers de Toronto caractérisés par des densités de population différentes. Cette étude souligne que la consommation énergétique des bâtiments suit une trajectoire comparable à celle de la consommation énergétique associée au transport des ménages.

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

Par ailleurs, en termes d'efficacité énergétique globale, les quartiers présentant des densités intermédiaires se démarquent grâce à leur bilan énergétique net positif. Dans les régions peu peuplées, les habitations et les déplacements nécessitent une quantité d'énergie trop importante pour être entièrement satisfaits par cette production. En ce qui concerne les formes à haute densité, elles se distinguent par des niveaux de consommation plus bas, cependant leur capacité de production n'est pas suffisamment élevée pour les compenser (O'Brien, 2010).

II.3.2 Analyse comparative des niveaux de consommation énergétique associé aux divers types de formes urbaines archétypales

D'après la recherche réalisée par Arantes et al. (2013) portant sur l'efficacité énergétique des différentes morphologies urbaines afin de déterminer la configuration urbaine la plus appropriée pour l'installation de panneaux photovoltaïques et pour identifier la forme la plus avantageuse en matière de captation d'énergie solaire. Les bâtiments présentent des formes géométriques simples, principalement des parallélépipèdes, et sont agencés à une densité de 75 logements par hectare. La figure 06 présente les six configurations étudiées.

- Un bâtiment de vingt-cinq étages, des résidences individuelles d'un ou deux étages et une maison individuelle de plain-pied en rangée.
- Le concept de gradins aérés linéaires suit le même principe que celui évoqué précédemment, mais en tenant compte de bâtiments de taille plus modeste.
- Le modeste complexe architectural se compose de sept édifices d'une hauteur s'échelonnant de trois à cinq étages.

L'emploi du logiciel Matlab a simplifié l'évaluation de l'efficacité énergétique de ces six configurations. Les caractéristiques énergétiques des zones urbaines peuvent être étudiées en effectuant une analyse du bilan énergétique global des bâtiments, en considérant trois paramètres :

- La surface.
- Le nombre d'étages.
- L'orientation.

Les dimensions et les matériaux du bâtiment considéré comme "représentatif" sont définis en se basant sur des hypothèses et des scénarios conformes aux normes de construction en vigueur.

L'édifice est composé de murs de refend et de dalles en béton armé, tandis que son enveloppe est légère et construite en ossature bois. Le bâtiment est pourvu de panneaux solaires thermiques en façade afin de satisfaire un tiers des besoins annuels en eau chaude sanitaire, ainsi que de panneaux photovoltaïques installés sur le toit.

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

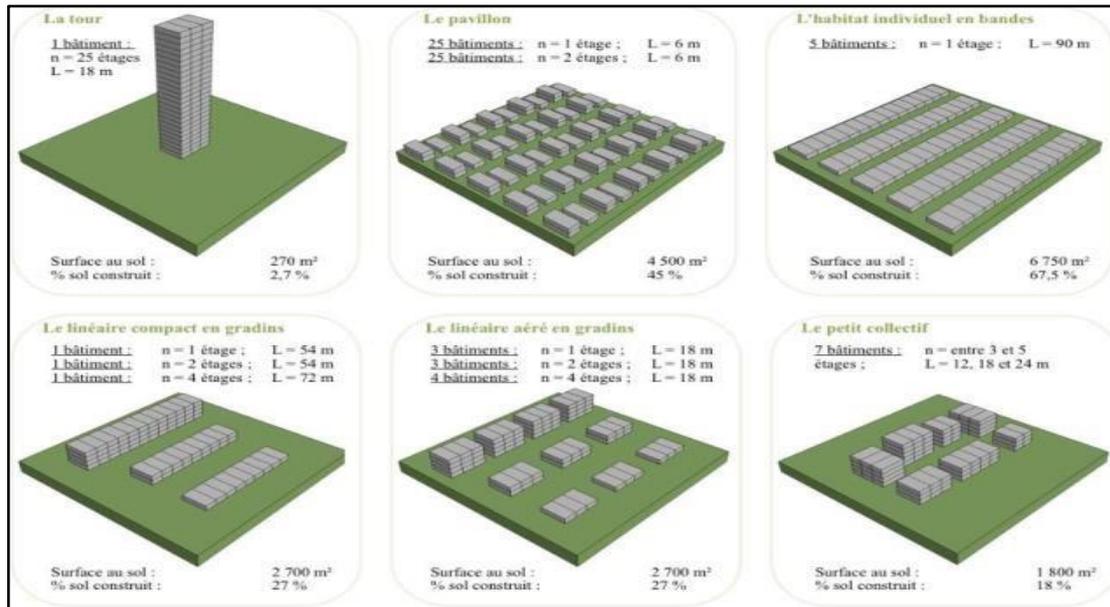


Figure 16 : Les six configurations urbaines analysées et leurs dimensions

Source : Arantes et al., 2013

La figure 17 ci-dessous présente une comparaison des bilans énergétiques annuels de six formes urbaines analysées. En résulte que le bilan énergétique est désavantageux, car les capacités de production solaire en activité ne parviennent pas à contrebalancer les besoins énergétiques des quartiers (Arantes et al., 2013).

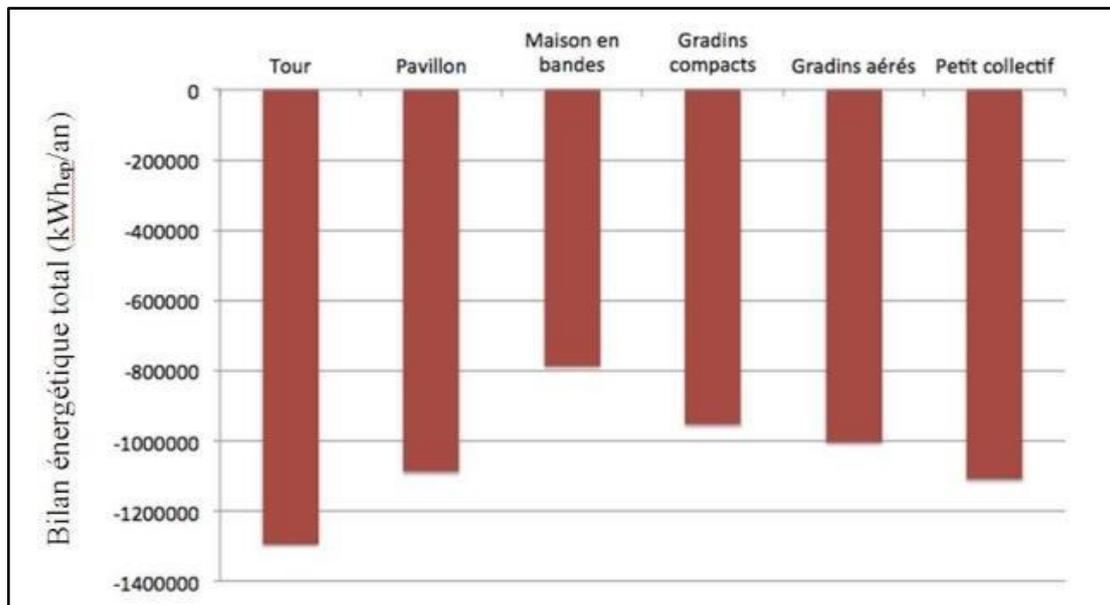


Figure 17 : Comparaison entre les six configurations urbaines étudiées selon leur performance énergétique

Source : Arantes et al., 2013.

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

D'après [Arantes et al. \(2013\)](#), les conclusions de l'analyse suggèrent que le logement en rangée est le plus performant. Cette disposition urbaine présente une consommation réduite et démontre un bilan énergétique plus élevé. Ceci peut être partiellement attribué au potentiel de production d'énergie solaire offert par la surface des toitures des maisons mitoyennes.

Comparativement aux autres configurations qui sont impactées par l'ombrage et entraînent une consommation accrue d'énergie, la tour d'habitation se distingue en tant que la plus énergivore, présentant une efficacité inférieure de 1,6 fois par rapport aux maisons en bande.

II.3.3 Etat actuel de la situation énergétique

En se basant sur le dernier Bilan Énergétique National de l'Algérie (2018, édition 2019), publié par le Ministère de l'Énergie, un résumé des données globales est élaboré pour mettre en lumière les opportunités susceptibles de favoriser une transition énergétique avantageuse (tableau 2). Le premier constat est que les hydrocarbures demeurent de loin la composante prédominante des ressources énergétiques primaires de l'Algérie, tandis que les sources renouvelables (hydraulique, solaire, biomasse, etc.) représentent à peine 0,1 % (tableau 2).

En outre, en 2014, il a été communiqué que les centrales hydroélectriques responsables de la production principale d'électricité seraient probablement désactivées, et que la gestion des réservoirs d'eau, précédemment assurée par Sonelgaz, serait transférée à l'Agence Nationale des Barrages (ANB).

Tableau 2 : Production des énergies primaires en Algérie pour les années 2017-2018

Produit	Unités	2017	2018
Gaz et Pétrole (ressources fossiles)	Ktep	165 701	165 031
Electricité primaire (Hydraulique + solaire)	Ktep	150	188
	GWh	635	783
Combustibles solides : bois...	Ktep	10	22
	GWh	53	113
Total	Ktep	165 861	165 241

Source : CEREFÉ, 2020

Concernant l'utilisation des ressources disponibles (165 MTep), 61 % des capacités sont réservées à l'exportation, tandis que le reste est destiné à la consommation interne, soit 65,7 MTep (tableau 3) ([CEREFÉ, 2020](#))¹. À ce stade, il était possible de proposer un premier objectif à réaliser en matière de transition énergétique, consistant à planifier, selon un calendrier réaliste, la transformation en produits raffinés d'une portion des ressources primaires destinées à l'exportation sous forme brute.

¹ CEREFÉ : Commissariat aux Énergies Renouvelables et à l'Efficacité Énergétique (Algérie)

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

Cette perspective est effectivement pertinente, compte tenu de l'importante incertitude que prévaut sur le marché international de l'énergie. Dans cette perspective, il est manifeste qu'un développement local d'une industrie pétrochimique efficace, dont les produits finis sont compétitifs et disposent de débouchés concrets sur le marché international, constituerait l'alternative optimale. Cette reconversion assure non seulement des revenus plus stables pour le pays, mais encourage également une croissance significative de l'activité économique locale, créant ainsi des emplois.

Tableau 3 : Récapitulatif des flux énergétiques pour l'année 2018

Energie disponible (MTep)		Exportation (MTep)	Approvisionnement interne (MTep)
Production	165	100,8	65,7
Importation	1,5		
Total	166,5		

Source : CEREFÉ, 2020

II.3.3.1 Consommation interne et transition énergétique

L'exportation des ressources énergétiques étant soumise aux fluctuations du marché international, toute transition dans ce domaine n'a de pertinence stratégique pour un pays que si elle est principalement conçue pour satisfaire en priorité les besoins locaux, fondée sur des prévisions fiables à moyen et long terme. Dans cette perspective, le dernier rapport sur la consommation intérieure (tableau 4) peut constituer une base d'analyse fiable. En ce qui concerne la consommation finale par secteur, les ménages occupent la première position avec 22,4 Mtep (46 %), suivis principalement par les transports (32 %), l'industrie et le BTP (22 %). Cela permet d'établir les priorités concernant les premières directives à adopter en matière de transition énergétique. Il est pertinent de se concentrer directement sur les principaux consommateurs, tels que les ménages et les transports, afin d'identifier des actions appropriées qui ciblent la source du problème et qui sont donc susceptibles d'être efficaces.

Dans ce contexte, une seconde phase de perfectionnement est instaurée à partir des sources d'énergie à forte consommation, afin d'examiner l'ensemble des solutions de substitution avantageuses. Dans ce contexte, les produits énergétiques gazeux dominent avec 18,6 MTep (39 %), suivis par les produits liquides (32 %) et, en dernier lieu, l'électricité (29 %). Un troisième et ultime argument pour limiter les actions aux options réalistes et à fort impact sur la transition énergétique souhaitée serait d'exclure, au moins temporairement, les secteurs d'activité où la consommation énergétique semble peu réductible pour diverses raisons. Ce phénomène se manifeste particulièrement dans l'industrie énergétique, qui affiche une consommation propre (processus, fonctionnement, pertes, etc.) totalisant 11,8 MTep, à laquelle s'ajoute celle consacrée aux usages non énergétiques (5 MTep) (tableau 4).

Chapitre 02 : Design urbain éléments de conceptualisation

Tableau 4 : Consommation des énergies en Algérie pour l'année 2018

Consommation finale par secteur (MTep)	Industrie et BTP	10,5	48,2
	Transport	15,3	
	Ménages et autres	22,4	
Consommation finale par produit (MTep)	Produits gazeux	18,6	/
	Produits liquides	15,5	
	Electricité	13,9	
	Produits solides	0,1	
Autres consommations (MTep)	Industries énergétiques	11,8	16,8
	Usage non énergétique	5,0	
Total (MTep)	Consommation énergétique nationale		65

Source : CEREF, 2020

II.3.4 Energétique du bâtiment

II.3.4.1 Secteur du bâtiment est un gros consommateur d'énergie

Le bâtiment est classé comme un secteur à forte consommation énergétique, ce qui entraîne une contribution significative à la pollution (Morel & Gnansounou, 2008). Cette énergie est destinée à diverses applications, notamment le chauffage et/ou le refroidissement, pour assurer un climat intérieur confortable, ainsi que la circulation de fluides tels que l'air (ventilation) et l'eau (eau chaude, chauffage), les systèmes de transport (ascenseurs), l'éclairage et les moyens de communication (téléphone, radio, télévision) et la production des biens (industries, cuisines, etc.)

Dans les climats tempérés et froids, la plupart de l'énergie utilisée par un bâtiment est consacrée au chauffage. La chaleur générée par le système de chauffage s'échappe inévitablement vers l'extérieur via divers moyens, directs ou indirects. Dans les climats plus chauds, il peut être nécessaire, et en tout cas agréable, de diminuer la température intérieure des bâtiments. Ce refroidissement, ainsi que la déshydratation de l'air, peuvent également représenter un consommateur d'énergie significatif.

II.3.4.2 Secteur du bâtiment devrait être confortable

Un bâtiment bien conçu et construit peut offrir un confort nettement supérieur (figure 18). Un tel édifice ne subit que peu ou pas de surchauffe estivale et tire parti des gains solaires durant les périodes froides, réduisant ainsi la durée de la saison de chauffage (Morel & Gnansounou, 2008).

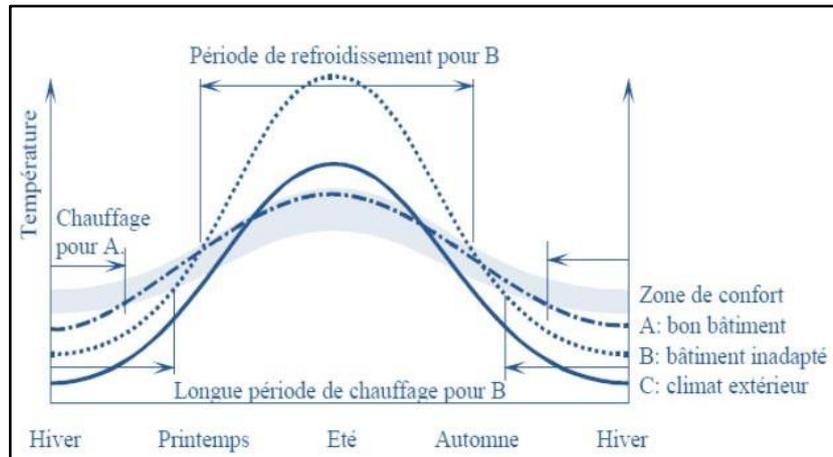


Figure 18 : Progression des températures intérieures, sans prendre en compte des installations de chauffage ou de climatisation

Source : Morel & Gnansounou, 2008

La zone hachurée illustre les critères de confort. La variable C désigne la température extérieure, tandis que A représente un édifice conçu de manière adéquate et B un édifice inadapté à son environnement climatique. Un édifice mal adapté à son environnement climatique a la particularité de connaître des problèmes de surchauffe durant les périodes chaudes et de présenter une sensation de froid intense durant les périodes froides.

II.3.4.3 Applications de l'énergétique dans le domaine du bâtiment

Afin de restreindre la consommation énergétique à des niveaux acceptables, il est impératif d'identifier les domaines d'intervention prioritaires.

- Il est essentiel de prendre en considération tous les critères pertinents lors de la sélection des stratégies à envisager pour la rénovation ou la construction d'un ensemble immobilier.
- Parmi les critères à prendre en considération figurent non seulement le coût, l'esthétique ou l'habitabilité, mais également la consommation d'énergie.
- Il est essentiel de dimensionner de manière adéquate les installations énergétiques en effectuant le calcul de la puissance de pointe requise au minimum.
- Anticiper la consommation annuelle et la réduire au minimum en optant pour l'option la plus économique dans son ensemble, tout en prenant en considération le confort et les contraintes architecturales.

Les solutions apportées à cette problématique spécifique peuvent engendrer des répercussions dans d'autres domaines et influencer les différentes caractéristiques du bâtiment (Morel & Gnansounou, 2008).

II.3.5 Impact de la forme urbaine sur la production énergétique

Les deux stratégies principales pour la transition énergétique en milieu urbain sont la diminution de la consommation d'énergie urbaine et l'intégration des énergies plus propres. Ces objectifs peuvent être partiellement réalisés en améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments par le biais d'une refonte significative des systèmes d'infrastructure (Morvaj et al., 2017) et en intégrant les énergies renouvelables dans le cadre bâti grâce à des progrès techniques (Wu et al., 2017). Les deux stratégies, revêtent une importance cruciale pour la transition vers un avenir durable au sein des zones urbaines. De manière plus précise, ces stratégies ont la capacité d'assister les municipalités à satisfaire divers besoins en termes de durabilité, tant dans leur contexte présent que dans leur évolution à venir.

En outre, la politique énergétique mondiale a pour objectif de progressivement éliminer l'utilisation de l'énergie nucléaire d'ici 2035, avec une réduction potentielle des émissions de CO₂ de 50 à 80 % d'ici 2050. Ces objectifs ne peuvent être réalisés qu'à travers une augmentation significative de la production d'énergie renouvelable. Une approche pour atteindre cet objectif consiste à accroître la production locale d'énergie renouvelable dans les zones urbaines et rurales, en parallèle avec des initiatives visant à optimiser l'efficacité énergétique, et à renforcer les infrastructures de réseau et de stockage.

Un nouveau sujet de recherche émerge rapidement, porte sur les réseaux énergétiques décentralisés qui intègrent les systèmes énergétiques renouvelable afin de produire l'électricité et de la chaleur. Parmi celles-ci figurent la modélisation et l'optimisation des systèmes d'énergie renouvelable autonomes, des systèmes hybrides d'énergie renouvelable (Kanase-Patil et al., 2010) ainsi que des systèmes énergétiques décentralisés (Ng et al., 2011). L'organisation spatiale des zones urbaines affecte de manière significative la capacité de production d'énergie photovoltaïque des bâtiments et l'intégration des technologies renouvelables en générale (Mohajeri et al., 2019). Par exemple, la densité urbaine influence la capacité d'intégration du photovoltaïque sur les façades et les toits en matière de production d'électricité, en raison des contraintes d'ombrage et de disponibilité d'espace (Evins, 2013).

Il est constaté que l'augmentation de la compacité conduit à une réduction du rayonnement solaire annuel total pour les façades et les toits des bâtiments, diminuant de 816 à 591 kWh/m². La transition de quartiers dispersés à des quartiers compacts réduit le potentiel solaire photovoltaïque des façades de 20 % à 3 %, et celui des toits de 94 % à 79 %, en pourcentage de la surface totale. Par conséquent, le potentiel solaire des toits est moins influencé par la compacité que celui des façades (Evins, 2013). En outre, l'implantation des systèmes photovoltaïques sur les toits des bâtiments peut représenter une solution pour répondre à la demande croissante en énergie renouvelable dans les zones urbaines denses, en tenant compte des contraintes liées à l'utilisation du sol (Gong et al., 2016). L'énergie éolienne offre des possibilités de production d'énergie renouvelable tant en milieu rural qu'urbain, comme l'indiquent Afram et al. (2017).

CONCLUSION

La morphologie urbaine qui permettra d'analyse de la ville, s'appuie sur l'examen de l'évolution de la forme urbaine en corrélation avec les transformations sociales, économiques, ainsi que les conditions thermiques et climatiques. Nous allons nous pencher sur la morphologie environnementale, qui étudie la configuration urbaine en tenant compte de l'environnement, afin d'analyser l'influence de cette configuration sur la consommation d'énergie. Il est bien établi depuis de nombreuses années que la consommation d'énergie dans le domaine résidentiel constitue une part significative de la demande énergétique mondiale, évaluée à environ 40 %, ce qui conduit à une augmentation des émissions de CO₂. Ces émissions proviennent également d'autres secteurs tels que les transports et l'industrie. Des recherches ont démontré que la configuration urbaine, notamment au niveau micro-urbain, peut jouer un rôle crucial dans la diminution de la consommation d'énergie nécessaire pour le refroidissement des bâtiments.

Ce chapitre a abordé l'interaction entre le cadre bâti et son environnement, en mettant l'accent sur la corrélation entre la forme urbaine et la consommation énergétique en milieu urbain. De plus, nous avons identifié les principaux éléments influençant la demande énergétique des constructions, dans le but d'optimiser leur efficacité énergétique et d'exploiter le potentiel de production énergétique en intégrant des sources d'énergie renouvelable dans le tissu urbain grâce à des avancées technologiques. Cette section met en évidence l'impact significatif de la forme urbaine sur l'intégration des technologies renouvelables, qu'il s'agisse d'un système unique ou hybride. Ainsi, il sera nécessaire d'intervenir sur les caractéristiques morphologiques au niveau urbain afin de contrôler la performance énergétique. Sur cette base, le chapitre suivant fournira une revue des recherches les plus influentes dans ce domaine, en mettant en lumière les méthodes de quantification énergétique visant à garantir une intégration plus efficace des systèmes énergétiques hybrides en milieu urbain, et par conséquent, une production énergétique optimale.

Chapitre 3,

Etat De L'art Sur L'optimisation

Morpho Energétique En Milieu Urbain

INTRODUCTION

La configuration urbaine influence l'irradiation solaire reçue par les bâtiments, ainsi que le microclimat et la circulation de l'air à leur proximité. La compacité, la densité des constructions et leur agencement jouent un rôle crucial sur l'accès à la lumière solaire dans les espaces intérieurs et extérieurs.

Ce chapitre commence par une analyse des recherches existantes concernant les indicateurs de la forme urbaine qui affectent le potentiel solaire en milieu urbain. Cette analyse a pour objectif d'identifier les indicateurs qui sont les plus pertinents pour notre étude.

Enfin, nous établirons un ensemble de méthodes et d'outils pour évaluer la disponibilité de l'énergie solaire en milieu urbain, afin d'éclairer les décisions en matière d'urbanisme. Cela nous aidera à identifier les approches les plus efficaces pour élaborer notre cadre méthodologique et à choisir la méthode la mieux adaptée à notre sujet d'étude.

III.1 Indicateurs morpho énergétiques dans la littérature scientifique

III.1.1 Contexte

Au cours des dernières décennies, plusieurs études ont analysé l'impact de l'environnement urbain sur la capacité de production d'énergie en intégrant des panneaux photovoltaïques (PV) sur les façades (Lee et al., 2016). Ces résultats ont été complétés par d'autres recherches qui ont examiné de manière approfondie l'efficacité des indicateurs agrégés de la configuration urbaine, en particulier pour évaluer la disponibilité de l'ensoleillement au niveau du quartier. La morphologie urbaine se caractérise par la configuration et les dimensions particulières de l'espace bâti, ainsi que par l'étude de ses agencements physiques à diverses échelles. D'après Robinson et al. (2009), Wong et al. (2011) ainsi que Bonhomme (2013), qui ont été établi que le quartier et le bloc représentent les échelles les plus appropriées pour analyser l'influence énergétique des bâtiments locaux. Cependant, des études récentes se sont penchées sur l'évaluation de l'influence de la densité et de la planification urbaine sur la capacité de production d'énergie renouvelable, notamment l'énergie solaire (Lee et al., 2016 ; Ahmadian et al., 2021). Néanmoins, il demeure complexe de déterminer une approche exhaustive et impartiale permettant d'évaluer de manière précise l'influence de différentes variables de la forme urbaine sur le potentiel d'énergie solaire dans un contexte tropical (Takebayashi et al., 2015 ; Li et al., 2015).

Le soleil offre une opportunité significative pour l'intégration de l'énergie renouvelable dans les zones tropicales, que ce soit à travers l'utilisation de la lumière naturelle en intérieur, de l'énergie solaire thermique ou de l'énergie solaire électrique (KH Poon et al., 2014). Cependant, dans ces régions exposées au soleil, les réflexions solaires sur la façade du bâtiment peuvent également créer des situations de confort thermique intérieur très inconfortables, ce qui peut conduire à une augmentation de la consommation d'électricité pour la climatisation des espaces (Michels et al., 2008). Malgré le fait que l'urbanisation croissante soit généralement associée à des économies d'énergie potentielles, il est important de noter que les structures architecturales à haute densité et de grande hauteur peuvent être confrontées au "paradoxe de la surface" (Arantes et al., 2014). Néanmoins, de façon paradoxale, l'expansion urbaine peut également générer une augmentation des entraves à la lumière naturelle, à la ventilation naturelle et au déploiement des énergies renouvelables. La configuration spatiale des zones urbaines, comprenant des éléments tels que les bâtiments générant des ombres et une orientation inadéquate des surfaces, est un facteur déterminant du potentiel d'énergie solaire, comme souligné Zomer et al. (2013). En raison de l'importance significative de l'impact de la densification urbaine sur le bilan d'irradiation solaire des surfaces des bâtiments, il est crucial d'évaluer précisément cet impact en prenant en compte les principaux paramètres morphologiques et climatiques. Au cours des dernières décennies, l'analyse de la relation entre l'urbanisme et l'efficacité énergétique a attiré une attention considérable dans la littérature scientifique (Agra et al., 2016 ; Morganti et al., 2017 ; Zhang et al., 2019 ; Bahgat et al., 2020 ; Poon, 2020 ; R. Zhu et al., 2020 ; Ahmadian et al., 2021 ; Shi et al., 2021 ; Xu et al., 2021).

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

Cependant, la plupart de ces études se concentrent sur les villes européennes (IEA, 2018). Dans le cadre d'un projet de logement au Royaume-Uni, des chercheurs ont étudié le potentiel de l'énergie photovoltaïque et du stockage d'énergie. Il a été prouvé que, avec une dimension adéquate, le déploiement de systèmes photovoltaïques et de stockage peut réduire de 31 % la consommation d'électricité des foyers en janvier, tout en contribuant à l'alimentation du réseau en juillet (Gil et al., 2021). D'après les recherches de Lau et al. (2017), Mahaya et al. (2017) ainsi que Bensehla et al. (2021), il existe un manque d'études portant sur l'influence du cadre bâti résidentiel sur l'efficacité énergétique solaire en Afrique, notamment dans les régions au climat semi-aride. La morphologie des quartiers résidentiels a un impact significatif sur le potentiel solaire et la consommation énergétique des bâtiments, comme l'ont souligné Bellini et al. (2017) ainsi que Xia & Li (2021). Certaines recherches ont porté sur l'analyse de l'influence d'une seule caractéristique particulière, à savoir :

- La hauteur idéale des immeubles résidentiels (Seong et al., 2011).
- La typologie des blocs résidentiels a été étudiée par Natanian & Wortmann (2021), Tian & Xu (2021) et Xia & Li (2021).
- L'orientation (Morrissey et al., 2011).
- La densité et la compacité ont été abordées par Samuelson et al. (2016) et Mendis et al. (2020).
- La forme des toits a été étudiée par Ayoub & Elseragy (2018), Elnokaly et al. (2019), Lopez-ruiz et al. (2020) et Kaji et al. (2021).
- Les surfaces urbaines et l'imperméabilisation des sols sont abordées par Fokaides et al. (2016) ainsi que par Croce & Vettorato (2021).

III.1.2 Etat de l'art sur le rapport entre l'énergie et les paramètres typo-morphologiques

Dans la suite de notre étude, nous allons examiner les paramètres typo-morphologiques les plus couramment utilisés dans la littérature scientifique afin d'identifier ceux qui conviennent le mieux à notre recherche. Ainsi, l'analyse des études précédentes réalisée à l'aide de la Plateforme IA connected Papers nous a permis d'identifier les recherches pertinentes associées aux mots-clés suivants : Urban form, Hybrid solar panel, Photovoltaic energy, Solar thermal energy, Urban building energy modeling ². D'après les résultats, les études les plus citées portant sur la relation entre l'énergie solaire et les caractéristiques de la forme urbaine étaient principalement des simulations comprenant des analyses paramétriques, des analyses de sensibilité utilisant des méthodes statistiques, ainsi que quelques essais d'optimisation par le biais d'algorithmes informatiques.

² La recherche par mot clé a été effectuée en Anglais compte tenu de l'abondance des recherches en langue Anglaise

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

Les études les plus référencées dans ce domaine sont exposées dans le tableau 5, mettant en lumière les caractéristiques de la forme urbaine examinées dans chacune d'elles.

Tableau 5 : Les études pertinentes portant sur la relation entre l'énergie solaire et les indicateurs de la forme urbaine³

Classement	Publication	Citation	Paramètres étudiés
1	Sarralde et al., 2015	280	Couverture de site Rapport d'espace ouvert Rapport surface/périmètre Compacité Couverture du toit photovoltaïque Rapport entre le toit et le coefficient d'occupation du sol Rapport de la surface du toit à l'enveloppe Enveloppe moyenne pondérée par zone Facteur de vue de ciel
2	Mohajeri et al., 2016	255	Divers indicateurs de compacité
3	Zhang et al., 2019	190	Profondeur des bâtiments Rapport d'espaces ouverts Couverture de site Coefficient d'occupation du sol Compacité Rapport entre le toit et la surface de plancher Rapport entre la surface du toit et celle de l'enveloppe Couverture des toits photovoltaïques
4	Andreou, 2014	154	Densité urbaine Rapport hauteur/largeur des rues Orientation des rues
5	Li et al., 2015	131	Rapport hauteur/largeur du bâtiment Azimut Couverture de site

³ Le classement est effectué à l'aide d'un outil IA (intelligence artificielle) Connected Papers

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

6	Martins et al., 2016	110	Rapport de surface du plancher Rapport d'aspect Rapport de parcelle, Distance entre les bâtiments Albédo
7	Morganti et al., 2017	103	Indice d'espace brut Indice d'espace au sol Rapport entre la façade et le site Hauteur moyenne des bâtiments Rapport entre le volume et la surface Rapport entre l'aspect des bâtiments Facteur ciel des façades des bâtiments
8	Mohajeri et al., 2019	83	Rapport d'aspect Facteur de vue de ciel Largeur, longueur et orientations des rues
9	Takebayashi et al., 2015	73	Rapport de couverture de bâtiments Indicateur de caractéristiques de la rue
10	Lobaccaro et al., 2019	67	Typologie des bâtiments Orientation des façades et des toits Morphologie Rapport H/L Hauteur des structures
11	Zhu et al., 2020	65	Hauteurs des constructions Facteur de vue de ciel
12	Chatzipoulka et al., 2018	63	Facteur de vue de ciel
13	Mohajeri et al., 2019	58	Rapport d'aspect Orientations Largeur et longueur de rues Facteur de vue de ciel

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

14	Ahmadian et al., 2021	57	Densité Couverture de site Rapport des parcelles
15	Lee et al., 2016	54	Typologie Densité Rapport de surface du plancher Nombre d'étages
16	Poon et al., 2020	50	(10 paramètres morphologiques examinés) Facteur d'extension du ciel et facteur de vue de ciel ont la plus forte corrélation avec l'irradiance du toit et de la façade du bâtiment Indicateurs de performance d'exposition au ciel, rapport H/L
17	Mendis et al., 2020	40	Divers indicateurs de densité et compacité urbaine
18	Martins et al., 2019	36	Le rapport hauteur/largeur de la cour L'écart type de la hauteur construite
19	Xu et al., 2021	35	Densité de construction Rapport d'espace ouvert Coefficient de forme Rapport périmètre-surface moyen Coefficient d'occupation du sol Nombre moyen d'étages Facteur de vue du ciel
20	Bianchi et al., 2020	10	Hauteur moyenne du bâtiment Ecart type de la hauteur du bâtiment

Source : Auteur, 2024

Le graphe ci-dessous (figure 19) est obtenu à l'aide de l'outil IA Connected Paper. Ce dernier, est un outil visuel destiné à aider les chercheurs et les scientifiques appliqués à trouver des articles académiques en rapport avec leur domaine de travail.

Nous pouvons utiliser cet outil pour :

- Obtenir un aperçu visuel d'un nouveau domaine académique.

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

- Créer une bibliographie pour la thèse.
- Découvrir les travaux antérieurs et dérivés les plus pertinents.
- Explorez simplement l'espace papier.

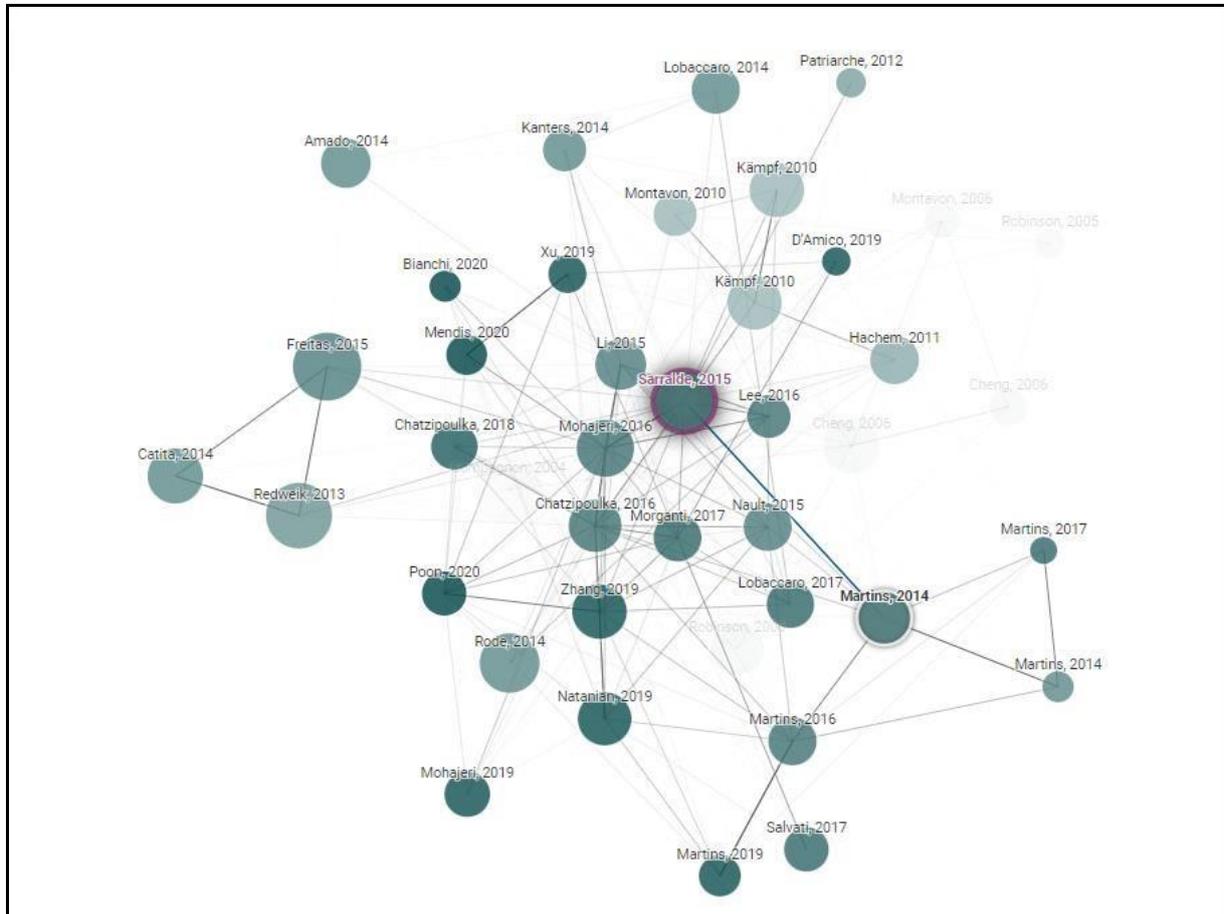


Figure 19 : Les recherches les plus citées qui traitent la corrélation entre l'énergie solaire et les indicateurs de la forme urbaine

Source : génère par Connected Papers.com

III.1.2.1 Analyse multicritère de l'influence de la forme urbaine sur le potentiel solaire

Analyse multicritère de l'incidence de la configuration urbaine sur le potentiel d'énergie solaire

Il existe une controverse permanente parmi les universitaires et les praticiens de l'urbanisme et de l'architecture concernant les relations entre la morphologie urbaine et la durabilité environnementale. L'objectif principal de cette étude est d'analyser si la configuration urbaine des villes et des quartiers est corrélée à leur performance énergétique, en particulier en ce qui concerne l'efficacité énergétique des bâtiments. Diverses recherches se focalisent sur l'analyse multicritère de la relation entre la forme urbaine et le potentiel solaire.

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

On peut citer la recherche de [Sarralde et al. \(2015\)](#) comme étude la plus pertinente dans ce sujet. Son article est intitulé « Énergie solaire et morphologie urbaine : scénarios pour augmenter le potentiel d'énergie renouvelable des quartiers de Londres », il est cité 280 fois depuis son apparition en 2015.

Les nouvelles variables de la configuration urbaine qu'il a identifiées ont renforcé son importance. D'après la nouvelle méthodologie, les variables liées à la configuration urbaine sont prises en compte dans des scénarios à l'aide de deux modèles permettant de prédire l'exposition au rayonnement solaire des toits et des façades. Cette étude adopte une approche méthodologique qui implique une analyse statistique des modèles urbains au niveau du quartier.

L'objectif est d'examiner les relations entre les caractéristiques agrégées de la forme urbaine et le potentiel de génération d'énergie solaire dans l'environnement urbain.

Sélectionner diverses formes de morphologie urbaine envisageables dans la région métropolitaine de Londres pour anticiper les différentes caractéristiques de la morphologie urbaine des quartiers sélectionnés.

Réaliser une modélisation informatique afin de visualiser l'exposition au rayonnement solaire des façades des bâtiments en employant l'extension Area Solar Radiation du logiciel ArcGIS, version ArcMap 10.0. Les huit variables sélectionnées pour cette étude sont les suivantes : la couverture du site, la compacité, le rapport d'espace ouvert, le rapport surface/périmètre, la couverture du toit photovoltaïque, le rapport entre le toit et le coefficient d'occupation du sol, le rapport de la surface du toit à l'enveloppe et l'enveloppe moyenne pondérée par zone facteur de vue de ciel. Les résultats de cette étude indiquent que la manipulation des variables de la forme urbaine peut conduire à une augmentation de l'exposition solaire des toits d'environ 9 % et jusqu'à 45 % pour les façades.

L'accessibilité de l'énergie solaire dans l'environnement bâti est influencée par la compacité, qui est un élément essentiel de la forme urbaine. Sur cette optique se porte l'étude de [Mohajeri et al. \(2016\)](#) qui est intitulé « Effets de la compacité urbaine sur le potentiel d'énergie solaire ». Cette dernière est citée 255 fois depuis son apparition en 2016. Cette étude se classe en deuxième position dans notre classification des recherches les plus mentionnées dans le domaine. Dans cette recherche, les auteurs examinent la corrélation entre différents indicateurs de compacité urbaine (figure 20) et le potentiel solaire dans les 16 quartiers de la ville de Genève (Suisse). Dans cette étude, l'approche méthodologique consiste à :

- Effectuer une simulation énergétique de 11 418 bâtiments à Genève, Suisse.
- Évaluer le potentiel solaire des systèmes photovoltaïques intégrés au bâtiment (BiPV), des capteurs solaires thermiques (STC) et des systèmes solaires passifs à gain direct.
- Analyser de la relation entre 6 indicateurs de compacité urbaine et le potentiel solaire.

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

CitySim est utilisé afin de calculer l'insolation quotidienne reçue par chaque surface des bâtiments analysés sur une durée d'un an, en prenant en considération les seuils d'irradiation spécifiques pour les toits et les façades.

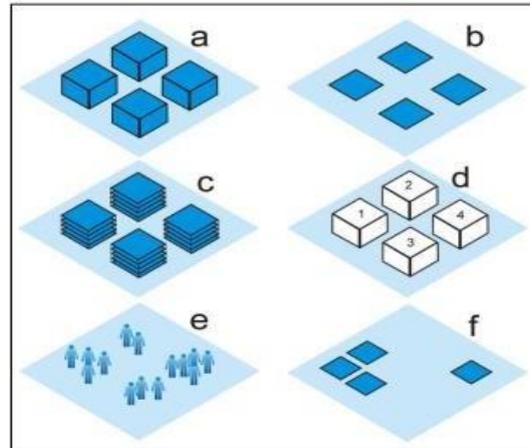


Figure 20 : Les divers indicateurs de compacité urbaine de l'étude de Mohajeri

Source : Mohajeri et al, 2016

Les résultats fournissent un cadre qui s'avère être d'une grande utilité pour la prise de décisions visant à évaluer et à intégrer le potentiel solaire dans des environnements urbains denses. En accroissant la densité urbaine, il est possible de réduire la production annuelle d'énergie solaire de 30 à 40% lors de la transition des quartiers dispersés aux quartiers compacts. En ce qui concerne les façades, la capacité du photovoltaïque intégré au bâtiment (exprimée en pourcentage de la surface totale) diminue de 20 % à 3 %, la capacité des systèmes thermiques solaires collectifs de 85 % à 49 % et la capacité du chauffage solaire passif de 21 % à 4 %. Pour ce qui est des toits, la capacité du photovoltaïque intégré au bâtiment passe de 94 % à 79 % et la capacité des systèmes thermiques solaires collectifs de 100 % à 95 %. Ainsi, l'influence de la compacité sur le potentiel solaire des toits est nettement moindre que sur celui des façades.

La recherche de [Zhang et al. \(2019\)](#) est classé en troisième position dans notre classification des recherches les plus mentionnées dans le domaine étudié. Son article est intitulé « Impact de la typologie des îlots urbains sur le potentiel solaire des bâtiments et l'efficacité de l'utilisation de l'énergie dans une ville tropicale à haute densité », il est cité 190 fois depuis son apparition en 2019. L'article présente les résultats d'une recherche examinant la relation entre la typologie des quartiers urbains, le potentiel de captation de l'énergie solaire et la performance énergétique des bâtiments dans le cadre de la ville dense et tropicale de Singapour. Une recherche basée sur la modélisation a été menée sur trente exemples de quartiers urbains génériques répartis en six catégories (figure 21), qui illustrent diverses configurations urbaines. Ces exemples ont été soumis aux mêmes paramètres de planification et aux mêmes hypothèses de simulation afin d'exclure toute influence de variables extérieures à la conception.

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

Tous les cas ont été analysés en calculant divers paramètres de configuration urbaine afin de saisir leurs caractéristiques spatiales. Les paramètres en question se présentent comme suit :

- La profondeur des édifices.
- Le ratio des espaces ouverts.
- La couverture du site.
- Le coefficient d'occupation du sol.
- La compacité.
- Le rapport entre la toiture et la surface de plancher.
- Le rapport entre la surface du toit et celle de l'enveloppe.
- La couverture de toitures photovoltaïques.

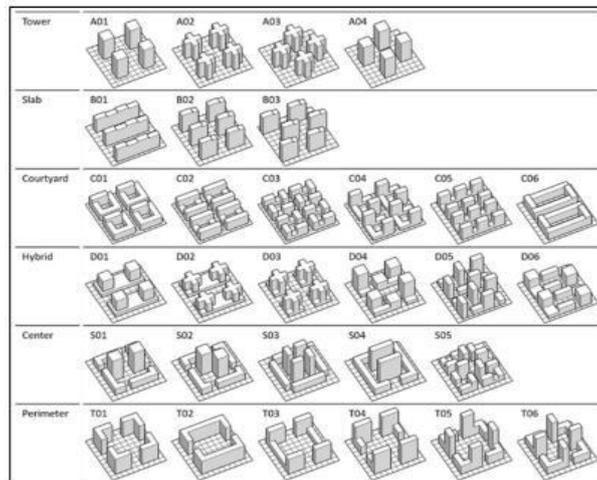


Figure 21 : Les blocs urbains étudiés partagés sur six classes de typologie

Source : Zhang et al, 2019

Un modèle opérationnel a été élaboré en utilisant les extensions Ladybug et Honeybee dans l'environnement de Grasshopper pour le logiciel Rhinoceros3D. Ce modèle vise à simuler le rayonnement solaire et à effectuer une modélisation de la performance énergétique des bâtiments. Les conclusions tirées de l'analyse de 30 cas de blocs urbains génériques, englobant une diversité de conceptions de bâtiments, révèlent des disparités significatives dans le potentiel de récupération d'énergie solaire parmi les six catégories de blocs urbains génériques. Cette évaluation prend en considération l'ensemble des surfaces de l'enveloppe du bâtiment ou les surfaces admissibles dépassant le seuil minimum d'irradiance cumulative annuelle spécifique.

Il est essentiel de planifier la morphologie urbaine de l'environnement bâti afin de progresser vers un environnement urbain qui convient au climat. Dans cette perspective, l'étude de [Martins et al. \(2016\)](#) intitulée « Analyse de sensibilité des facteurs de morphologie urbaine concernant

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

le potentiel d'énergie solaire des bâtiments dans un contexte tropical brésilien », se focalise sur l'évaluation de l'influence des caractéristiques urbaines sur trois objectifs énergétiques spécifiques dans un contexte tropical brésilien : l'exploitation prometteuse de l'énergie solaire pour la génération décentralisée d'électricité et la problématique paradoxale des économies d'énergie visant à minimiser les apports solaires indésirables tout en assurant un éclairage naturel adéquat. Cette étude occupe la sixième position dans notre classement et a été mentionnée 110 fois depuis sa publication en 2016.

L'objectif des chercheurs est de quantifier l'impact des caractéristiques urbaines sur les objectifs énergétiques, en se basant sur des critères tels que le rapport de surface de plancher, le rapport d'aspect, le ratio de parcelle, la distance entre les bâtiments et l'albédo. Cette recherche met en œuvre la méthodologie de la conception d'expériences (DOE) en recourant à l'outil modeFRONTIER. Cette étude présente une approche basée sur la méthode des plans d'expériences fractionnaires et un modèle simplifié de radiosité afin d'analyser la quantité d'irradiation solaire disponible sur les façades des bâtiments. Cette analyse prend en considération une variété de formes géométriques caractéristiques des îlots urbains. D'après les résultats obtenus, il apparaît que le rapport d'aspect, la distance entre les bâtiments et l'albédo sont les paramètres urbains ayant les effets les plus significatifs sur les trois variables d'objectifs examinées. En revanche, l'influence du rapport de parcelle et du rapport de surface de plancher est considérablement moindre.

L'interaction entre l'irradiation solaire et la configuration urbaine joue un rôle crucial dans la modulation de l'efficacité énergétique à l'échelle des villes. En réalité, la quantité de lumière solaire atteignant les façades des bâtiments, laquelle est influencée par la configuration urbaine, est fortement corrélée à l'efficacité énergétique des édifices. Sur cette base, l'étude menée par [Morganti et al. \(2017\)](#), intitulée « Indicateurs de morphologie urbaine pour l'analyse de l'énergie solaire », vise à identifier un ensemble d'indicateurs de morphologie urbaine permettant d'analyser l'énergie solaire et de mettre en lumière les relations les plus précises entre la disponibilité solaire sur les façades dans un contexte méditerranéen. Cette étude se classe septième dans notre liste en termes de nombre de citations, ayant été citée 103 fois depuis sa publication en 2017.

L'analyse des 14 textures urbaines de Rome et de Barcelone repose sur l'utilisation de sept indicateurs de morphologie urbaine, à savoir : l'indice d'espace brut, l'indice d'espace au sol, le rapport façade/site, la hauteur moyenne des bâtiments, le rapport volume/surface, ainsi que le rapport entre l'aspect des bâtiments et le facteur ciel des façades. Cette étude a utilisé la méthode d'analyse de régression des moindres carrés, mise en œuvre à l'aide du logiciel Heliodon2.

Les résultats suggèrent la possibilité de simplifier le processus de conception initial pour les urbanistes et les architectes en réduisant à la fois la quantité d'informations requises et le temps normalement consacré à la réalisation d'analyses solaires à l'échelle urbaine.

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

D'après Lobaccaro et al. (2019), une méthode est suggérée afin d'assister les intervenants urbains dans l'évaluation du potentiel solaire à l'échelle du quartier et dans la prise en considération des effets d'ombrage et des réflexions solaires entre les bâtiments, en fonction de la morphologie urbaine et des caractéristiques des bâtiments. Son article intitulé « Approche d'analyse méthodologique pour évaluer le potentiel de l'énergie solaire à l'échelle du quartier » occupe la dixième position dans notre classement, avec 67 citations depuis sa publication en 2019. Le processus débute par une analyse urbaine et une évaluation de l'exposition au soleil, dans le but d'établir une cartographie solaire des façades et des toits. Les données sont exploitées afin d'évaluer le potentiel en énergie solaire de la totalité du quartier de Sluppen à Trondheim, en Norvège.

Divers aspects de la morphologie urbaine ont été analysés, incluant la classification des édifices, l'alignement des façades et des toitures, la configuration générale, le ratio hauteur/longueur et la hauteur des constructions. D'après les conclusions, les systèmes photovoltaïques ont la capacité de répondre à plus de 40 % des besoins énergétiques des bâtiments à Trondheim, en tenant compte de la morphologie urbaine et de l'architecture des bâtiments.

Il y a aussi d'autres études qui se concentrent sur l'impact de la forme urbaine sur le potentiel solaire à travers une analyse multicritères tels que l'étude de (Mohajeri et., 2019 ; Lee et al., 2016 ; Poon et al., 2020 ; Mendis et al., 2020 ; Xu et al., 2021). Ces études sont citées 58, 54, 50, 40 et 35 fois respectivement depuis leurs publications.

III.1.2.1.1 Analyse morpho-énergétique à la base de trois critères

L'article d'Andreou (2014) intitulé « L'effet de la configuration urbaine, de la géométrie des rues et de l'orientation sur les conditions d'ombrage dans les canyons urbains en Méditerranée » occupe la quatrième position dans notre classement, ayant été cité 154 fois depuis sa publication en 2014. L'article présente les résultats d'une analyse d'ombrage réalisée dans le cadre d'une étude comparative plus large portant sur deux sites présentant des différences marquées en termes de configuration des rues et de densité urbaine. Le premier site expérimental se situait dans une institution traditionnelle sur l'île de Tinos, en Grèce, tandis que le second était localisé dans une zone relativement récente de la capitale de l'île.

Dans ce travail de recherche, l'auteur a employé Autodesk Ecotect pour réaliser une analyse paramétrique de l'ombrage. L'objectif était d'examiner trois variables influençant les conditions d'ombrage dans les canyons urbains : la densité urbaine, le rapport hauteur/largeur des rues et leur orientation. D'après les modèles de simulation d'ombrage, il est constaté que des niveaux élevés de densité et de rapport hauteur/largeur des rues ont un effet bénéfique sur les niveaux d'ombrage durant la saison estivale. Par conséquent, les taux d'ombrage des surfaces horizontales des rues orientées du sud au nord restent relativement constants tout au long de l'année. Les conclusions de cette recherche pourraient contribuer à la définition de recommandations en matière d'aménagement urbain.

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

En prenant en compte les bâtiments résidentiels urbains présentant des densités diverses (faibles, moyennes et élevées), une étude menée par [Li et al. \(2015\)](#) intitulée « Potentiel solaire dans les bâtiments résidentiels urbains » occupe la cinquième place dans notre classement, avec un total de 131 citations depuis sa publication en 2015.

Dans leur recherche, les auteurs ont évalué l'impact de trois paramètres clés de conception, à savoir le rapport hauteur/largeur du bâtiment, l'azimut et la couverture du site, sur les rendements des systèmes photovoltaïques et solaires thermiques installées dans des habitations. D'après les conclusions de cette étude, il a été observé que l'augmentation du rapport hauteur/largeur du bâtiment a un impact positif sur le potentiel solaire, de même que l'augmentation de la couverture du site. De plus, le bâtiment dispose d'une plage d'azimut privilégiée où le rendement photovoltaïque demeure à un niveau plus élevé. Cependant, l'azimut du bâtiment a une influence limitée sur le rendement thermique. Parmi les résultats significatifs obtenus, il est observé un résultat prometteur : les immeubles de six étages à faible densité peuvent parvenir au statut d'énergie nette zéro en intégrant l'utilisation conjointe du photovoltaïque et du solaire thermique.

En général, les infrastructures sont la principale source d'énergie d'un pays, mais elles offrent également des sites pour le déploiement de l'énergie solaire. L'étude menée par [Mohajeri et al. \(2019\)](#) a analysé l'impact de la géométrie des canyons urbains sur l'irradiation solaire des voiries et des façades des constructions environnantes à l'échelle de la municipalité de Genève, en Suisse. Son article intitulé « Conception urbaine durable basée sur le solaire : Les effets de la géométrie des canyons de rue à l'échelle de la ville sur l'accès au soleil à Genève, en Suisse » occupe la huitième place dans notre classement, avec 83 citations depuis sa publication en 2019.

Cette étude analyse les paramètres tels que le rapport d'aspect, le facteur de vue du ciel, l'orientation, ainsi que la largeur et la longueur des rues. L'outil "ArcGIS Spatial Analyst" est utilisé pour quantifier ces paramètres, tandis que MATLAB et ArcGIS sont exploités pour simuler l'absorption du rayonnement solaire par les surfaces des rues, et que CitySim est utilisé pour modéliser l'absorption du rayonnement solaire par les façades des bâtiments. L'enquête met en lumière l'influence significative de l'orientation des rues sur l'absorption annuelle du rayonnement solaire par les surfaces des rues et des façades. Il existe une corrélation modérée entre les autres paramètres et le rayonnement solaire.

D'autres études se penchent également sur l'analyse morpho-énergétique en se basant sur trois critères, comme le souligne l'étude d'[Ahmadian et al. \(2021\)](#). Depuis sa publication en 2021, l'étude intitulée « Effet de la forme urbaine et de la densité sur la performance énergétique des bâtiments dans les climats tempérés » a été citée 57 fois. Les auteurs se concentrent sur les paramètres tels que la densité, la couverture du site et le rapport des parcelles.

III.1.2.1.2 Analyse morpho-énergétique à la base de deux critères

Dans leur recherche, [Takebayashi et al. \(2015\)](#) se penchent sur l'exploitation de l'énergie solaire en analysant la relation entre la forme urbaine et l'apport de rayonnement solaire sur les toits et les façades des édifices. Depuis sa publication en 2015, l'article intitulé « Étude visant à examiner le potentiel d'utilisation de l'énergie solaire en fonction de la relation entre la morphologie urbaine et le gain de rayonnement solaire sur les toits et les surfaces murales des bâtiments » a été cité 73 fois. L'étude a analysé la corrélation entre le taux de couverture des bâtiments, les attributs des rues et l'exposition au rayonnement solaire sur les toits et les murs à Osaka, au Japon, qui a été sélectionné comme lieu d'investigation. L'évaluation du rayonnement solaire sur les toits et les murs des édifices urbains est réalisée à l'aide de l'outil ArcGIS. Dans le cadre de cette étude, il a été observé que les bâtiments situés dans les zones résidentielles et industrielles présentent une réduction du rayonnement solaire sur leurs toits en raison d'un faible taux de couverture des bâtiments. Cependant, il est observé que de nombreuses constructions situées dans le centre-ville et les quartiers résidentiels subissent une réduction de l'exposition à la lumière solaire sur leurs toits en raison de l'impact des ombres projetées par les bâtiments environnants. En général, à Osaka, le pourcentage de rayonnement solaire reçu par les murs, les toits et les surfaces au sol est respectivement de 17,5 %, 25,7 % et 56,8 %.

Il y a aussi d'autres études qui se focalisent sur analyse morpho-énergétique à la base de deux critères tels que l'étude de ([Zhu et al., 2020](#) ; [Martins et al., 2019](#) ; [Bianchi et al., 2019](#)). Ces études sont citées 65, 36 et 10 fois depuis leurs publications. Les auteurs se concentrent sur les paramètres suivants : hauteur des constructions et facteur de vue de ciel, rapport d'aspect de la cour et l'écart type de la hauteur construite, hauteur moyenne des bâtiments et l'écart type de la hauteur des bâtiments respectivement.

III.1.2.2 Analyse monocritère de l'influence de la forme urbaine sur le potentiel solaire

La luminosité des façades urbaines présente une grande variabilité, étant soumise à l'influence des obstacles des bâtiments environnants et de l'orientation. Cette méthode pratique est considérée comme un moyen pour les architectes de simplifier l'intégration des systèmes photovoltaïques, favorisant ainsi le développement de l'énergie solaire en milieu urbain. Dans cette optique, l'étude de [Chatzipoulka et al. \(2018\)](#) intitulée « Facteur de vue du ciel en tant que prédicteur de la disponibilité solaire sur les façades des bâtiments » est au centre de l'attention. Depuis sa parution en 2018, l'article a été cité 63 fois. Les auteurs réalisent une analyse unidimensionnelle de l'influence de la configuration urbaine sur le potentiel solaire en se basant sur le paramètre du facteur de vue du ciel. Ils analysent dans quelle mesure ce paramètre, symbolisant l'angle d'ouverture d'un point vers le ciel, peut être utilisé pour évaluer l'impact du rayonnement solaire sur les façades dans des contextes urbains complexes. Afin d'explorer cette question, une analyse statistique approfondie a été réalisée pour examiner la corrélation entre le facteur de vue de ciel et l'irradiation solaire pour 30 orientations, en tenant compte de trois climats européens (Athènes, Londres et Helsinki) à différentes saisons de l'année.

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

Les résultats soulignent une corrélation linéaire significative entre le facteur de vue du ciel et l'irradiance globale annuelle, dans toutes les orientations, pour les trois scénarios étudiés. En réalité, étant donné que ce paramètre est étroitement associé aux deux composantes principales du rayonnement solaire, directe et diffuse, il est probable qu'il puisse être utilisé pour anticiper l'exposition annuelle des façades à n'importe quel emplacement dans la plage de latitudes examinée.

III.1.3 Approche retenue

L'utilisation croissante des énergies renouvelables, notamment de l'énergie solaire, incite les urbanistes et les architectes à perfectionner l'intégration des technologies solaires dans la planification et la conception des espaces urbains. Pour relever cette problématique, les chercheurs doivent évaluer l'impact de diverses caractéristiques de la forme urbaine (comme la compacité, la densité, la couverture du site, la hauteur moyenne, etc.) sur les performances solaires des façades et des toitures. En effectuant une revue de la littérature portant sur la corrélation entre l'énergie solaire et la morphologie urbaine, nous avons identifié les caractéristiques géométriques essentielles de la forme urbaine qui impactent le potentiel solaire, notamment : la couverture du site, la densité, la compacité, le rapport hauteur/largeur, le rapport d'espace ouvert, la couverture de toit photovoltaïque, le coefficient d'occupation du sol, ainsi que les rapports de surface des planchers des façades et des toits, ainsi que les dimensions de la rue.

III.2 Les méthodes et les outils d'évaluation énergétique des systèmes solaires dans la littérature scientifique

III.2.1 Contexte

Le rendement des bâtiments et des technologies solaires intégrées est largement déterminé par l'irradiation solaire. Les structures environnantes ont la capacité de réduire l'impact du rayonnement solaire sur les toits des bâtiments urbains, tout en favorisant la disponibilité de l'énergie solaire par le biais de la diffusion et de la réflexion. La quantification de ces effets est rendue complexe en raison de la complexité des configurations urbaines (Bianchi et al., 2018). Il est impératif de développer des méthodes et des outils personnalisés pour faciliter et appuyer ces évaluations, tout en intégrant les aspects de l'énergie solaire dans les démarches de planification urbaine.

III.2.2 Evaluation du potentiel solaire des bâtiments en milieu urbain

Les méthodes actuellement disponibles peuvent être regroupées en quatre catégories :

- 1- Des méthodes fondées sur l'utilisation des cartes d'irradiation.

Les systèmes d'information géographique (SIG) ont été étudiés par Fonseca et al. (2016).

Les données géographiques du bâtiment et les images aériennes ont été utilisées dans l'étude de Singh & Banerjee (2015).

Google Street View, est utilisé dans l'étude de Gong et al. (2019).

Chapitre 03 :Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

Tableau 6 : Les quinze études les plus cités qui traitent les outils et/ou méthodes d'évaluation du potentiel solaire en milieu urbain ⁴

Classement	Publication	Citation	Outil et/ou méthode d'évaluation
01	(Fonseca et al., 2016)	355	City Energy Analyst (Extension pour ArcGIS)
02	(Singh & Banerjee, 2015)	261	PVSyst
03	(Rodríguez et al., 2017)	180	SimStadt
04	(Mainzer et al., 2017)	158	OpenStreetMap, aerial images and RE ³ ASON
05	(Kanters et al., 2014b)	144	Revue des outils et des méthodes
06	(Groppi et al., 2018)	139	GIS
07	(Vulkan et al., 2018)	138	Shadow cast (R packadge)
08	(Wang et al., 2018)	132	CESAR/EnergyPlus
09	(Gros et al., 2016)	116	EnviBatE et SOLENE
10	(Karteris et al., 2013)	100	Modèle de calcul statistique
11	(Nault et al., 2015)	98	Revue des mesures d'évaluation
12	(Miao et al., 2020)	94	Revue facteur de vue de ciel
13	(Gong et al., 2019)	93	Google Street View
14	(Chow et al., 2014)	62	Area Solar Radiation tool (dans ArcGIS)
15	(Ouria & Sevinc, 2018)	54	Ladybug

Source : Auteur

III.2.2.1 Méthodes fondées sur l'utilisation des cartes d'irradiation

Il s'agit de techniques fréquemment employées pour évaluer le potentiel photovoltaïque des toits en milieu urbain. Ces méthodes semblent être plus efficaces pour évaluer de manière globale un quartier, une commune ou une ville dans son ensemble. Ils offrent un avantage significatif en automatisant les processus de calcul et en produisant efficacement des données géoréférencées, facilitant ainsi une évaluation initiale au niveau du bâtiment, du quartier, de la commune ou de la ville. Ces méthodes peuvent être regroupées en trois catégories en fonction des outils employés :

⁴ Le classement est effectué à l'aide d'un outil IA (intelligence artificielle) Connected Papers

III.2.2.1.1 Systèmes d'information géographique (SIG)

Il s'agit de modèles très avancés visant à prédire le potentiel physique de l'énergie solaire à grande échelle dans les zones urbaines. En règle générale, ces outils sont appliqués à des modèles de surfaces urbaines en 2,5D, qui reposent sur des données LiDAR, des cartes vectorielles numériques 2D ou des données altimétriques relatives aux hauteurs des édifices. Les modèles cités intègrent les données de surface afin de visualiser les sorties des algorithmes de rayonnement implémentés dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Dans cette section, on recense une multitude d'outils largement utilisés et cités, parmi lesquels on peut citer ce qui suit :

City Energy Analyst (extension pour ArcGIS), Les modules v.sun implémentés dans GRASS GIS, solar radiation (c'est une toolbox dans le logiciel ArcGIS) et l'algorithme SOL créé dans l'environnement Matlab.

L'outil City Energie Analyst a été introduit par [Fonseca et al. \(2016\)](#). Cet outil est conçu pour évaluer et optimiser les systèmes énergétiques des bâtiments situés dans les quartiers urbains. L'outil représente une version améliorée du logiciel de géomatique ArcGIS v10.3, développée en utilisant Python v2.7, un langage de programmation libre. Une étude de cas a été menée à Zoug, en Suisse, afin de mettre à l'épreuve le modèle. Les chercheurs ont analysé quatre scénarios de croissance pour un site industriel de 25 hectares en pleine mutation urbaine, et ont déterminé les infrastructures les plus appropriées pour son développement.

Dans leur recherche, [Groppi et al. \(2018\)](#) ont proposé une approche basée sur l'analyse du potentiel d'énergie solaire exploitable des habitations en évaluant l'efficacité des panneaux solaires photovoltaïques et thermiques. Basée sur une approche de type "cellule urbaine" expérimentée à Ladispoli (Italie). Les fonctionnalités "Solar Area Radiation" et "Zonal statistics as table" d'ArcGIS ont été exploitées afin d'évaluer le potentiel solaire. D'après les résultats, 35% des bâtiments sont propices à l'installation de collecteurs thermiques, tandis que 33% le sont pour les collecteurs photovoltaïques. En outre, il est estimé que 28% de l'énergie non renouvelable économisée est allouée à la production d'électricité et 18% à des applications thermiques.

[Chow et al. \(2014\)](#) ont développé une approche visant à modéliser de manière fine les systèmes d'information géographique (SIG) en 3D, en prenant en compte la dimension spatio-temporelle, afin d'évaluer le potentiel solaire de deux modèles 3D distincts localisés dans le sud de l'Ontario (Canada). Cette étude a suivi une méthodologie de modélisation en trois étapes distinctes : la conception d'un modèle tridimensionnel des situations examinées, l'évaluation du potentiel solaire, et l'extraction des données. Au cours de la seconde phase, les chercheurs ont utilisé l'extension du logiciel ArcGIS 10.2, appelée Area Solar Radiation Tool, pour étudier l'irradiation solaire sur une zone géographique donnée pendant des périodes déterminées.

III.2.2.1.2 Données géographiques du bâtiment et images aériennes

(Mainzer et al., 2017) ont développé une méthode novatrice pour évaluer la capacité photovoltaïque des toits urbains et pour mener des analyses approfondies sans nécessiter l'utilisation de modèles tridimensionnels de villes. Cette approche consiste à fusionner des données géographiques de construction avec des images aériennes, lesquelles sont ensuite soumises à une analyse à l'aide de techniques de reconnaissance d'images et de machine d'apprentissage automatique. Cette méthode peut être appliquée dans n'importe quelle zone où des données OpenStreetMap, des images aériennes ou satellites, ainsi que des informations sur l'éclairage et la température sont disponibles. Ils ont utilisé le modèle RE³ASON pour analyser et optimiser les systèmes énergétiques urbains afin d'évaluer le potentiel des panneaux solaires PV.

Dans leur étude, Singh & Banerjee (2015) proposent une méthode hybride pour évaluer la capacité photovoltaïque des toits de la ville de Mumbai, en Inde. Cette approche consiste en l'utilisation de simulations dans PVSyst et en l'analyse d'images géospatiales issues de l'imagerie satellitaire de la région concernée. Leur méthodologie se divise en trois étapes principales : d'abord, l'évaluation de la surface totale du toit pouvant accueillir des systèmes solaires photovoltaïques, ensuite l'analyse de l'efficacité de l'irradiation solaire sur le plan du réseau pour le système photovoltaïque, et enfin l'examen des implications du choix de différents dispositifs solaires. D'après les résultats obtenus, il est envisageable de satisfaire jusqu'à 31% de la demande journalière en électricité en ayant recours à l'installation d'un système solaire photovoltaïque sur le toit.

III.2.2.1.3 Google Street View

Dans leur étude, Gong et al. (2019) ont présenté une méthode d'évaluation des avantages solaires dans les rues urbaines densément peuplées de Hong Kong, en utilisant des images issues de Google Street View (GSV). Les facteurs de vue du ciel sont déterminés lors de l'analyse des images (GSV) pour identifier le ciel, la végétation et les bâtiments. Ensuite, les trajectoires solaires diurnes sont calculées en appliquant l'algorithme SOLPOS. L'évaluation de l'irradiance solaire a été effectuée de manière précise, que ce soit sous un ciel clair ou nuageux, conformément aux vérifications de la méthode élaborée.

III.2.2.2 Méthodes basées sur l'analyse de la géométrie solaire et les cartes d'ombre

Il s'agit d'une approche employée par Vulkan et al. (2018) pour évaluer le potentiel solaire dans les zones urbaines denses, impliquant la mesure des ombres projetées à un moment précis. Le modèle "Shadow" est employé afin de modéliser en trois dimensions les ombres générées par les constructions. Les radiations solaires directes sont estimées à l'aide d'un fichier (TMY) contenant les données météorologiques représentatives d'une année. Deux approches ont été employées pour valider le modèle : la capture photographique du cas d'étude à un instant donné, ainsi que la simulation de l'ombre produite simultanément par SketchUp 3D.

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

Afin d'évaluer la capacité photovoltaïque des toitures plates des immeubles résidentiels à Thessalonique, une ville du nord de la Grèce, [Karteris et al. \(2013\)](#) ont développé un modèle statistique simplifié. Ce modèle repose sur l'utilisation de l'analyse de régression pour examiner la corrélation entre plusieurs variables quantitatives, offrant ainsi la possibilité de prédire une variable en fonction des autres. Le modèle en question s'inscrit dans une méthodologie en trois étapes : l'analyse des cas d'étude pour estimer la surface de toit plat appropriée à l'utilisation de l'énergie solaire, l'application de méthodes statistiques pour analyser les données recueillies et la validation du modèle. D'après les conclusions, le modèle fournit des résultats fiables et que l'environnement urbain est moins propice à l'implantation de systèmes photovoltaïques.

III.2.2.3 Méthodes de quantification énergétique sur une géométrie 3D

Il s'agit des méthodes utilisées pour évaluer l'exploitation de l'énergie solaire dans les milieux urbains. Selon ces méthodes, l'évaluation de l'énergie finale doit être réalisée en six étapes :

- 1- Choisir les cas à étudier.
- 2- Élaborer le modèle tridimensionnel du cas étudié en utilisant des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).
- 3- Collecter et analyser les données météorologiques du site à l'aide du logiciel de simulation en utilisant les modèles CAD.
- 4- Saisir les données d'entrée tout en procédant à l'étalonnage des modèles.
- 5- Déterminer l'énergie solaire totale incidente reçue par l'enveloppe des bâtiments en utilisant des logiciels de simulation.
- 6- Intégrer et modéliser chacune des technologies solaires utilisées.

En appliquant cette approche, [Gros et al. \(2016\)](#) ont présenté une étude dont l'objectif principal était de convertir un ancien camp militaire de La Rochelle (France) en un quartier à empreinte carbone réduite. Deux instruments ont été employés pour la réalisation de cette recherche, à savoir EnviBatE et SOLENE-Microclimat.

Afin d'étudier les rayonnements solaires reçus sur les surfaces horizontales, verticales et inclinées du complexe d'habitations sociales à Famagouste (Turquie), [Ouria & Sevinc \(2018\)](#) ont utilisé un logiciel de simulation supplémentaire nommé "Ladybug for Rhino" en conjonction avec le logiciel Excel. Les résultats mettent en évidence le fort potentiel d'utilisation de l'énergie solaire dans le cas étudié. La quantité maximale d'énergie solaire serait captée par les panneaux solaires lorsqu'ils sont inclinés à un angle compris entre 45 et 60 degrés.

[Rodríguez et al. \(2017\)](#) ont réalisé une étude pour évaluer le potentiel photovoltaïque à Ludwigsburg, situé dans le sud-ouest de l'Allemagne. La plateforme Java SimStadt est utilisée dans le but d'analyser et d'évaluer le potentiel technique et économique de chaque édifice de la zone, en se basant sur des modèles 3D conformes à la norme CityGML de l'Open Geospatial Consortium. D'après les conclusions, il est possible d'atteindre des niveaux élevés de capacité électrique qui pourraient satisfaire l'intégralité des besoins dans certaines municipalités à faible densité.

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

D'après Wang et al. (2018), une méthode de modélisation ascendante a été utilisée pour présenter un outil de simulation permettant d'analyser la demande énergétique actuelle et les possibilités de rénovation future de trois quartiers résidentiels distincts en Suisse. L'outil CESAR repose sur l'utilisation d'EnergyPlus comme moteur de simulation. Les études de cas sont comparées, et les résultats mettent en évidence une grande disparité dans leur évolution future en termes de consommation d'énergie. La configuration urbaine, comprenant les types et l'ancienneté des bâtiments, leur emplacement, leur conception et l'environnement local, revêt une importance cruciale dans ce contexte.

En appliquant les mêmes approches de quantification énergétique, l'étude menée par Bensehla et al. (2021) vise à analyser la consommation d'énergie, la génération d'énergie solaire locale, et l'influence des caractéristiques typo-morphologiques urbaines sur les besoins de chauffage et de climatisation, ainsi que sur l'exposition au rayonnement solaire, dans le contexte des scénarios climatiques actuels et futurs. La recherche porte sur les lotissements en Algérie, plus précisément dans la métropole de Constantine.

Dans cette perspective, l'approche méthodologique débute par la sélection de quatre typologies résidentielles urbaines distinctes à Constantine, en se basant sur une analyse des logements en lotissement dans la commune de la ville. Une analyse approfondie des cas sélectionnés a permis d'identifier les caractéristiques géométriques et typo-morphologiques des bâtiments. En outre, les données réelles concernant la consommation énergétique estimée des quatre types de structures urbaines ont été recueillies. Par la suite, le modèle énergétique des formes urbaines a été élaboré en utilisant l'outil de simulation énergétique des bâtiments urbains CitySim. Ce processus implique l'utilisation de trois logiciels. Tout d'abord, AutoCAD et SketchUp sont utilisés pour modéliser de manière précise les formes géométriques urbaines en trois dimensions. Ensuite, le modèle 3D ainsi créé est transféré dans le logiciel CitySim. Ce dernier requiert l'intégration de toutes les données relatives au climat du site et aux caractéristiques des bâtiments.

III.2.2.4 Techniques de traitement d'images

Mardaljevic & Rylatt (2003) ont proposé cette méthode novatrice pour évaluer le rayonnement solaire incident sur les façades des bâtiments en milieu urbain, que ce soit de manière annuelle ou mensuelle. Les méthodes de visualisation mises en œuvre dans cette approche facilitent la génération de cartes d'exposition au rayonnement solaire. Ils permettent de repérer avec précision les zones présentant le plus haut niveau de rayonnement solaire, facilitant ainsi le déploiement des technologies photovoltaïques. Actuellement, la méthode est implémentée dans un logiciel opérant sur une station de travail UNIX, et son système de simulation est constitué d'un ensemble de programmes et de scripts permettant le lancement, le traitement et la visualisation d'images de rayonnement solaire. L'examen de cette méthode par rapport à d'autres méthodes d'évaluation met en évidence sa supériorité en matière de précision.

Chapitre 03:Etat de l'art sur l'optimisation morpho-énergétique en milieu urbain

L'étude réalisée par [Kanters et al. \(2014b\)](#) a fourni une synthèse des outils et des méthodes disponibles pour la conception solaire dans le cadre du processus de conception. D'après l'analyse du questionnaire, les logiciels de conception assistée par ordinateur les plus fréquemment employés étaient AutoCAD, SketchUp, Revit, ArchiCAD, Vectorworks et 3dsMax, tandis que les logiciels de simulation solaire les plus utilisés étaient Ecotect, RETScreen, Radiance, Polysun et PVsyst. De plus, divers outils de simulation tels qu'Ecotect et RETScreen ont été reconnus comme étant les plus recommandés lors de la phase initiale de conception.

III.2.3 Approche retenue

Au moyen d'une revue de la littérature scientifique, nous avons identifié les différentes approches et instruments utilisés dans l'évaluation du potentiel solaire. Chaque approche comporte des avantages et des inconvénients : les méthodes qui reposent sur les Systèmes d'Information Géographique, par exemple, sont adaptées à des étendues considérables, mais se concentrent principalement sur l'analyse des zones urbaines préexistantes. Cependant, les spécialistes de l'urbanisme solaire ont besoin de ces outils dès les phases initiales de la conception.

De même, les méthodes employées pour la représentation des diagrammes solaires avec leurs diverses projections géométriques se focalisent principalement sur la composante directe du rayonnement solaire, alors que l'aspect réfléchi revêt une importance cruciale dans les recherches solaires et ne doit en aucun cas être sous-estimé.

Dans le cadre de notre étude, nous allons appliquer la méthode de quantification énergétique sur une géométrie tridimensionnelle. Notre objectif est d'analyser l'influence des caractéristiques typo morphologiques urbaines sur les besoins en chauffage et en climatisation. Cette méthode présente des opportunités précieuses pour étudier une multitude de critères de performance solaire.

CONCLUSION

La croissance de l'utilisation de l'énergie solaire incite les urbanistes et les architectes à incorporer davantage cette technologie dans leurs conceptions. Afin de répondre à cette problématique, les chercheurs doivent analyser l'influence de divers paramètres urbains tels que la densité, la compacité, la hauteur moyenne, sur l'exposition au rayonnement solaire des façades et des toitures.

En effectuant une analyse systématique de la littérature, nous avons identifié en premier lieu les propriétés géométriques des configurations urbaines qui impactent le potentiel solaire, ainsi que les phénomènes engendrés par leur interaction avec le rayonnement. Ceci est démontré par une synthèse d'idées et de solutions suggérées dans la littérature académique, provenant de différentes recherches menées au cours des dix dernières années. Les solutions peuvent différer en fonction des conditions météorologiques, du climat et de la latitude. Cependant, il est essentiel de tenir compte de la position du soleil et des conditions atmosphériques lors de la phase de conception, car ces éléments influent considérablement sur le choix des formes.

Par la suite, il a été observé que les techniques et les outils employés pour évaluer le potentiel solaire englobent la quantification de l'irradiation solaire sur une période spécifique, l'analyse de la surface disponible pour les technologies solaires, ainsi que la détermination du rendement ou de la puissance produite par ces équipements.

Dans la continuité de notre recherche, nous exposerons les particularités de notre approche méthodologique visant à constituer un corpus d'analyse représentatif des formes urbaines à Guelma.

Chapitre 4,

Guelma : Contexte Urbain Et Climatique

INTRODUCTION

La ville de Guelma est reconnue comme un centre agricole, en accord avec les préceptes de son édification coloniale. Cette spécificité a engendré un agencement urbain hérité de l'époque coloniale, marqué par sa localisation en tant que carrefour entre le Sud et les principales métropoles du Nord-Est de l'Algérie. Elle se trouve au bas de la chaîne de montagnes de la Mahouna, bénéficiant ainsi d'une position élevée qui domine les plaines de la vallée du Seybouse.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les éléments contextuels essentiels pour la compréhension de notre étude de cas. Nous débutons par une vue d'ensemble de la ville de Guelma, en examinant son contexte historique, sa localisation géographique et ses caractéristiques morphologiques, en mettant particulièrement l'accent sur l'évolution spatiale de la ville. Par la suite, une analyse climatologique sera réalisée en utilisant le logiciel *Climate Consultant*. L'objectif est d'obtenir des informations pertinentes pour traiter les questions relatives aux caractéristiques physiques de l'environnement urbain et leur capacité à intégrer les énergies renouvelables.

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.1 Présentation générale de Guelma

Guelma, connue sous le nom de Malaca à l'époque des Phéniciens et plus tard sous le nom de Calama à l'époque romaine, est localisée à 60 km au sud-ouest d'Annaba, à 110 km à l'est de Constantine, à 60 km de la mer Méditerranée et à 150 km de la frontière tunisienne. Implantée au cœur d'une étendue région agricole, la ville de Guelma est ceinte de montagnes telles que Maouna, Dbegh et Houara, lui octroyant ainsi le statut de ville assiette. La fertilité de cette région est principalement due à la présence de la Seybouse et à la construction d'un vaste barrage qui garantit une irrigation étendue. En qualité de point névralgique dans la région nord-est de l'Algérie, cette ville occupe également une position stratégique en tant que lieu de convergence entre cinq capitales de wilaya, assurant la liaison entre le littoral des wilayas d'Annaba, El Tarf et Skikda et les régions intérieures telles que les wilayas de Constantine, Oum El Bouagui et Souk Ahras.

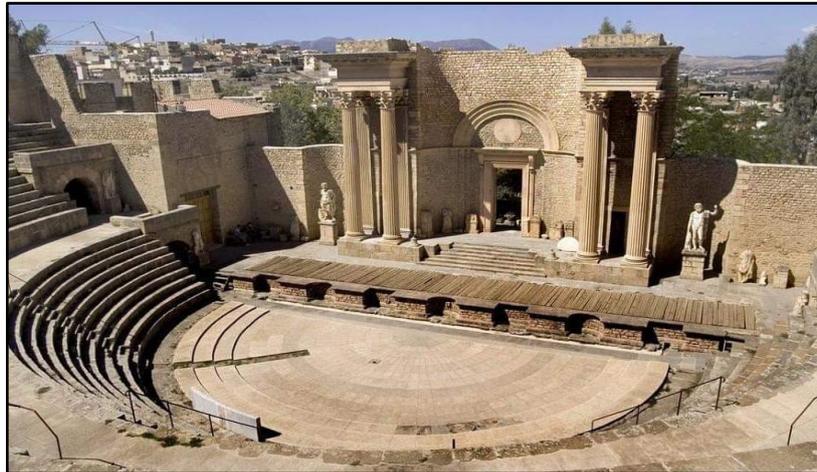


Figure 23 : Théâtre romain de Guelma

Source : Auteur



Figure 24 : Cascade de Hammam Debagh à Guelma

Source : Auteur

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.1.1 Aperçu socio-économique de la wilaya de Guelma

IV.1.1.1 Population

La wilaya de Guelma, située en Afrique du Nord, est une subdivision administrative de l'Algérie. La population de cette ville s'élève à 556 673 habitants, répartis sur une superficie de 3 686 km². Ainsi, la densité de population de la wilaya de Guelma s'élève à 151 habitants par kilomètre carré. Guelma, Oued Zenati et Héliopolis se distinguent en tant que les municipalités les plus peuplées au sein de la wilaya de Guelma, qui compte un total de 34 municipalités.

IV.1.1.2 Tourisme

La région de Guelma se distingue par sa vocation touristique, illustrée par la diversité de ses nombreuses potentialités indéniables, offrant ainsi un large éventail d'opportunités touristiques. Dans cette optique, diverses formes de tourisme peuvent être envisagées, telles que le tourisme de montagne, le tourisme scientifique, l'écotourisme, le tourisme climatique, etc. Ces potentialités se composent de thermes qui sont présents sur de nombreux sites, en particulier à Hammam Debagh et à Hammam Ouled Ali. Les monuments historiques et culturels sont des témoins des différentes civilisations qui se sont succédé dans cette région, et ils se manifestent à travers les éléments suivants :

Le Théâtre romain situé dans la commune de Guelma, construit entre 193 et 211, est un exemple significatif de l'époque romaine avec sa capacité de 4500 places.

La période musulmane est symbolisée par la mosquée El Atik, située au centre de la ville de Guelma. Elle a été construite en 1824 et inaugurée en 1852 à la fin de l'ère ottomane.

Durant la période coloniale française, la plupart des centres urbains de la Wilaya ont été établis, avec une seule construction emblématique de cette époque. Il est question du théâtre municipal.

Parmi les attractions naturelles de la région, on peut citer la grande cascade de Hammam Dbegh, les forêts de Mahouna et Béni Salah, les Grittes de Taya à Bouhamdane, ainsi que le lac souterrain de Bir Osman à Ain Hsainia.

IV.1.1.3 Economie

Selon les autorités agricoles de la région, Guelma était principalement axée sur l'agriculture, détenant un potentiel significatif, notamment : la surface agricole totale (SAT) s'élève à 266 000 hectares, ce qui représente 72,15% de la superficie totale. La surface agricole utile (SAU) s'élève à 187 338 hectares, ce qui représente 50,80% de la superficie totale de la wilaya et 70,42% de la superficie agricole totale (SAT). Les terres non productives représentent 26 405 hectares, ce qui équivaut à 7,16% de la superficie totale de la wilaya et à 19,65% de la Surface Agricole Totale (SAT).

Selon le Plan Directeur d'Aménagement Urbain (PDAU) et les autorités de la direction des mines et de l'industrie de Guelma. Bien que la wilaya ait une vocation exclusivement agricole, elle possède un potentiel industriel, à savoir : les zones industrielles, les exploitations minières et les carrières, ainsi que les zones commerciales sont des exemples de terrains affectés par des activités humaines.

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.1.2 Contexte et caractéristique de la ville de Guelma

IV.1.2.1 Situation géographique de la wilaya

La localité de Guelma se trouve aux coordonnées géographiques de 36°27'43 N en latitude et 7°25'33 E en longitude, à une altitude de 256 mètres. La wilaya de Guelma se situe dans le Nord-est de l'Algérie, à une distance de 600 km de la capitale, Alger (figure 25a).

- Au Nord, la région est délimitée par les wilayas d'Annaba et de Skikda.
- Au Sud, la région est délimitée par les wilayas d'Oum El Bouaghi et de Tébessa.
- À l'Est, on trouve la wilaya de Souk Ahras.
- À l'Ouest, on trouve la wilaya de Constantine.

IV.1.2.2 Situation géographique de la commune

Elle se trouve dans la partie nord-est de l'Algérie, au cœur de la wilaya (figure 25b), située entre les latitudes 39° et 40° Nord, et les longitudes 5° et 6° Est, couvrant une superficie de 45 km².

- Au Nord, la commune est limitée par les communes d'El-Fedjoudj et Héliopolis.
- Au Sud, est limitée par la commune de Bendjerah.
- À l'Est, elle est limitée par la commune de Belkheir.
- À l'Ouest, la commune de Medjez Amar borde cette région.

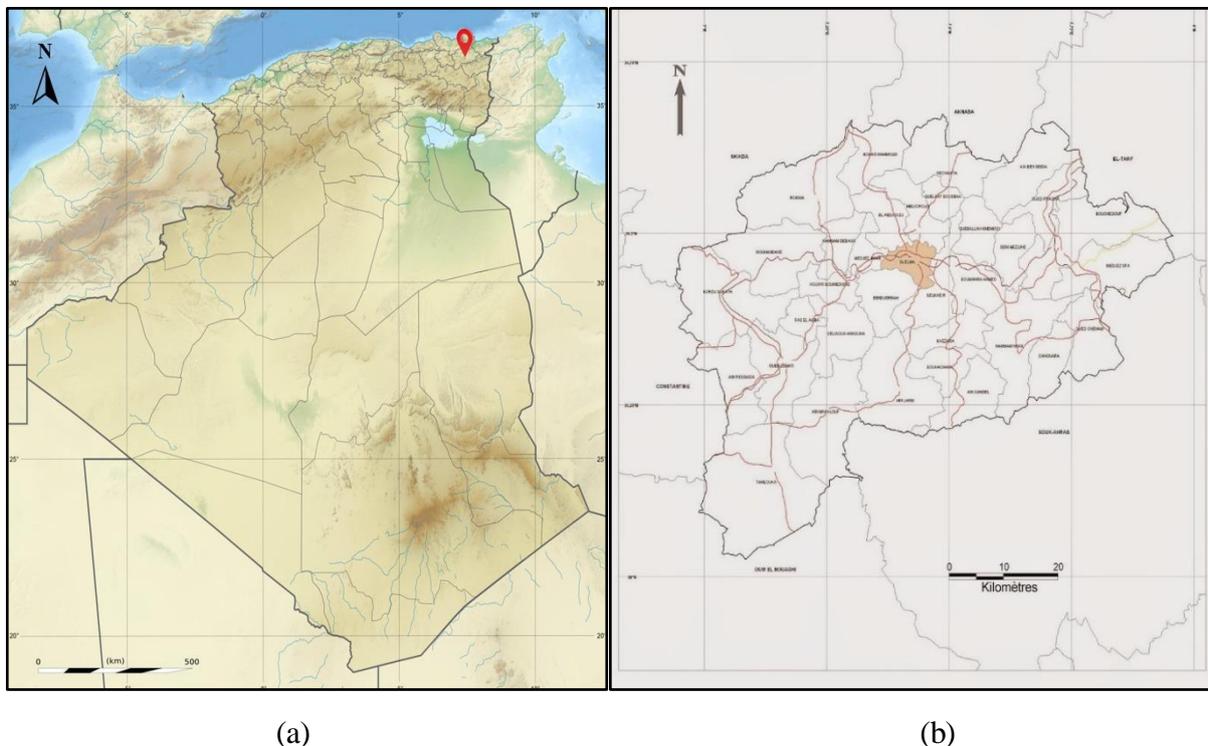


Figure 25 : Localisation de la wilaya de Guelma sur la carte d'Algérie (a) et celle de la commune par rapport à la wilaya de Guelma (b)

Source : Google Maps et APC de Guelma

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.1.3 Evolution historique de la ville de Guelma

La région de Guelma est habitée depuis la préhistoire, ce fait est attesté par la présence de la nécropole des Vestiges de Roknia, qui comprend plus de 3000 dolmens. Des inscriptions libyques retrouvées sur le site archéologique corroborent l'existence d'une civilisation préexistante à l'arrivée des Carthaginois et des Romains dans cette région. Sous le règne de l'Empire romain, Guelma, anciennement appelée "Calama", se transforma en l'un des principaux fournisseurs de céréales pour Rome, aux côtés de Setifis (Sétif) et Hippo-Reggius (Annaba), témoignant de sa prospérité durant les IIe et IIIe siècles après J.-C. Pendant la période chrétienne, aux IVe et Ve siècles, Calama était sous l'épiscopat de Possidius, qui était le biographe de saint Augustin, et était intégrée à la province ecclésiastique de Numidie. La prospérité urbaine a été mise en avant par saint Augustin et Donatus, avant d'être anéantie par l'invasion des Vandales, contraignant Possidius à chercher refuge à Hippo-Regius. Par la suite, la ville fut soumise à l'autorité de Genséric avant d'être reprise par les Byzantins, dirigés par le général Solomon, qui ordonna la construction d'une forteresse entre 539 et 544. Suite à l'émergence de la civilisation arabo-musulmane, la ville de Calama fut renommée "Guelma". D'après Ibn Khaldoun, au IXe siècle, des tribus arabes, en particulier les Banu Hilal, se sont établies dans cette région. En revanche, l'ère ottomane n'a pas entraîné de modifications majeures dans le tissu socioculturel de la ville, malgré la persistance de quelques éléments distinctifs tels que des patronymes. Par la suite, Guelma a été conquise par les Français en 1834. En 1836, le maréchal Bertrand Clauzel, conscient de la valeur stratégique du site, décida d'y installer de manière permanente un camp, ce qui marqua le commencement de la ville contemporaine qui devait accueillir de nombreuses générations de colons. Depuis son accession à l'indépendance en 1962, Guelma a été érigée en wilaya en 1974 et a acquis le statut de ville universitaire en 1986 suite à l'établissement de l'Université du 8 mai 1945.

IV.2 Etude climatologique de Guelma

IV.2.1 Climat de la wilaya

Le climat de la région présente une aridité modérée correspondant à la classification climatique semi-aride, marqué par des hivers froids et une période de sécheresse s'étendant sur 202 jours par an (Sayad, 2021). En ce qui concerne la pluviométrie, les données enregistrées sont les suivantes : la station de Guelma enregistre une pluviométrie annuelle de 654 mm, la station d'Ain Larbi enregistre une moyenne annuelle de 627 mm de précipitations et la station de Medjez Amar enregistre une pluviométrie annuelle de 526 mm.

IV.2.2 Analyse bioclimatique de la commune

Réaliser à l'aide du logiciel Climate Consultant 6.0. Ce logiciel est un outil informatique graphique convivial conçu pour assister les architectes, les entrepreneurs, les propriétaires et les étudiants à appréhender les particularités climatiques de leur région. Il exploite les données climatiques annuelles⁵ au format EPW (8760 heures) fournies gratuitement par le ministère de l'Énergie pour de nombreuses stations météorologiques à travers le monde.

⁵ Le fichier climatique (2021) est obtenu auprès de la station météorologique de Guelma

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

Le logiciel Climate Consultant convertit les données climatiques brutes en de nombreux graphiques significatifs. Il est essentiel de ne pas se limiter à l'enregistrement des données climatiques, mais de les organiser de manière structurée et de les présenter de façon claire et compréhensible, en mettant en lumière les subtilités du climat et son impact sur l'architecture des bâtiments. L'objectif est d'aider les utilisateurs à concevoir des bâtiments plus efficaces sur le plan énergétique et plus durables, en les adaptant spécifiquement à leur emplacement géographique sur terre.

IV.2.2.1 Ecart de température

L'écart de température correspond à la différence entre la température minimale et maximale enregistrée dans un lieu donné sur une période de temps spécifique. Cette période peut se manifester de manière quotidienne, mensuelle, saisonnière ou annuelle. D'après la figure 26 présentée dans le diagramme ci-dessous, on peut identifier :

La température moyenne annuelle s'élève à 17,9°C.

En juillet, la température atteint 35,1 °C, ce qui en fait le mois le plus chaud, tandis qu'en janvier, elle descend à 14,2 °C, le mois le plus froid.

Les températures extrêmes enregistrées vont de -3,5°C en janvier à 47°C en juillet.

Les variations mensuelles des températures ne sont pas aussi marquées que les variations annuelles, lesquelles peuvent dépasser 31,6°C, ce qui différencie la période chaude de la période froide.

L'amplitude diurne varie entre 15,4°C et 20,4°C durant les saisons fraîches.

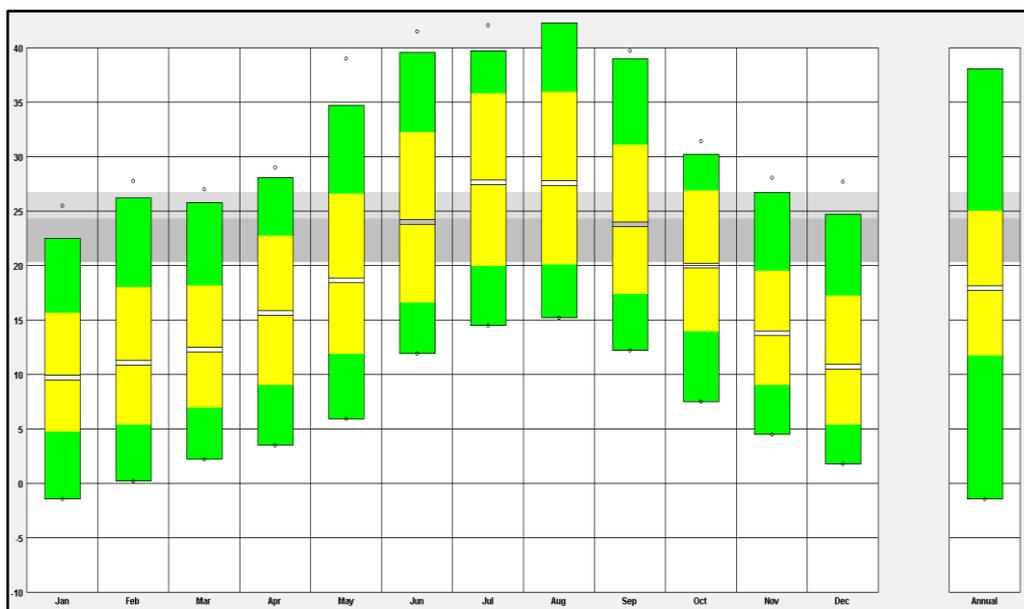


Figure 26 : L'écart de température

Source : Climate Consultant manipulé par auteur 2024 a base du fichier climatique (DZA_SA_Guelma.604230_TMYx.epw)

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

Pendant le mois le plus chaud à Guelma, le principal défi réside dans la surchauffe interne induite par l'élévation des températures, ce qui requiert le recours à des systèmes de climatisation mécanique afin de maintenir un niveau de confort thermique adéquat.

En revanche, durant les mois les plus froids, le principal enjeu réside dans la diminution des températures, provoquant ainsi des conditions de froid à l'intérieur des édifices. Cette situation requiert l'utilisation de systèmes de chauffage mécanique afin d'assurer un niveau de confort thermique optimal.

IV.2.2.2 Gamme d'éclairage

La figure 27 illustre que l'éclairement à Guelma est significativement élevé. Cette observation peut être expliquée par divers facteurs, tels que la localisation géographique de la ville et les conditions climatiques prédominantes de la région. La ville de Guelma, localisée dans le nord-est de l'Algérie, jouit d'une exposition solaire abondante tout au long de l'année. Cette forte luminosité a des répercussions importantes sur l'efficacité énergétique des constructions.

Premièrement, la quantité importante de rayonnement solaire disponible représente une opportunité majeure pour le développement de l'énergie solaire, que ce soit dans le domaine de la production d'électricité ou pour le chauffage passif des bâtiments.

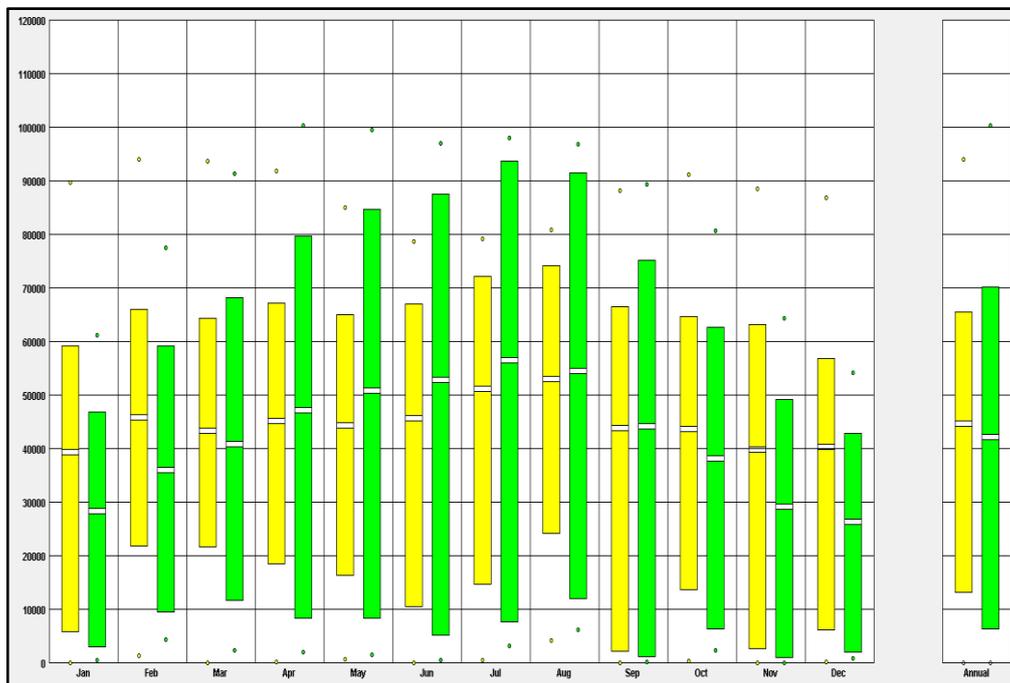


Figure 27 : La gamme d'éclairage

Source : Climate Consultant

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.2.2.3 Couverture de ciel

À Guelma, le mois le plus dégagé de l'année est juillet (figure 28), pendant lequel le ciel est majoritairement dégagé, complètement ou partiellement nuageux 92 % du temps. Pendant cette période, le ciel se distingue par son absence de nuages et par une atmosphère limpide, favorisant un ensoleillement intense et continu. Cet état de fait stimule la génération d'énergie solaire en optimisant l'absorption de la lumière par les panneaux photovoltaïques et les capteurs solaires, tout en accentuant les écarts de température grâce à des journées chaudes et des nuits fraîches.

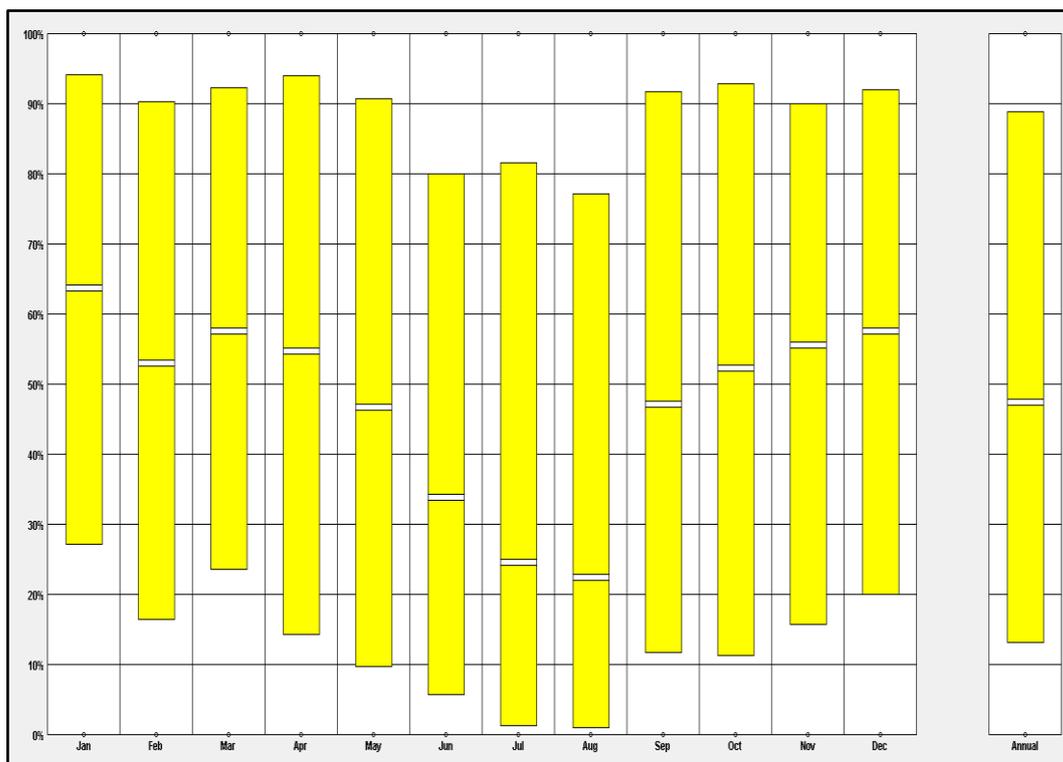


Figure 28 : La couverture de ciel

Source : Climate Consultant

IV.2.2.4 Plage de vitesse du vent

D'après la figure 29 présentée dans le diagramme ci-dessous, il est possible d'observer que :

Les vents dominants à Guelma ont une vitesse moyenne variant de 1,46 à 2 m/s, avec une moyenne annuelle de 1,80 m/s.

Les vents à Guelma proviennent de différentes orientations.

Les vents viennent de nord-ouest ont une moyenne de 23,77 %, culminant en décembre à leur niveau le plus élevé et atteignant un minimum en juillet à 10,36 %.

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

En revanche, les vents du sud-est sont plus fréquents en décembre, atteignant leur fréquence maximale en juillet.

Le sirocco se produit en moyenne 36,2 jours par an dans la région, ce phénomène peut parfois impacter la production d'énergie. L'impact principal de ces vents sur les panneaux solaires réside dans la possibilité de déposer des poussières et des particules sur les cellules photovoltaïques des bâtiments.

Pour assurer la protection des panneaux solaires contre les vents, il est nécessaire de respecter certaines directives, à savoir :

- Il est essentiel de garantir la fixation sécurisée des panneaux solaires à leur support à l'aide de fixations solides et résistantes, capables de supporter des vents violents.
- L'utilisation de housses de protection temporaires, préalablement installées en anticipation de conditions météorologiques extrêmes, s'avère être un moyen efficace de se prémunir contre les intempéries, en particulier la grêle.
- Ériger une clôture de sécurité autour des panneaux à l'aide d'un treillis métallique ou en PVC. Il est essentiel de sélectionner avec soin un matériau et un type de construction qui favorisent la transmission de la lumière.

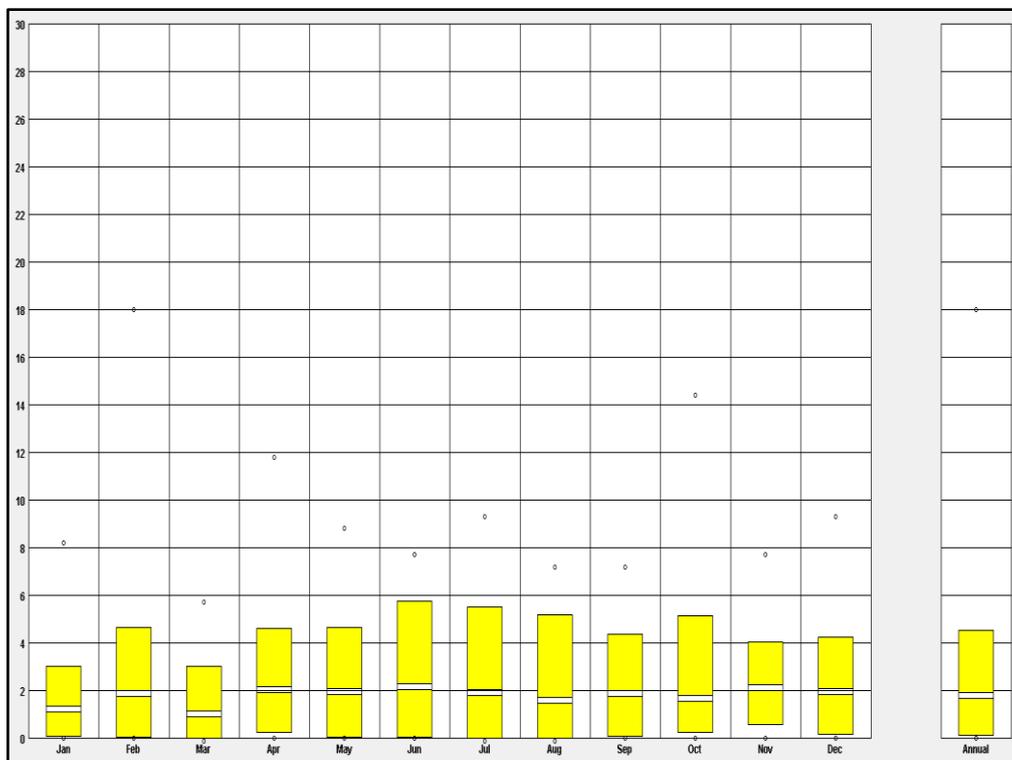


Figure 29 : La plage de vitesse du vent

Source : Climate Consultant

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.2.2.5 Humidité relative

Selon le diagramme ci-dessous (figure 30), on constate que :

- La moyenne mensuelle de l'humidité relative dépasse les 68.3 % avec une moyenne maximale de 94.2% et une moyenne minimale de 29.1%.
- Les valeurs des humidités moyennes maximales laissent penser à un climat humide ou subhumide.
- D'après le calcul d'indice d'aridité de Martonne : $I = P / T + 10$ *Eq. IV-1*

$I = 24.70$, où $20 < I < 30$

Où : P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle (C°).

- Donc le climat de Guelma est un climat semi-aride.

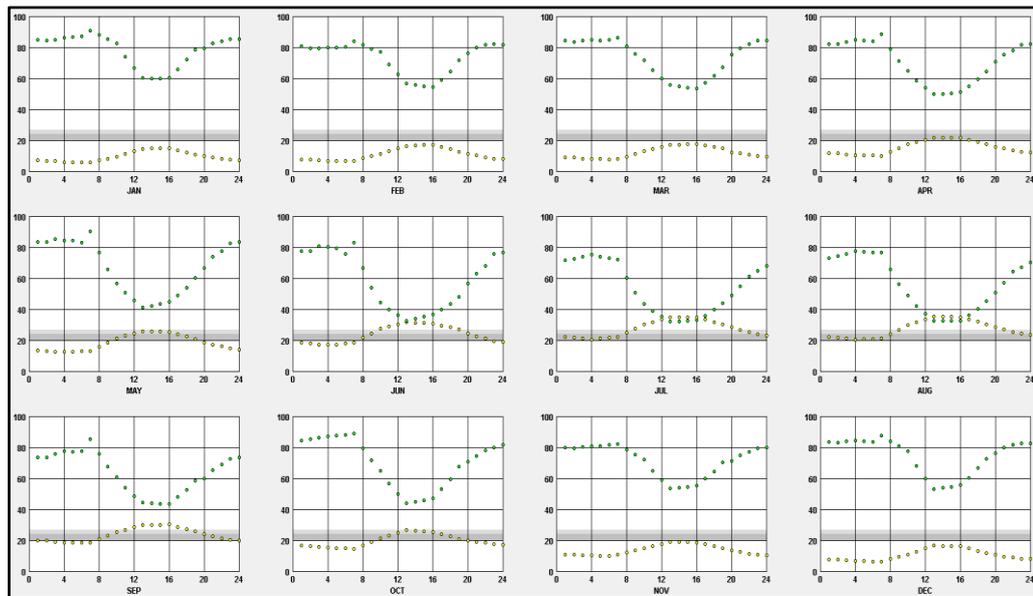


Figure 30 : L'humidité relative

Source : Climate Consultant

Parmi les solutions qui peut minimiser les risques d'humidité dans les constructions on a :

- ❖ Ventilez et aérez.
- ❖ Installez une ventilation mécanique contrôlée.
- ❖ Nettoyez les bouches d'aération.
- ❖ Vérifiez les étanchéités.
- ❖ Optez pour une centrale d'assèchement.
- ❖ Méthode naturelle : le charbon de bois.

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.2.2.6 Diagramme solaire

Pour déterminer la trajectoire annuelle apparente du soleil à Guelma, les hauteurs et les azimuts solaires ont été calculés (figure 31).

- Les trajectoires solaires des mois de novembre, décembre ou janvier sont très proches les unes des autres.
- Le lever du soleil survient à 7h58 le 21 décembre, jour du solstice d'hiver qui marque la journée la plus courte de l'année, suivi du coucher à 16h03. À midi, il adopte une inclinaison inférieure à $30^{\circ}27'$ en élévation et un azimut de 0. À 16 heures, l'azimut atteint son apogée à $53^{\circ}30'$.
- Le 21 juin, à midi, le soleil se trouve à une hauteur maximale de $77^{\circ}16'$ au-dessus de l'horizon. L'azimut atteint son apogée à $117^{\circ}5'$ à 19 heures. L'aube se produit à 04h03 (lors du solstice d'été, la journée la plus longue de l'année), suivie du crépuscule à 7h58.
- Les trajectoires des mois de mai et de juin ou de juillet sont également très proches.
- Le 21 mars ou le 21 septembre, lors des équinoxes de printemps et d'automne, le soleil se trouve à une position médiane entre les deux positions précédentes, à une hauteur de $53^{\circ}52'$ à midi. L'azimut a été mesuré à $80^{\circ}82'$ à 17 heures.

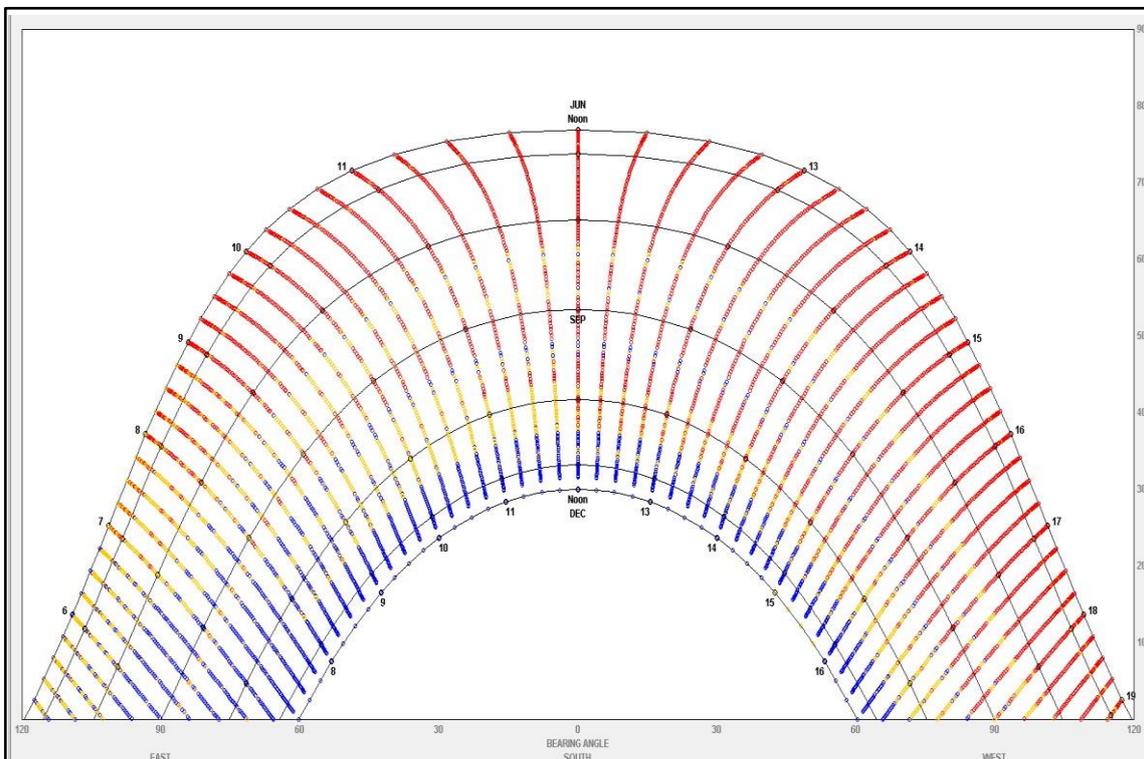


Figure 31 : Le diagramme solaire

Source : Climate Consultant

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.2.2.7 Diagramme psychométrique

La figure 32 présente un schéma qui établit une zone de confort et identifie plusieurs zones de contrôle potentiel en se fondant sur des études portant sur la température neutre et la température effective, et en utilisant les données climatiques spécifiques à la région étudiée. Cette méthode a été sélectionnée afin d'évaluer la situation dans la municipalité de Guelma.

Les recommandations peuvent être synthétisées de la manière suivante :

- L'impact de la masse thermique liée à la ventilation nocturne et à un dispositif de régulation solaire à partir du mois de juin.
- Ventilation naturelle appropriée pour l'été.
- Le chauffage passif est mis en œuvre pendant les mois plus frais tels qu'octobre et mars, alors qu'un chauffage d'appoint est requis durant les mois les plus froids comme janvier.

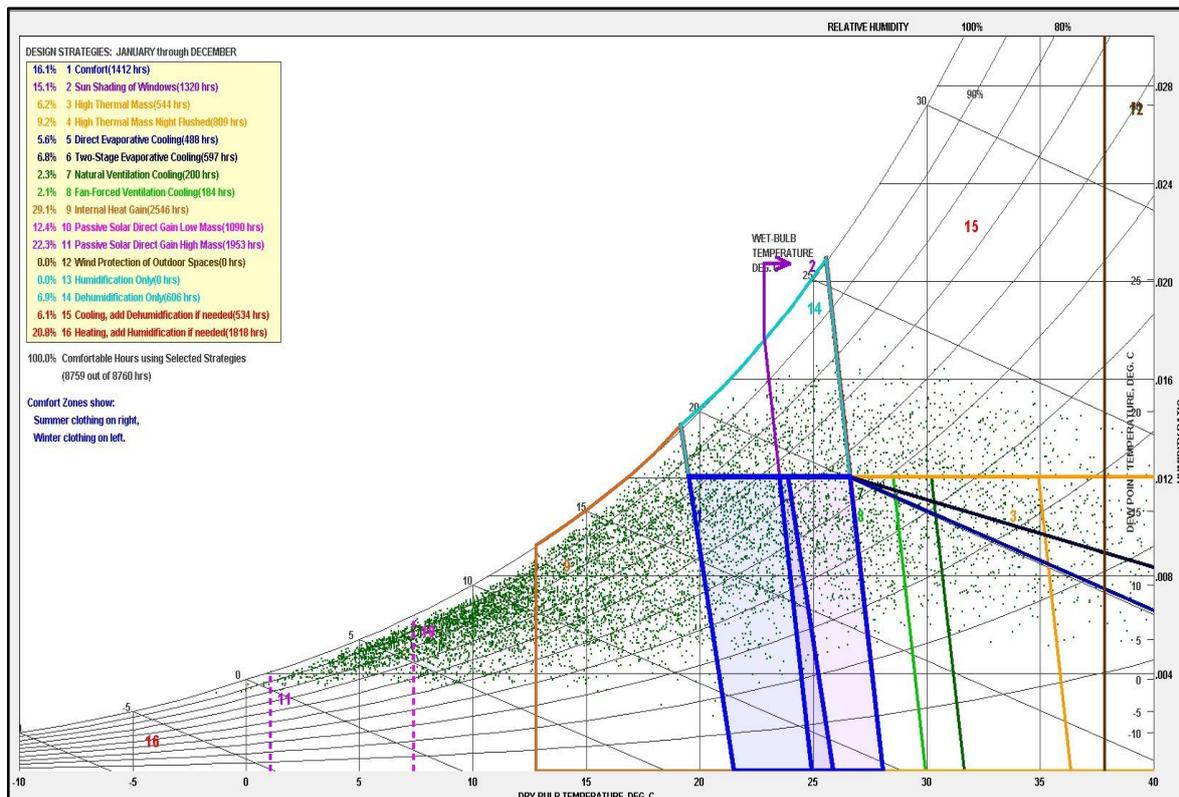


Figure 32 : Le diagramme psychométrique

Source : Climate Consultant

- La zone de confort c'est la zone où on adapte la ventilation naturelle (on n'a pas besoin d'un chauffage au climatisation mécanique).
- C'est une zone de rafraîchissement où la consommation d'énergie est minimisée ou presque nulle.

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.2.2.8 Rose du vent

En se référant aux données météorologiques provenant du logiciel Climate Consultant 6.0, qui illustre la rose des vents pour la localité de Guelma à travers les quatre saisons (figure 33), il est possible de constater que durant cette période :

- Pendant la saison hivernale, les vents dominants proviennent principalement de la direction Nord-ouest, tandis qu'ils sont moins fréquents en provenance du Sud-Ouest. Les températures varient généralement entre 0 °C et 20 °C.
- Pendant la saison printanière, les vents proviennent principalement du Sud et sont moins fréquents en provenance du Nord, tandis que les températures varient entre 20 °C et 24 °C.
- Pendant la période estivale, les vents ont principalement soufflé en provenance du Sud et du Sud-Est, avec des températures variantes entre 24 °C et 38 °C.
- Pendant la saison automnale, des vents provenant des directions Nord ont été enregistrés, accompagnés de températures oscillant entre 20 °C et 24 °C.

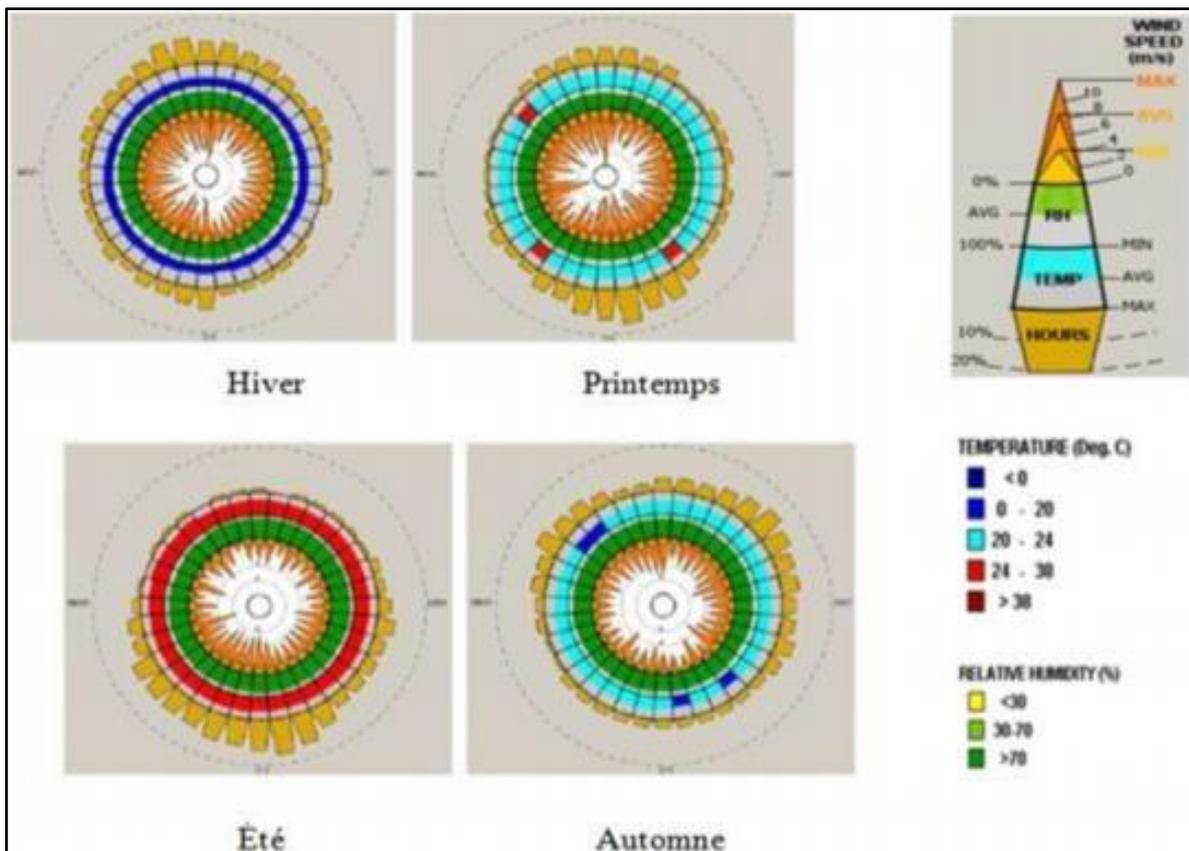


Figure 33 : La rose du vent

Source : Climate Consultant

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.2.3 Optimisation de la conception urbaine à Guelma : recommandations clés

Bien que l'objectif principal de cette thèse qui vise à identifier les configurations optimales pour l'intégration des énergies renouvelables en milieu urbain, il est primordial d'examiner divers aspects de la planification urbaine afin d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments à Guelma. Le tableau ci-dessous (tableau 7) présente un ensemble de recommandations organisées en catégories clés, offrant des stratégies proposées par le logiciel Climate Consultant pour améliorer l'efficacité énergétique tout en répondant aux défis spécifiques de la région. Les recommandations couvrent des domaines tels que l'éclairage solaire, la gestion thermique, la ventilation, l'utilisation des matériaux, l'aménagement des espaces, la protection contre le climat, et les équipements et technologies. En intégrant ces pratiques, les concepteurs peuvent créer des environnements bâtis plus durables et confortables, tout en minimisant la dépendance aux systèmes de chauffage et de refroidissement mécanique. Ce tableau se concentre spécifiquement sur les recommandations visant à améliorer l'efficacité énergétique, en mettant en avant des pratiques liées à la gestion thermique, l'éclairage solaire, l'utilisation des matériaux, et la ventilation.

Tableau 7 : Les recommandation clés proposées par le logiciel Climate Consultant

Catégorie	Recommandations
Conception de l'éclairage solaire	Pour le chauffage solaire passif, faites face à la majeure partie de la zone vitrée au sud pour maximiser l'exposition au soleil en hiver et concevez les surplombs pour ombrager complètement en été.
	Fournir un double vitrage haute performance (Low-E) à l'ouest, au nord et à l'est, mais clair au sud pour un gain solaire passif maximal.
Gestion thermique	Le gain de chaleur des lumières, des occupants et des équipements réduit les besoins de chauffage, alors gardez le bâtiment étanche, bien isolé.
	Baisser la température de confort intérieur la nuit pour réduire la consommation d'énergie de chauffage.
Ventilation et refroidissement	Une isolation supplémentaire peut augmenter le confort des occupants en maintenant la température intérieure plus uniforme.
	Par temps chaud, les ventilateurs de plafond peuvent rendre l'air intérieur plus frais de 5 degrés ou plus, donc moins de climatisation est nécessaire.
Utilisation des matériaux	Les carreaux ou l'ardoise fournissent une masse de surface suffisante pour stocker le gain solaire diurne en hiver et la fraîcheur nocturne en été.
	Utilisez des matériaux de construction de couleur claire et des toits frais (à haute émissivité) pour minimiser le gain de chaleur par conduction.

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

	Les toits plats fonctionnent bien dans les climats chauds et secs (surtout s'ils sont de couleur claire).
	Les abris terrestres, les sous-sols occupés ou les tubes souterrains réduisent les charges thermiques dans les climats très chauds et secs.
Aménagement des espaces	Organisez le plan d'étage pour que le soleil d'hiver pénètre dans les espaces d'utilisation de jour avec des fonctions spécifiques qui coïncident avec l'orientation solaire.
	Gardez le bâtiment petit car une surface de plancher excessive gaspille de l'énergie de chauffage, de refroidissement et d'éclairage.
	Les bâtiments dans les climats tempérés utilisaient une construction légère avec des dalles sur le sol et des murs fonctionnels et des espaces extérieurs ombragés.
Protection contre le climat	Localisez les zones de stockage ou les garages sur le côté du bâtiment faisant face au vent le plus froid pour aider à isoler.
	Les arbres (ni conifères ni feuillus) ne doivent pas être plantés devant des fenêtres solaires passives.
	Un bâtiment sensible dans des climats frais et nuageux utilise une construction de faible masse, hermétiquement fermée et bien isolée pour permettre une accumulation rapide de chaleur le matin.
Équipements et technologie	Les appareils de chauffage ou les chaudières à haut rendement (au moins énergie Star) devraient s'avérer rentables dans le climat froid.
	Les stores isolants, les draperies lourdes ou les volets de fenêtre actionnables aideront à réduire les pertes de chaleur pendant la nuit d'hiver s'ils sont contrôlés automatiquement.

Source : auteur via Climate Consultant 6.0

IV.3 Approche morphologique de la ville de Guelma

IV.3.1 Processus de formation du tissu urbain de la ville de Guelma

Nous allons dans ce qui suit revenir sur les différentes étapes de développement urbain de la ville, depuis ses origines antiques, jusqu'à son état actuel. Il s'agira de mettre en lumière la configuration de l'espace urbain de Guelma.

- **Des vestiges romains en plein centre-ville**

La ville de Guelma, enracinée dans l'histoire ancienne, a été le berceau de plusieurs civilisations, notamment romaine, byzantine, numide et arabo-musulmane. De nombreux vestiges témoignent de ce riche passé, en particulier ceux de la période romaine, qui a laissé des traces indélébiles en plein cœur de la ville : théâtre romain, ruines romaine...etc. (figure 34).

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique



Figure 34 : Localisation des vestiges romains par rapport à la ville de Guelma

Source : Google Maps

- **Le centre colonial en 1858, et ces configurations typo morphologiques :**

Tout d'abord, on observe une extension progressive à partir du noyau colonial (figure 35). Jusqu'à l'accession à l'indépendance, la structure urbaine de la ville est restée relativement compacte. Le système de planification urbaine en damier présente une organisation hiérarchisée comprenant des îlots, des places et des rues successifs. La cohérence de la disposition des rues, qui repose sur le plan cadastral, acquiert une signification supplémentaire grâce à une gestion efficace, en garantissant des façades bien ordonnées le long des voies.

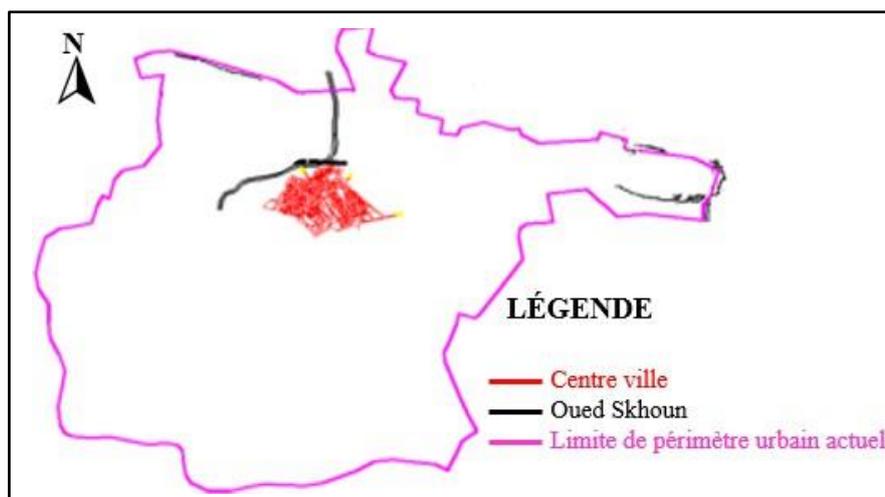


Figure 35 : La ville de Guelma en 1858

Source : DUC de la wilaya de Guelma avec interprétation de l'auteur

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

- **Guelma 1958-1963** : Guelma à l'heure de son développement, on observe que sa croissance repose sur certains points forts qui sont notamment :

Le vieux centre reste depuis toujours un lieu de résidence et de commerce.

La barrière d'oued Skhoun a disparu depuis 1962.

Extension vers l'Est concernant la Gare et l'Abattoir. Extension mineure vers le Nord-ouest au long d'oued Skhoune là où se trouve la naissance de l'habitat individuel illicite (figure 36).

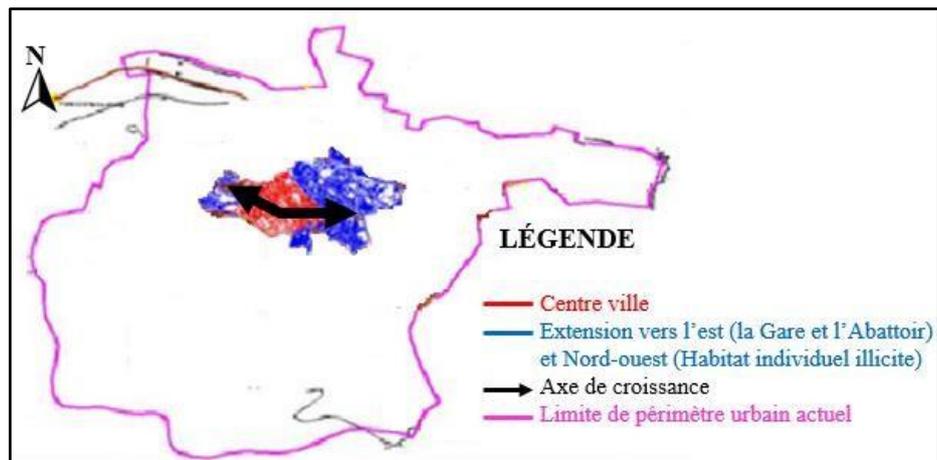


Figure 36 : La ville de Guelma en 1963

Source : DUC de la wilaya de Guelma avec interprétation de l'auteur

- **Guelma 1963-1977** : cette époque est caractérisée par :

L'apparition de Djebel Halouf dans le Sud-ouest de Guelma comme nouvelle barrière. Il y a des extensions vers toutes les directions à savoir : à l'Ouest de l'oued Skhoun où se situent les quartiers illicites et les bidonvilles. A l'Est et au Sud-est du centre-ville on trouve la naissance des habitats collectifs tels que : cité Agabi et Barra Lakhdar respectivement. Au Nord on trouve les zones industrielles (figure 37).

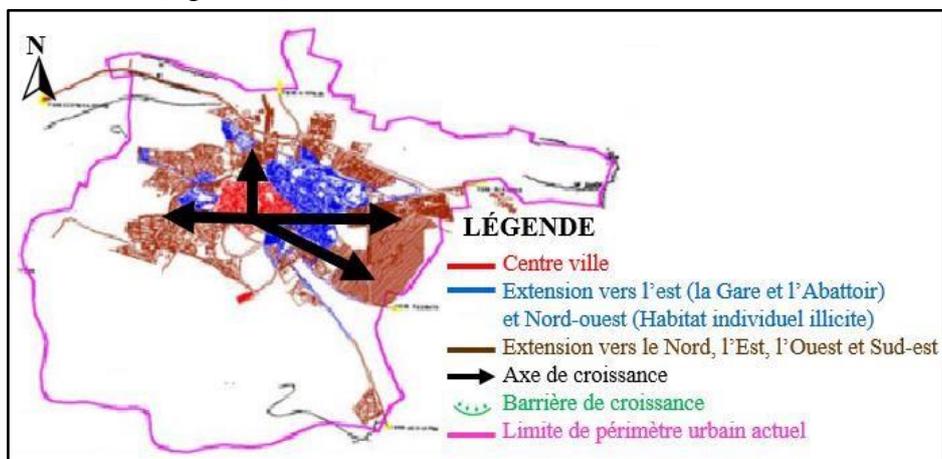


Figure 37 : La ville de Guelma en 1977

Source : DUC de la wilaya de Guelma avec interprétation de l'auteur

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

- **Guelma 1977-1997** : le schéma ci-dessous (figure 38) représente :
Extension majeure vers le Sud et le Sud-ouest concernant la cité 19 juin et l'université 08 Mai 1945, extension mineure vers l'Ouest concernant l'habitat collectif ZHUN Ain Defla et les 500 logements DNC et au Nord-est on trouve cité frères Rahabi. La présence de la barrière de forêt.

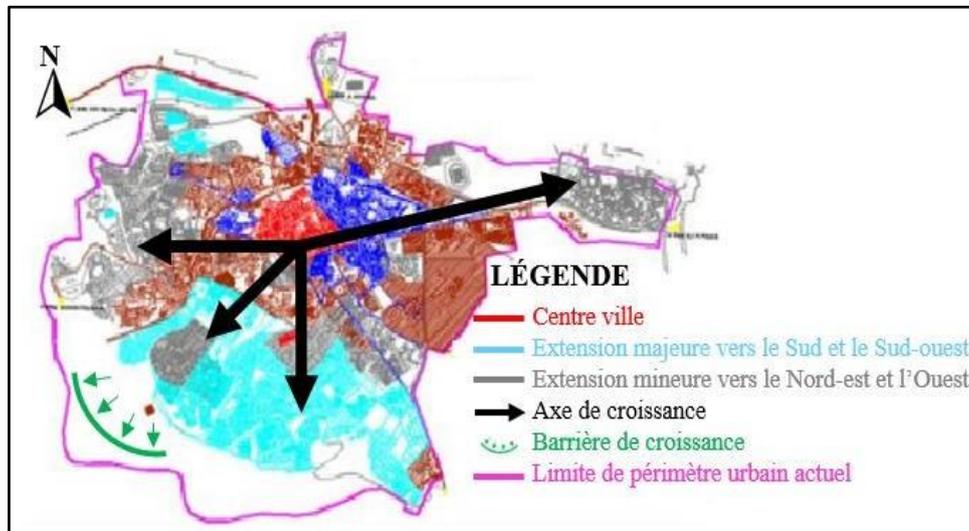


Figure 38 : La ville de Guelma en 1997

Source : DUC de la wilaya de Guelma avec interprétation de l'auteur

- **Guelma aujourd'hui** : la période actuelle se caractérise par :
Extension vers le Sud, Sud-ouest c'est l'apparition de la nouvelle ville et vers le Nord-est (figure 39). Dégradation des habitats de l'ancien centre mais le coté économique est toujours existe.

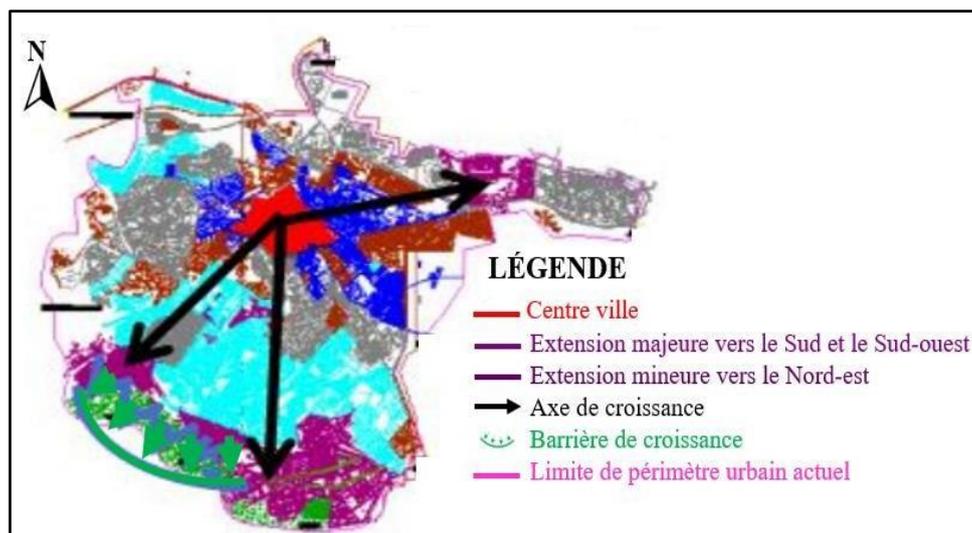


Figure 39 : La ville de Guelma aujourd'hui

Source : DUC de la wilaya de Guelma avec interprétation de l'auteur

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

IV.3.2 Aperçu sur les typologies du résidentiel collectif à Guelma :

D'un point de vue urbain, le tissu urbain de la ville de Guelma est principalement constitué de différents types de noyaux résidentiels tels que l'habitat individuel, collectif, intermédiaire, etc.

Dans la suite de notre étude, nous allons nous concentrer sur l'habitat collectif en essayant de constituer notre corpus d'analyse à partir d'échantillons représentatifs des grandes périodes de l'histoire urbaine. L'objectif est d'évaluer la capacité de chaque type à générer de l'énergie.

À Guelma, l'urbanisme collectif a commencé à façonner l'aménagement urbain de la ville dès l'époque coloniale française (1832-1962), en adoptant des formes architecturales qui témoignent des réalités politico-économiques de cette période :

L'immeuble de rapport ou l'habitat collectif en îlot : il s'agit d'immeubles classiques édifiés, à partir de 1850, et implantés selon un alignement urbain rigoureux. Ce genre d'habitat collectif, connu sous le nom d'immeuble de rapport", avait pris l'ascendant en tant que forme urbaine prédominante à la fin du XIXe siècle et au cours des premières moitié du XXe siècle. Plusieurs immeubles représentent une composante fondamentale du centre-ville de Guelma. En raison de leur nombre et de leur densité, ces édifices ont un rôle significatif dans le tissu urbain et l'aspect architectural de la ville (figure 40a). L'architecture, la densité et la hauteur des bâtiments ont un impact significatif sur la forme du paysage urbain et sur les dynamiques de circulation. Leur agencement peut également être très influent sur leurs performances énergétiques.

Les grands ensembles après la seconde guerre mondiale : issu du plan de Constantine et conçue principalement pour la population locale, ils apparaissent à partir des années 1950, dans le cadre des HLM (habitat à loyer modéré). Leur architecture se caractérise par des structures répétitives et des solutions techniques simplifiées. A Guelma leur hauteur peut atteindre R+7 (figure 40b) suivant à la lettre de la charte d'Athènes avec des plans de masse similaires, faisant largement appel à la préfabrication.



(a)

(b)

Figure 40 : Habitat collectif en îlot (immeuble Ali Chouchana) (a) et habitat à loyer modéré (b) à Guelma

Source : Auteur

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

Après l'Indépendance, l'idéologie moderniste prend de plus en plus d'ampleur dans le domaine de l'urbanisme. Des solutions à l'insuffisance des logements sont explorées en s'inspirant des pratiques d'urbanisme françaises, notamment en reproduisant le concept de plan sans rue, caractéristique de l'urbanisme moderne. Sur le plan typologique, cela se traduit par :

Les grands ensembles issus des programmes planifiés (ZHUN) : type d'habitat collectif réalisé à Guelma à partir des années 1970. Il se caractérise par l'implantation de barres répétitives groupées en quantité sur de grandes parcelles en moyenne périphérie. Le nombre de niveaux des bâtiments variait entre quatre et cinq étages. Ces quartiers constituent ainsi l'archétype parfait des principes de l'urbanisme modernes à l'image du quartier Guehdour Taher (figure 41a), Cité Agabi (figure 41b), Cité frère Saadane (dit Foujeroule) ...etc.



Figure 41 : Cité Guehdour Taher (a) et cité Agabi (b) à Guelma

Source : Auteur

A Guelma comme ailleurs en Algérie, les nouvelles tendances de l'urbanisation et les méthodes concrètes de leur mise en œuvre vont métamorphoser le paysage urbain de la ville, notamment par l'introduction de deux nouvelles formes de logements collectifs qui sur un plan morphologique tendent à rompre avec le plan sans rue des époques précédente avec une configuration tendant à retrouver de plus en plus de densité ou en reproduisant des configurations proche de l'îlots de hauteurs moyenne de 5 étages ou bien en optant pour la hauteur ces dernières années dans le cadre programme AADL allant à 9 étages. On peut regrouper les typologies actuelles dans les catégories suivantes :

Les ensembles issus de l'intervention publique ou privé à cadre sociale : émergés dans les années 1990, ils se distinguent par une variété esthétique limitée malgré quelques ajouts architecturaux. Ces ensembles, situés en moyenne périphérie, sont conçus par des bureaux d'études privés et réalisés par de petites entreprises dans le cadre de plusieurs formules d'habitat initié par l'état à caractère sociale pour différentes catégories socio-professionnel. Ce genre d'habitat, qui représente une part importante des programmes de logement jusqu'à présent, se caractérise par des configurations similaires à celles des îlots, avec une tendance croissante vers la compacité et la densité.

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

Il tend à reprendre les alignements avec les voies pour retrouver la rue. La cité Khalla ou encore le quartier Amir Abdel-Kader...etc. et bien d'autres sont de quartier construit dans cette logique.

Les grands programmes planifiés : apparus après les années 2000, ces ensembles se situent en périphérie sur des terrains dédiés principalement à des immeubles plutôt haut entre (R+6) - (R+9), ils logent des résidents aux revenus moyens à faibles, gérés par l'Agence d'amélioration et de développement du logement (AADL). Le quartier 1100 Pos Sud ou encore la nouvelle ville Hdjer Mengoub (figure 42) sont construits sous cette logique. Ils suivent un modèle architectural et des procédures similaires, souvent construits avec l'aide d'entreprises étrangères (chinois, turques), apportant leur expertise dans la construction de bâtiments de grande hauteur.



Figure 42 : La nouvelle ville AADL à Hdjer Mengoub

Source : Auteur

IV.3.3 Sélection des Cas d'étude

L'identification des divers types d'habitat urbain collectif à Guelma a abouti à la constitution d'un corpus d'analyse pertinent (figure 43). Des critères spécifiques seront utilisés pour identifier les archétypes pertinents, en prenant en considération à la fois la fréquence des typologies dans le tissu urbain et les variations morphologiques significatives entre elles. D'autres critères ont également été pris en compte, tels que la superficie des quartiers, leur configuration, la densité urbaine, ainsi que la forme et la hauteur des bâtiments.

À la suite de cette analyse, il a été possible d'identifier trois formes urbaines différentes, chacune symbolisant un modèle significatif dans le développement du tissu résidentiel à Guelma. Ces trois spécimens urbains revêtent une importance particulière pour notre recherche car ils mettent en lumière les variations clés des agencements urbains qui ont un impact direct sur les aspects morphologiques et énergétiques.

Chapitre 04 : Guelma contexte urbain et climatique

Le premier archétype représente le modèle de l'immeuble coloniale produit à l'arrivée des colons avec de forte densité et des hauteurs modérées, offrant une forme urbaine relativement compacte.

Le deuxième archétype se distingue par une faible densité une organisation plutôt diffuse, avec des bâtiments de hauteur intermédiaire, typique des quartiers ZHUN en expansion rapide.

Enfin, le troisième archétype se caractérise par une densité moyenne et des bâtiments de hauteur moyenne, souvent construits dans un contexte de forte urbanisation, avec un impact significatif sur l'occupation de l'espace.

Ces trois formes urbaines sont cruciales pour comprendre comment les variations morphologiques influencent l'intégration des énergies renouvelables et la durabilité énergétique dans le contexte spécifique de Guelma.

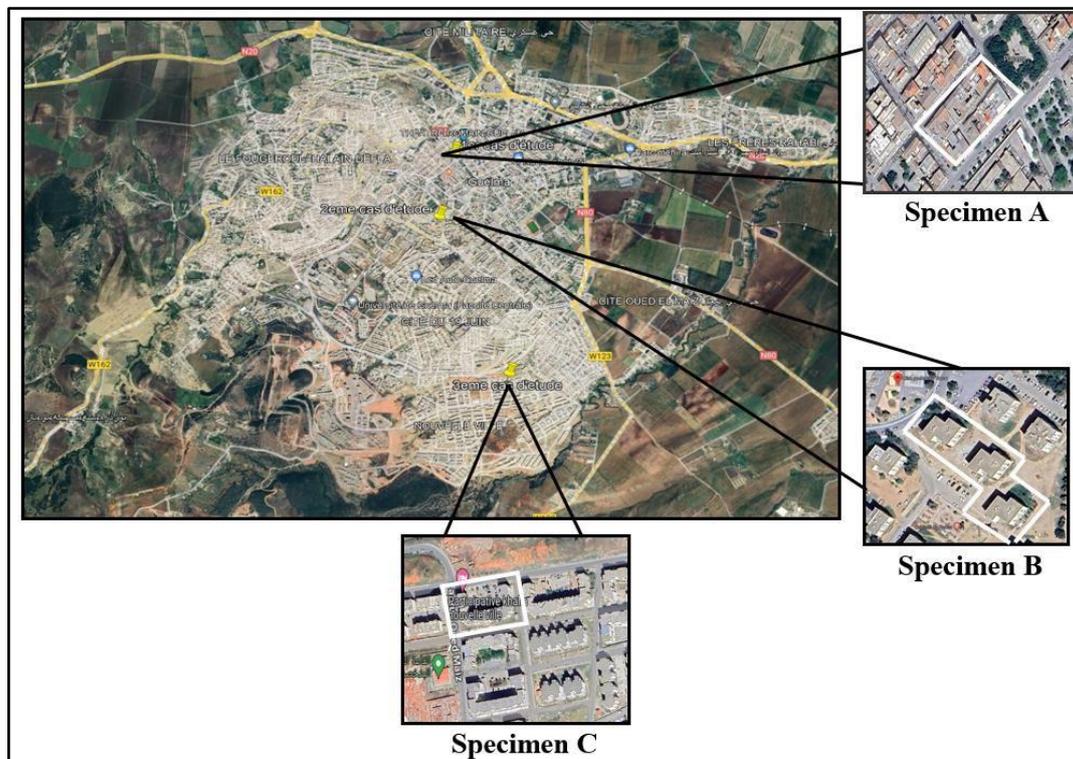


Figure 43 : La localisation de notre corpus d'analyse par rapport à la ville de Guelma

Source : Google Earth avec l'interprétation de l'aut

CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons identifié la ville de Guelma comme le cadre d'étude adéquat pour notre recherche. Ce choix a été déterminé à la suite d'un processus de sélection prenant en considération divers critères tels que la disponibilité d'une importante source d'énergie solaire, les variations climatiques entre l'hiver froid et l'été chaud, ainsi que d'autres critères associés aux zones résidentielles collectives.

Tout d'abord, une présentation de la ville a été réalisée. Cette dernière a abordé divers aspects tels que l'histoire, la géographie, l'économie, etc.

En second lieu, nous avons examiné la climatologie de la wilaya, où une analyse bioclimatique sera réalisée à l'aide du logiciel *Climate Consultant*, aboutissant aux recommandations générées par ce dernier.

Cette étude environnementale a souligné l'impératif pour la municipalité de promouvoir l'adoption des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire, pour encourager le développement d'un marché des technologies solaires.

En conclusion, nous avons examiné la transformation urbaine de la ville de Guelma, marquée par la succession de diverses formes d'urbanisation. Elle se caractérise par trois phases majeures d'urbanisation (précoloniale, coloniale, post-coloniale). La classification des diverses catégories de logements urbains à Guelma nous permet d'établir le corpus d'analyse, qui est présenté en tant que dernière partie dans ce chapitre.

Chapitre 5,

Matériels Et Méthodes

INTRODUCTION

Une méthodologie de travail peut être définie comme un ensemble de directives à suivre pour atteindre le succès, ou, d'un point de vue différent, comme l'approche adoptée pour résoudre un problème. Elle perçoit un lien entre la revue de littérature et l'étude menée dans le cadre de la recherche.

Ce chapitre présente de manière détaillée la méthodologie adoptée ainsi que les outils utilisés dans notre étude de cas. Il est primordial de commencer par exposer en détail le processus de constitution du corpus d'analyse, ainsi que l'identification des facteurs typo-morphologiques les plus significatifs pour notre étude. Ces indicateurs, qui définissent la configuration spatiale des zones urbaines, jouent un rôle essentiel dans cette recherche.

Ces paramètres ont été sélectionnés suite à une analyse approfondie de la littérature scientifique en raison de leur impact significatif sur le potentiel solaire de l'échantillon étudié. De plus, la présentation des données de consommation énergétique issues de la société de distribution d'électricité et de gaz pour les trois formes urbaines sélectionnées enrichit notre compréhension, fournissant ainsi une base solide pour la modélisation énergétique urbaine.

La recherche se poursuivra en calibrant les modèles sélectionnés afin d'améliorer la précision des résultats. Ensuite, elle procédera à une évaluation de l'efficacité énergétique des différentes configurations urbaines en comparant les performances des panneaux photovoltaïques avec celles des panneaux hybrides, afin de justifier le choix de la technologie solaire étudiée. Le chapitre présentera également la sélection du type de panneau solaire hybride, ainsi que ses caractéristiques électriques et thermiques.

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

V.1 Processus analytique

Le cadrage méthodologique effectué dans le chapitre 3 consolidé par la contextualisation climatiques et urbaine de notre terrain d'intervention (chapitre 4) nous ont permis de définir le processus méthodologie le plus approprié à cette recherche. L'approche retenue pour le présent papier est donc la méthode de quantification énergétiques sur une géométrie 3D (figure 44). Cette méthode offre des possibilités précieuses pour étudier de nombreux critères de performance solaire.

Dans cette perspective, notre approche retenue est la suivante :

- 1- Choisir les cas à étudier.
- 2- Élaborer le modèle tridimensionnel du cas étudié en utilisant des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).
- 3- Collecter et analyser les données météorologiques du site à l'aide du logiciel de simulation en utilisant les modèles CAD.
- 4- Saisir les données d'entrée tout en procédant à l'étalonnage des modèles.
- 5- Déterminer l'énergie solaire totale incidente reçue par l'enveloppe des bâtiments en utilisant des logiciels de simulation.
- 6- Intégrer et modéliser chacune des technologies solaires utilisées.

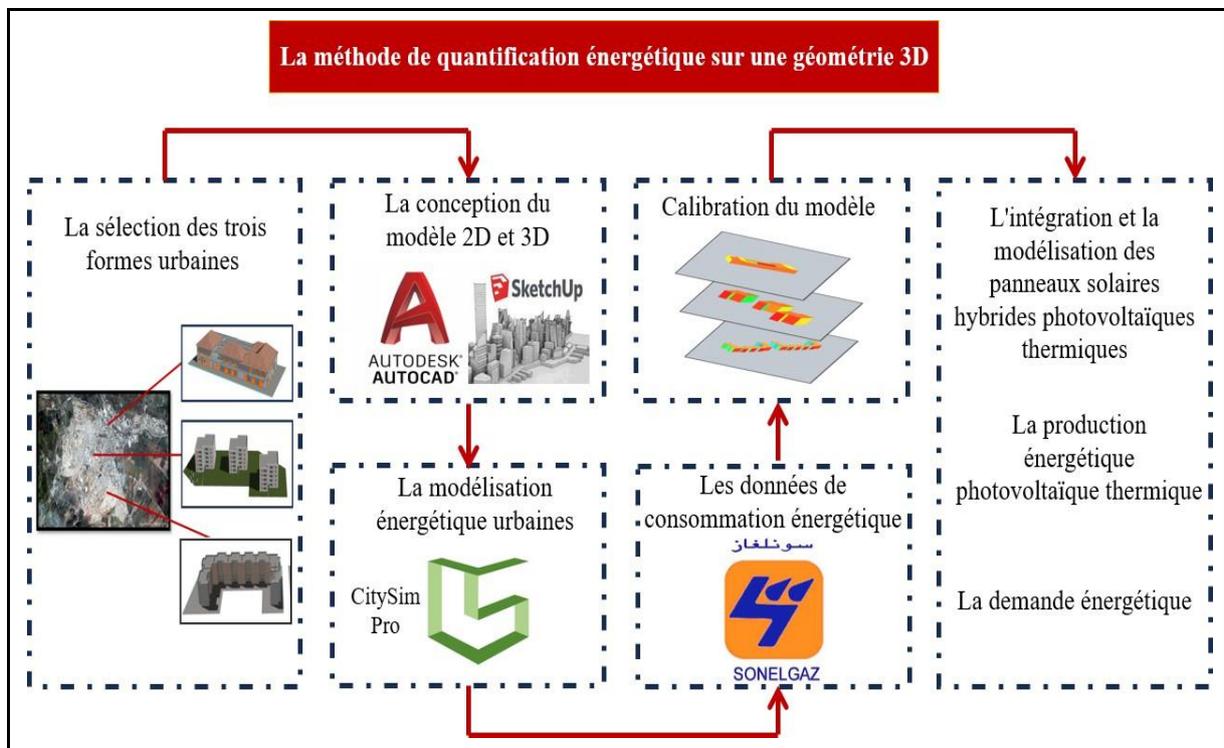


Figure 44 : Schéma représentatif de la méthodologie de notre étude

Source : Auteur

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

Dans cette perspective, l'approche méthodologique débutera par le choix de trois types distincts de formes urbaines résidentielles collectives situées dans la ville de Guelma. Par la suite, les trois modèles urbains sont élaborés en utilisant l'outil de simulation énergétique des bâtiments urbains CitySim Pro. Le processus débute par la modélisation des formes géométriques urbaines en 3D à l'aide d'AutoCAD et SketchUp. Ensuite, le modèle 3D ainsi créé est transféré dans CitySim Pro. Dans cette étape, il est impératif d'intégrer toutes les données relatives aux bâtiments et au climat du site en utilisant Météonorm 7.2. En outre, nous allons calculer l'énergie solaire globale incidente reçus par l'enveloppe des bâtiments sur CitySim Pro, tout en effectuant l'étalonnage des modèles choisis.

En fin, nous allons incorporer et modéliser les technologies solaires appliquées sur les toitures des bâtiments examinés, puis calculer la production d'énergie de ces technologies solaires par rapport à la surface globale des enveloppes des bâtiments étudiés (Harbi et al., 2024).

V.2 Elaboration du corpus d'analyse

L'analyse morphogénétique présentée dans le chapitre précédent a mis en évidence que le développement du tissu urbain de la ville de Guelma est largement attribuable à la prolifération de projets résidentiels de différentes typologies, notamment des immeubles collectifs. Cependant, la morphologie urbaine de ces ensembles a connu des changements au fil des décennies, sous l'influence des décisions politiques urbaines et des contextes sociopolitiques rencontrés par le pays entre 1832 jusqu'à nos jours. Toutefois, notre étude vise à révéler le potentiel de ces formes urbaines à intégrer les énergies renouvelables dans la production d'énergie. Pour ce faire, il est essentiel de constituer un échantillon représentatif des formes urbaines développées à Guelma. Nous concentrerons notre analyse sur trois formes urbaines spécifiques, sélectionnées comme archétypes représentatifs de l'évolution du résidentiel collectif dans la ville. Ces archétypes fourniront une base solide pour évaluer la capacité des structures urbaines existantes à répondre aux exigences contemporaines en matière de durabilité énergétique

V.2.1 Présentation des spécimens choisis

- **Spécimen A : L'immeuble de rapport type colonial.**

Pour cet archétype nous avons opté pour l'exemple des bâtiments Ferchichi (spécimen A) de latitude (36°27'53.15"N) et longitude (7°25'45.30"E).

Érigés en 1850, le spécimen A constitué un archétype des formes urbaine qui façonnent le cœur du centre-ville de Guelma (figure 45). Il se compose d'îlots monoblocs en R+1 avec une toiture en pente couverte de tuile, présentant deux niveaux distincts : des commerces au rez-de-chaussée et quatre à six logements au étages, accessibles par des galeries bordant une cour centrale. Cette dernière est atteignable par une cage d'escalier menant à un WC collectif et à une cave semi-enterrée.

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

L'îlot en question comprend, 25 logements, avec des bâtiments mitoyens et alignés les uns aux autres (figure 46). Il est bordé par une voie principale à l'est et au sud-est, tandis que ses différentes parties sont desservies par des voies secondaires. L'aire d'étude est ponctuée de nombreuses ouvertures et bénéficie d'une fréquentation importante, étant bien desservie par des voies secondaires et la route principale périphérique. Les parcelles présentent une forme régulière, adaptée à la configuration générale des îlots et au tracé des voies, témoignant de leur stabilité et de leur conformité aux réglementations en vigueur.

Le tableau ci-dessous (tableau 8) est présenté une fiche technique de ce spécimen.

Tableau 8 : Fiche technique du spécimen A

Forme urbaine	Type architectural
 <p>Figure 45 : La forme urbaine de spécimen A</p> <p>Source : Google Earth</p> <p>Système bâti : planaire.</p> <p>Trame viaire : en résilie sous forme de damier hiérarchisée.</p> <p>Vide urbain : inclus dans le système bâti, ponctuel sous forme de cours de services.</p>	 <p>Figure 46 : La façade urbaine de spécimen A</p> <p>Source : Auteur</p> <p>Un style architectural néo-classique avec un RDC commerciale, un étage et une toiture en pente couverte de tuile rouge.</p> <p>Les parois extérieures sont composées de mortier de chaux, de pierre de taille de 40 cm et de plâtre.</p>

Source : Auteur

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

- **Spécimen B : Les grands ensembles issus des programmes planifiés (ZHUN).**
L'exemple de cité Guehdour Tahar (spécimen B) de latitude (36°27'31.76"N) et longitude (7°25'40.04"E).

La zone d'étude ZHUN Guehdour Taher (forme urbaine B) occupe une position centrale dans le périmètre urbain de la commune de Guelma (figure 47), ce qui lui confère un caractère stratégique en tant que point de passage clé pour toute l'agglomération Guelmis. Ces blocs, érigés en 1980, se composent de cinq niveaux distincts avec une couverture plate, chacun abritant trois logements (figure 48). L'accès à ces logements se fait par des cages d'escalier facilitant la circulation verticale. Le spécimen B comprend 45 logements.

La ZHUN dispose d'une faible densité issue de la doctrine du plan sans rue de l'urbanisme moderne. La voirie dans cette aire d'étude semble être la composante principale des tissus par son ampleur ; la hiérarchisation de celle-ci n'est pas apparente sans alignement recherchés avec le bâti. Dans certains endroits, l'accessibilité aux bâtiments est très difficile. Les voies délimitent les grands ilots sans y pénétrer réellement. Le parcellaire de la ZHUN se caractérise par une forme indistincte, rendant difficile l'identification d'une trame parcellaire claire et précise. Le tableau ci-dessous (tableau 9) est présenté une fiche technique de ce spécimen.

Tableau 9 : Fiche technique du spécimen B

Forme urbaine	Type architecturale
 <p>Figure 47 : La forme urbaine de spécimen B Source : Google Earth</p>	 <p>Figure 48 : La façade architecturale de spécimen B Source : Auteur</p>
<p>Système bâti : ponctuel discontinue. Trame viaire : sans rue non hiérarchisé. Vide urbain : continue avec un caractère résiduel, et plus important que le bâti.</p>	<p>Un type architectural en R+4 avec toiture plate et un façade asymétrique minimaliste. Les parois extérieures sont composées de (mortier de ciment + brique creuse 15 cm + vide espacement (Lame d'air) 5 cm + brique creuse 10 cm + plâtre).</p>

Source : Auteur

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

- **Spécimen C : Les ensembles issus de l'intervention publique ou privé à cadre sociale.** L'exemple de cité Yahia Magh mouli POS Sud (spécimen C) de latitude (36°26'39.79"N) et longitude (7°26'5.51"E).

La troisième zone d'étude (spécimen C) se situe à la périphérie Sud de la ville (figure 49). Elle constitue des blocs construits en 2010 et qui sont composés de sept niveaux bien distincts contenant deux (02) logements en chaque étage (figure 50). Ces derniers sont accessibles par des cages d'escalier qui permettent la circulation verticale.

Le spécimen C comprend 72 logements. L'aire d'étude dispose d'une moyenne densité du bâti par rapport à la surface du foncier.

La voirie dans cette aire d'étude se caractérise par un système linéaire où le bâti tend à s'aligner au maximum avec les voies tentant de recréer la forme d'un îlot. Les formes des parcelles dans notre aire d'étude sont généralement trapézoïdales et rectangulaires.

Le tableau ci-dessous (tableau 10) est présenté une fiche technique de ce spécimen.

Tableau 10 : Fiche technique du spécimen C

Forme urbaine	Type architecturale
 <p>Figure 49 : La forme urbaine de spécimen C Source : Google Earth</p> <p>Système bâti : linéaire avec une continuité frontale tendant vers la planaire.</p> <p>Système Viaire : en resille hiérarchisées.</p> <p>Vide urbain : un vide continue mais hiérarchisé/Vide ponctuel.</p>	 <p>Figure 50 : La façade architecturale de spécimen C Source : Auteur</p> <p>Un type architectural en R+6 toiture plate, tendant vers la symétrie.</p> <p>Les parois extérieures composées de (mortier de ciment + brique creuse 15 cm + vide espacement (Lame d'air) 5 cm + brique creuse 10 cm + plâtre).</p>

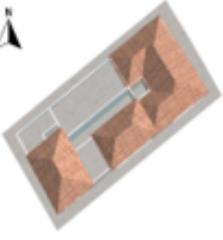
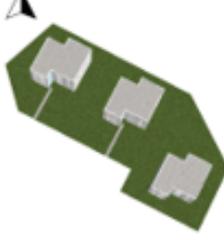
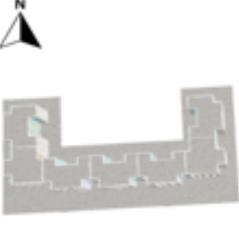
Source : Auteur

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

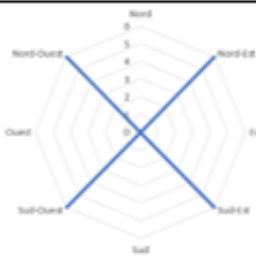
V.2.2 Métriques typo-morphologique du corpus d'analyse

Après avoir identifié les facteurs typo-morphologiques les plus pertinents à la lumière de l'examen de la littérature, nous allons les appliquer à notre cas d'étude pour identifier les métriques et indicateurs clés qui permettront d'évaluer l'efficacité énergétique des formes urbaines sélectionnées (tableau 11).

Tableau 11 : Les facteurs typo-morphologiques des trois formes urbaines

Echelle	Facteur typo-morphologique			
Urbaine	Surface de l'air d'étude	1719	4218	5992
	Couverture de site %	0,8	0,2	0,4
	Nombre de bâtiment dans l'air d'étude	06	03	01
	Nombre de logement dans l'air d'étude	25	45	72
	La densité (m ³ /m ²)	7,85	3,70	5,56
	Le coefficient d'occupation du sol (COS)	2,61	4,05	5,4
	Surface de tous les bâtiments	1375	1107	3223
	Surface des panneaux hybrides (m ²)	107,8	164,64	127
	Compacité (m ² /m ³)	0,13	0,27	0,18

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

Orientation de l'axe longitudinal	NE-SO	NE-SO	E-O
Orientation des façades			
Largeur de la rue (m)	06	06	09
Espace vert (m ²)	400	506	225
Rapport H/L	0,84	1,39	1,75
Volume (m ³)	11000	16937,1	44640
Surface des planchers (m ²)	4473,78	1602,25	5113,04
Surface des façades (m ²)	25488	3089,99	9920,16
Surface des toitures (m ²)	1518,76	1960,2	2937,59
Forme des toitures	Inclinée et plate	Plate	Plate
Surface des façades + surface des toitures (m ²)	27006,76	3416,69	12857,75
Hauteur max/Hauteur min (m)	02	01	01
Longueur (m)	18	17	71
Largeur (m)	9,5	11	11
Nombre des habitants	172	224	325
L'année de construction	1850	1980	2010

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

Enveloppe	Matériaux des murs	Mortier de chaux+ pierre de taille 40 cm + plâtre	Mortier de ciment + brique creuse 15cm + vide espacement (Lame d'air) 5cm + brique creuse 10cm + plâtre	Mortier de ciment + brique creuse 15cm + vide espacement (Lame d'air) 5cm + brique creuse 10cm + plâtre
	Matériaux des toitures	Tuiles + laine de verre	Plâtre + hourdis + Béton armé + chape et enduit de mortier (Carrelage)	Plâtre + hourdis + Béton armé + chape et enduit de mortier (Carrelage)
	Matériaux des planchers	Tuiles + laine de verre + bois + plaques de plâtre	Chape et revêtement en mortier (Carrelage) + Béton armé + hourdis (blocs creux)	Chape et revêtement en mortier (Carrelage) + Béton armé + hourdis (blocs creux)
	Valeur U des murs (w/m ² k)	3,5	1,8	1,8
	Valeur U des toitures (w/m ² k)	0,6	2,8	2,8
	Rapport de vitrage	0,1	0,35	0,25
	Transmission de vitrage	2,25	2,25	2,25
	Facteur solaire du vitrage	1	0,9	0,9
	Albédo de la façade	0,3	0,25	0,2
	Albédo de la toiture	0,3/0,2	0,2	0,2
	Albédo du plancher	0,2	0,2	0,2

Source : Auteur

V.2.3 Caractéristiques technique et propriétés physique du corpus d'analyse

Pour notre recherche sur les formes urbaines à Guelma, il est essentiel de saisir en profondeur les spécificités techniques et les propriétés physiques des matériaux de construction présents dans l'échantillon analysé. Ces facteurs ont un impact direct sur l'efficacité énergétique des constructions et leur aptitude à accueillir les sources d'énergie renouvelable.

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

Le tableau ci-dessous (tableau 12) fournit un aperçu des propriétés physiques des formes urbaines étudiées, y compris les matériaux utilisés, leurs épaisseurs, la conductivité thermique, la transmission thermique U des murs, les matériaux utilisés pour les toitures et la transmission thermique U des toitures.

Tableau 12 : Les propriétés physiques des formes urbaines étudiées

Spécimen	Date de construction	Matériaux des murs	Epaisseur [m]	Conductivité thermique [W/m-K]	Valeur U des murs [W/m²K]	Matériaux des toitures	Valeur U des toitures [W/m²K]
A	1850	Mortier de chaux	0,02	0,87	3,5	Tuiles Laine de verre	0,6
		Pierre de taille	0,40	1,40			
		Plâtre	0,02	0,40			
B	1980	Mortier de ciment	0,02	1,40	1,8	Plâtre Hourdis Béton armé Chape et enduit de mortier (Carrelage)	2,8
		Brique creuse	0,15	0,56			
		Vide (Lame d'air)	0,05	0,33			
		Brique creuse	0,10	0,56			
		Plâtre	0,02	0,40			
C	2010	Mortier de ciment	0,02	1,40	1,8	Plâtre Hourdis Béton armé Chape et enduit de mortier (Carrelage)	2,8
		Brique creuse	0,15	0,56			
		Vide (Lame d'air)	0,05	0,33			
		Brique creuse	0,10	0,56			
		Plâtre	0,02	0,40			

Source : Auteur à la base des données du manuel technique

Valorisée par le coefficient U, la transmission thermique exprime la capacité de la paroi (murs, plancher, toit, combles...) à laisser passer la chaleur d'un milieu à un autre. Elle est déterminée par l'épaisseur et la nature du matériau isolant ainsi que sa paroi d'application. C'est donc l'inverse de la résistance thermique.

La paroi ou le toit sera d'autant plus performant en termes d'isolation que la transmission thermique (U) sera faible. Le coefficient U s'exprime en [W/m²K].

V.3 Données de la consommation énergétique

Les données relatives à la consommation d'énergie des formes urbaines analysées sont exposées dans le tableau suivant (tableau 13).

Ces données proviennent de la Société algérienne de l'électricité et du gaz - Distribution, plus précisément de l'Agence commerciale : Maouna, RTE route de Constantine.

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

Les degrés-jours unifiés sont fréquemment employés par les professionnels du secteur de la performance énergétique des bâtiments afin d'analyser et de prédire l'influence du climat sur les besoins en chauffage et en climatisation. Les degrés jour sont habituellement calculés en se basant sur une température de base de 18°C (Foura & Zeroualan, 2007 ; Serbouti, 2021).

Tableau 13 : Les données réelles de la consommation énergétique dans les formes urbaines étudiées

Forme urbaine		Spécimen 01	Spécimen 02	Spécimen 03
Intensité de la consommation énergétique (KWh/m ² /An)	Electricité KWh/m ² /An	25,86	22,61	29,42
	Gas KWh/m ² /An	9,47	15,02	19,14
Energie demandée (KWh/m ³ /An)	Chauffage KWh/m ³ /An	19,83	10,75	9,62
	Climatisation KWh/m ³ /An	20,02	11,40	8,53

Source : Auteur à la base des données de Sonelgaz

L'intensité de l'énergie utilisé (EUI) est définie par l'équation suivante :

$$EUI = EU/FR \quad Eq. V-1$$

Où : EUI : représente l'intensité de l'énergie utilisée en (KWh/m²)

EU : représente la consommation énergétique des cas d'études en (KWh)

FR : la surface des bâtiments dans les cas d'étude en (m²)

L'énergie demandée (EN_v) est définie par l'équation suivante :

$$EN_v = EN/V_L \quad Eq. V-2$$

Où : EN_v : représente l'énergie demandée par volume en (KWh/m³)

EN : représente la demande du chauffage ou climatisation des cas d'étude en (KWh)

V_L : représente le volume des bâtiments dans les cas d'étude en (m³) (Zhong et al., 2021)

V.3.1 Saison de chauffage et de climatisation

L'introduction de la méthode des degrés-jours (DD) remonte à la fin des années 1920, elle vise à évaluer les exigences mensuelles et annuelles en termes de chauffage et de refroidissement des bâtiments (Said et al., 2003). Cette méthode est largement employée pour évaluer les besoins en chauffage et en climatisation des bâtiments.

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

Elle est perçue comme un outil simple permettant d'évaluer la sévérité moyenne de l'hiver (en termes de besoins en chauffage) ou de l'été (en termes de besoins en climatisation) des bâtiments pour chaque région (Papakostas et al., 2005). Les degrés-jours de chauffage (HDD) sont définis comme un facteur qui indique les besoins de chauffage en [$^{\circ}\text{C}$ jours] :

$$\text{HDD} = \sum \text{days} (T_b - T_{\text{out}})^+ \quad \text{Eq. V-3}$$

Les degrés-jours de refroidissement (CDD) définis comme un facteur qui indique les besoins de refroidissement en [$^{\circ}\text{C}$ jours] :

$$\text{CDD} = \sum \text{days} (T_{\text{out}} - T_b)^+ \quad \text{Eq. V-4}$$

Où : T_b : représente la température de base, très proche de la température de confort de la pièce.

T_{out} : est la température moyenne journalière de l'air extérieur.

Le signe plus au-dessus des parenthèses indique que seules les valeurs positives doivent être prises en compte.

La saison de chauffage est définie par la période pendant laquelle les HDD sont supérieurs aux CDD, tandis que la saison de refroidissement est l'inverse.

Pour la ville de Guelma, la saison de chauffage s'étend du 10 octobre au 10 mai, avec 212 jours. La saison de refroidissement correspond au reste de l'année, comme le montre le graphe (figure 51).

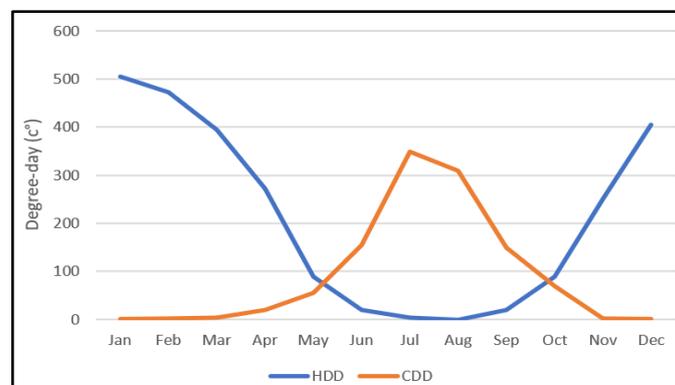


Figure 51 : Degrés-jours de chauffage (HDD) et de climatisation (CDD) dans la ville de Guelma

Source : Données climatiques de (Météonorm 7.2) avec l'interprétation de l'auteur

Après avoir interprété le graphique, nous constatons que :

HDD et CDD sont égaux le 10 mai et le 10 octobre avec une valeur de 78 et 85 (C°) respectivement.

La saison de chauffage a atteint son maximum le 21 janvier à 4 heures du matin, avec une valeur HDD de 505 (C°).

La saison de refroidissement atteint son maximum le 21 juillet à 14 heures, avec une valeur CDD de 350 (C°).

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

V.4 Modélisation énergétique des bâtiment urbaine (UBEM)

L'outil sélectionné pour notre étude est CitySim Pro. Cet outil est disponible gratuitement selon [Kämpf \(2009\)](#). Toutefois, il est indispensable d'avoir une connexion pour pouvoir utiliser les fonctionnalités d'importation et d'exportation. Élaboré à partir du solveur CitySim, mis au point au sein du Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment de l'EPFL (École polytechnique fédérale de Lausanne). De plus, CitySim a reçu la certification de l'IEA BESTEST, comme mentionné par [Walter et Kämpf en 2015](#). CitySim Pro représente une interface graphique utilisateur élaborée dans le but de modéliser et d'améliorer la durabilité des agglomérations urbaines. CitySim se distingue par sa rapidité, sa fiabilité et sa faible consommation de données par rapport à d'autres moteurs de simulation. Ces caractéristiques ont été validées avec succès lors de tests comparatifs avec des outils de surveillance de l'énergie, et sont disponibles dès les premières phases de la conception ([Albdour & Balint, 2019](#)).

CitySim Pro représente un modèle de simulation de l'énergie urbaine capable de modéliser le rayonnement solaire et les interactions radiatives entre les parois des bâtiments adjacents, les surfaces au sol et l'environnement, à différentes échelles allant d'un quartier à une ville entière. Il intègre des modèles de rayonnement, de conversion d'énergie et de comportement stochastique pour analyser l'équilibre énergétique entre l'intérieur et l'extérieur ([Mutani et al., 2016](#)). À intervalles réguliers, CitySim Pro calcule les flux de rayonnement à ondes courtes et à ondes longues en se basant sur un algorithme simplifié de radiosité. Le modèle thermique implémenté dans CitySim Pro effectue le calcul des flux de chaleur en se basant sur un réseau des résistances et des condensateurs, en plus d'un système d'alimentation en énergie ([Robinson, D, & Stone A, 2007](#)). Les trois modèles urbains sont élaborés en utilisant le logiciel de conception 2D AutoCAD, avec une représentation spécifique des formes géométriques urbaines en 3D dans SketchUp. Ensuite, le modèle tridimensionnel est intégré dans le logiciel CitySim Pro (figure 53), qui exige l'intégration de toutes les données relatives au climat du site et aux bâtiments via Météonorm 7.2.

V.4.1 Modélisation énergétique par Citysim Pro

Nous avons opté pour cet outil en raison de ses nombreux avantages et de sa capacité à répondre aux spécificités de notre étude. Cette étude se concentre sur la modélisation des besoins énergétiques, en particulier en ce qui concerne le chauffage, la climatisation et la production d'énergie. Les bénéfices de cet outil ne se limitent pas aux paramètres de performance énergétique urbaine, mais englobent également la capacité de l'outil à prendre en compte l'inter-réflexion solaire dans les zones urbaines. Lorsque vous lancez le logiciel, la fenêtre principale s'affiche, montrant l'interface utilisateur graphique (IUG) de Citysim Pro (figure 52). La fenêtre principale est divisée en trois zones :

- Fenêtre des données d'entrée, où les données d'entrée doivent être insérées.

Cette fenêtre contient :

Les propriétés du quartier, tels que les données météorologiques au format de fichier (cli) et l'horizon de la région sélectionnée.

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

Les propriétés du bâtiment, tels que la valeur du renouvellement d'air par heure (-h), la température minimale et maximale autorisée à l'intérieur du bâtiment (°C), le dispositif d'ombrage représentant la transition harmonieuse entre l'état ouvert et l'état fermé des stores, et l'irradiance de coupure (W/m^2).

Composite et insolation, tels que l'épaisseur et les couches des murs, des planchers et des toits. Le logiciel permet de modifier les composites ou d'en créer de nouveaux en redéfinissant les matériaux et les propriétés physiques des matériaux (conductivité thermique, chaleur spécifique, etc.) dans le fichier XML de la bibliothèque du logiciel en utilisant des programmes qui permettent cette tâche compliquée comme Notepad++.

Propriétés d'ouverture, tels que le ratio de vitrage sur chaque façade du bâtiment, le coefficient de transmission thermique (U) et le coefficient de transmission du vitrage (g).

Les surfaces visibles, tels que réflectance et les énergies renouvelables (PV, ST ou hybride) avec les spécificités et le type des panneaux appropriées de cette énergie.

Les occupants, tels que leurs nombre, densité et les chaleurs sensible et latente.

- Fenêtre de scène, pour visualiser la scène 3D modélisée.

Citysim Pro prend en charge les modèles géométriques conçus par des logiciels tiers qui doivent être définis en tant que fichier au format dxf.

- Fenêtre de simulation/résultats.

Après avoir importé le modèle 3D et insérer toute ces données d'entrées, la scène de simulation est maintenant composée correctement et l'étape suivante est de lancer la simulation à partir de cette fenêtre. Cette même section contient la simulation et les résultats affichés en couleur comme une moyenne dans la scène 3D.

La figure ci-dessous montre toutes les fenêtres contenues dans l'interface graphique du logiciel.

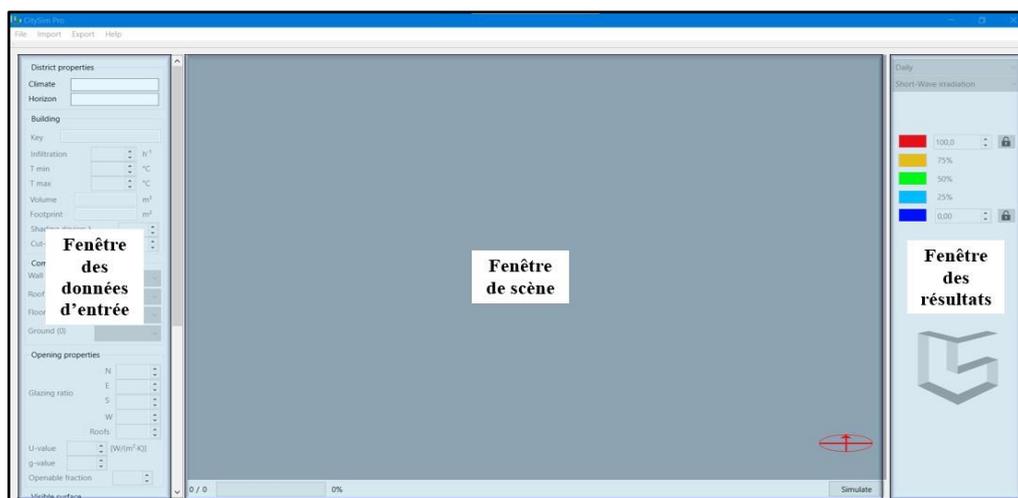


Figure 52 : L'interface utilisateur graphique (IUG) de Citysim Pro

Source : Citysim Pro avec interprétation de l'auteur

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

Les résultats peuvent être exportés vers un fichier au format csv sur une base horaire, et il fournit :

- T_a (°C) la température de l'air intérieur.
- Chauffage ; le chauffage idéal doit atteindre la température de consigne du chauffage.
- Refroidissement ; le besoin idéal de refroidissement pour atteindre la température de consigne de refroidissement.
- Q_i les gains internes comprenant les occupants, les appareils et les gains de chaleur solaire.
- Q_s les besoins de chauffage (positifs) ou de refroidissement (négatifs) satisfaits.
- \dot{V}_{Vent} (m^3/h) le débit de ventilation naturelle par les ouvertures de fenêtres.
- Stockage thermique température (°C), la température du réservoir de chaleur.
- Stockage eau chaude sanitaire température (°C), la température du réservoir d'eau chaude sanitaire.
- Stockage d'eau froide température (°C), la température du réservoir d'eau froide.
- Puissance de la machine (W) la puissance nécessaire au système de conversion d'énergie pour fournir le chauffage ou le refroidissement.
- Consommation du carburant (MJ) l'énergie consommée par le système de conversion énergétique en termes de combustible.
- Consommation électrique (kWh) l'énergie consommée par le système de conversion d'énergie en termes d'électricité déduite de la production photovoltaïque (PV).
- Production solaire thermique (J) l'énergie fournie au stock de chaleur par les panneaux solaires thermiques. La figure ci-dessous montre les trois formes urbaines constituent notre corpus d'analyse, modélisées dans l'interface graphique de Citysim.

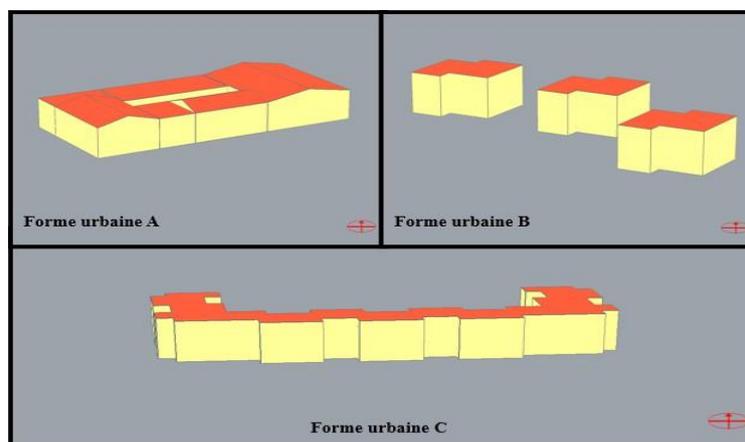


Figure 53 : Les trois formes urbaines étudiées

Source : Citysim Pro

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

V.4.1.1 Modélisation 2D par AutoCAD

Les corpus d'analyse sont modélisés à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur 2D, AutoCAD 2018, tandis que les modèles en 3D ont été modélisés à l'aide de SketchUp 2018.

AutoCAD est un logiciel développé par l'entreprise AUTODESK, située à San Raphael en Californie, depuis 1982. Les mises à jour ont été rapidement succédées, au point que depuis 2004, Autodesk publie chaque année une nouvelle version de son logiciel. Il convient de souligner que le format initial des fichiers AutoCAD, le DWG, est constamment modifié et ne permet de leur compatibilité que par ordre d'ascension. En d'autres termes, il est impossible de modifier un fichier DWG créé dans une version actuelle du programme dans une version antérieure.

AutoCAD, présenté ici dans sa version 2018 (figure 54), est une application universelle de Conception/Dessin Assisté (e) par Ordinateur. Les applications de CAO/DAO sont des outils très puissants. Le fait qu'un dessin puisse être préparé et modifié rapidement et facilement sur un ordinateur constitue un avantage considérable par rapport au dessin à la main. Grâce à AutoCAD 2018, il est envisageable de concevoir n'importe quel type de dessin. Il est recommandé d'être compétent en dessin technique afin de mieux appréhender les possibilités du logiciel. Ce logiciel extrêmement polyvalent offre la possibilité de concevoir différents éléments et objets en 2D et en 3D (figure 55). Par conséquent, il vous sera possible de créer vos propres schémas de production et des rendus réalistes de vos modèles en leur ajoutant des couleurs et des textures. En outre, il sera possible d'animer ces objets pour reproduire le fonctionnement d'un dispositif ou pour effectuer une visite virtuelle d'une habitation, par exemple.

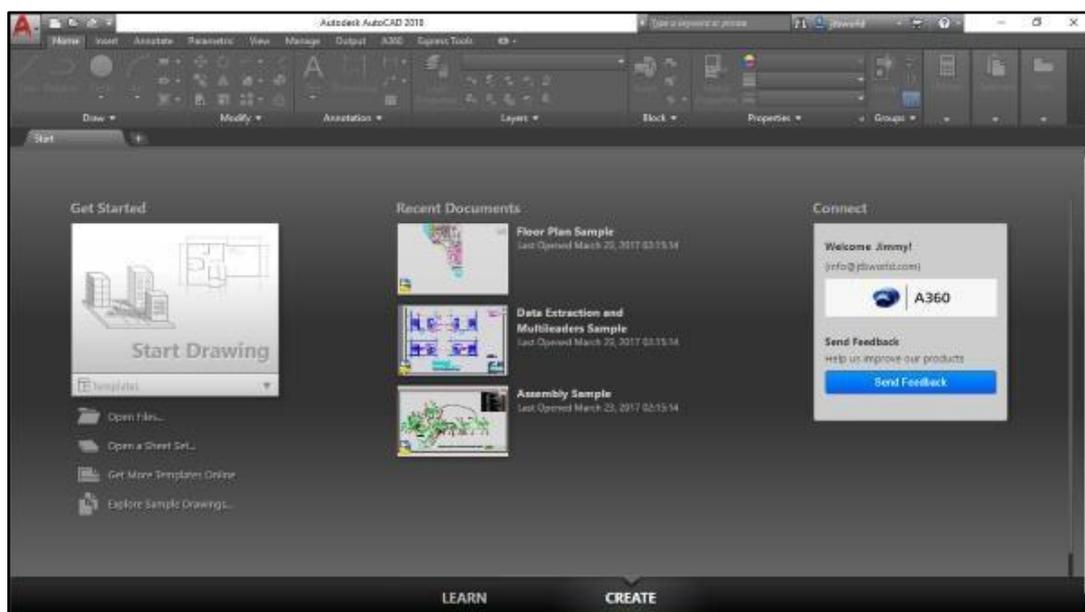


Figure 54 : Interface du logiciel AutoCAD, 2018

Source : AutoCad, 2018

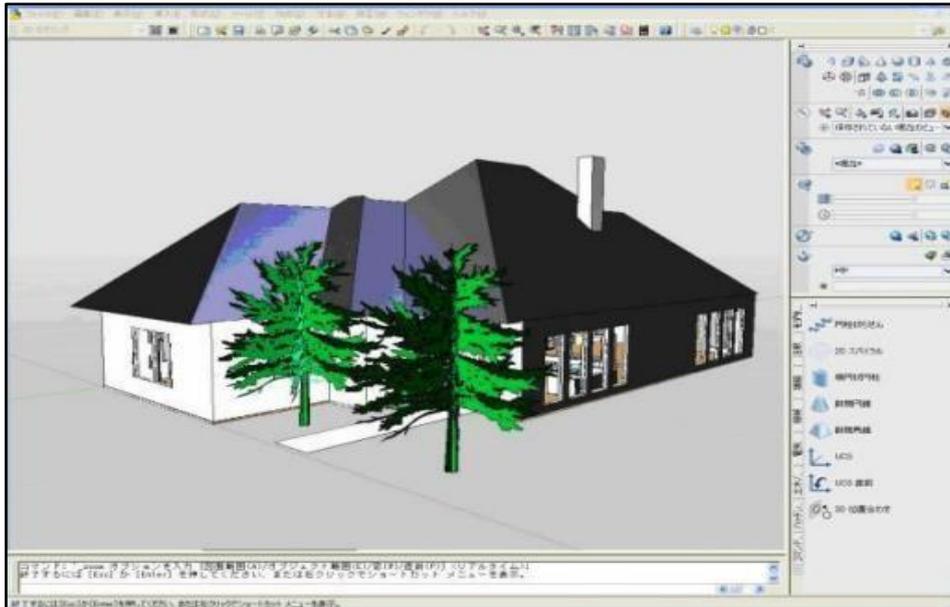


Figure 55 : Exemple de modélisation 3D par le logiciel AutoCAD

Source : AutoCad, 2018

V.4.1.2 Modélisation 3D par SketchUp

SketchUp est un logiciel spécialisé dans la modélisation 3D (figure 56). Ce terme fait référence à une représentation virtuelle d'un produit, d'un objet ou d'un espace en trois dimensions. En règle générale, les décorateurs d'intérieur offrent cette prestation à leurs clients pour leur offrir une vision d'ensemble de leur projet.

Contrairement à d'autres outils de ce genre, SketchUp se distingue par sa capacité à fournir une base de données étendue en modèles créés par les utilisateurs et par le logiciel (3D Warehouse).

Même si ce logiciel est principalement utilisé par les professionnels, des particuliers peuvent également l'utiliser. Il permet d'entreprendre divers projets en trois dimensions.

En plus de posséder cette base de données, les fonctionnalités de cet outil comprennent des options de rendu de surface et de mise en page de dessin.

Les nombreux avantages du logiciel SketchUp le placent en position de supériorité par rapport aux autres outils de modélisation disponibles sur le marché.

Parmi ces nombreux avantages, on peut citer :

- Simple d'utilisation.
- Intuitif.
- Dispose d'une version « de base » gratuite.
- De nombreuses personnes utilisent SketchUp, la communauté est donc importante.
- Dispose d'une vaste bibliothèque de modèles disponibles (3D Warehouse).

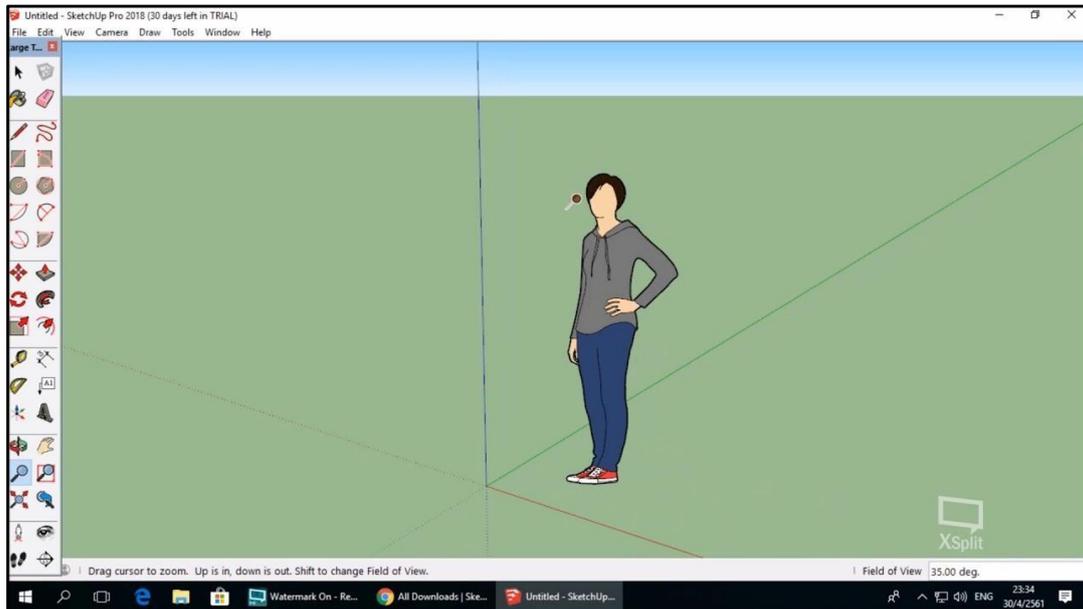


Figure 56 : Interface du logiciel SketchUp, 2018

Source : SketchUp, 2018

V.4.2 Modélisation climatique par Météonorm

V.4.2.1 Présentation du logiciel

Le logiciel Météonorm 7.2 offre une base de données météorologiques très complète provenant de stations de mesure (figure 57). Toutefois, il est également en mesure de calculer ses données pour des zones non couvertes par une station météo en réalisant une interpolation à l'aide d'algorithmes spécifiques. Il permet également de consulter les données horaires en se basant sur les moyennes mensuelles, avec une précision variable.

V.4.2.2 Bases de données

- Base de données comprenant plus de 8325 stations météo.
- Paramètres mesurés : moyenne mensuelle des rayonnements global, température, humidité, précipitation, jour avec précipitation, vitesse et direction des vents, durée d'ensoleillement.
- Période couverte : 1961 à 1990 et 2000 à 2009 pour les données de température, d'humidité, de précipitation, de vitesse du vent.
- Données de rayonnement global mise à jour pour la période 1981-2010.
- Nouveaux paramètres dérivés : pluie battante, spectre UVA/B et rayonnement érythémateux.
- Utilisation de données satellites pour région à faible densité de stations météo.
- Couvre l'ensemble du globe, y compris les régions polaires.

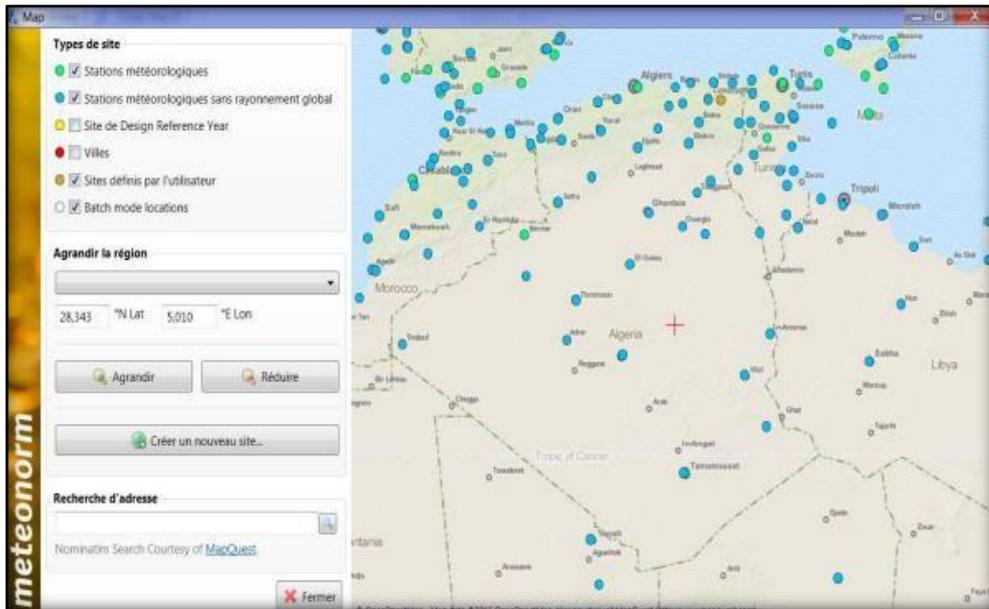


Figure 57 : Vue des stations météo algériennes disponible sur le logiciel Météonorm 7.2

Source : Météonorm 7.2

V.4.3 Calibration du corpus d'analyse

L'objectif principal de la calibration des modèles dans notre étude est de garantir la précision et la fiabilité des modèles de simulation employés pour l'estimation de la demande énergétique. Les données de consommation énergétique réelle, recueillies auprès de SONALGAZ (l'organisme chargée de superviser la consommation énergétique en Algérie), sont confrontées aux estimations de consommation énergétique générées par CitySim Pro afin de procéder à cette calibration.

Grâce à cette approche, il est possible d'évaluer la pertinence du modèle numérique et sa capacité à représenter de manière fidèle et précise le système énergétique examiné.

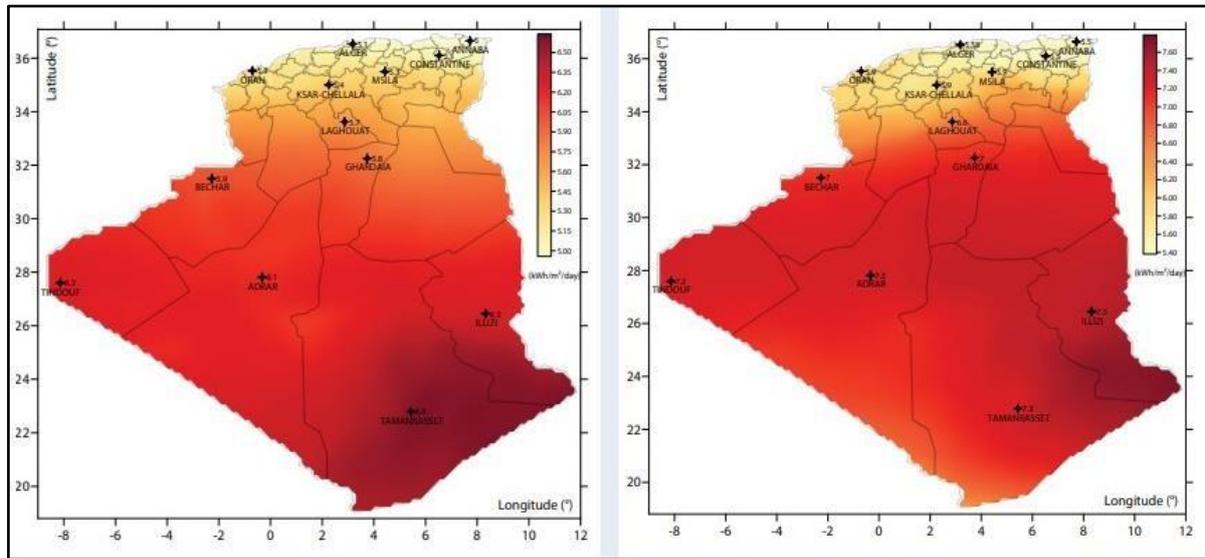
Dans notre cas d'étude, cette différence obtenue entre la consommation réelle et la consommation estimée est attendue en raison de l'utilisation des données climatiques Météonorm, qui sont des données climatiques moyennes et ne représentent pas les conditions météorologiques réelles pendant la période de mesure (Bensehla et al., 2021).

V.4.4 Choix de la technologie solaire optimale

V.4.4.1 Motivation du choix de la technologie solaire

Nous avons opté pour les technologies solaires en raison du potentiel solaire considérable en Algérie, illustré par la figure 58, grâce à sa situation géographique favorable. En effet, la durée moyenne d'ensoleillement annuelle en Algérie dépasse les 2000 heures, atteignant près de 3500 heures dans les régions désertiques. La quantité totale d'énergie reçue est estimée à 169400 TWh par an.

Chapitre 05 : Matériels et méthodes



(a)

(b)

Figure 58 : Gisement solaire (a) et rayonnement solaire directe (b) de l'Algérie reçue par jour sur une surface d'un mètre carré

Source : Centre de développement des énergies renouvelables (CDER)

V.4.4.2 Panneaux solaires hybrides PV/T versus les panneaux photovoltaïques

D'un point de vue visuel, les panneaux solaires hybrides présentent une forte similitude avec les panneaux photovoltaïques. Et pour cause : ils sont constitués en surface par des panneaux solaires PV, c'est en dessous que se situe la différence. En effet, sous la couche de cellules PV au silicium se trouve un système de récupération de l'air. Ce dernier est chauffé par les rayonnements solaires et la génération d'électricité par les panneaux.

Tableau 14 : La comparaison des technologies photovoltaïque, thermique et hybride

	Fonction	Principal avantage	Principal inconvénient	Entretien
Photovoltaïque	Produire de l'électricité	25 à 45 % d'économies sur votre facture d'électricité / revente totale pour obtenir un revenu supplémentaire	Baisse de rendement au-dessus de 25° C	Nettoyage régulier des panneaux Entretien annuel de l'ondulateur
Thermique	Produire de l'eau chaude	Réduction facture énergétique de 15 %	Risque de surchauffe en été +	Nettoyage régulier des panneaux

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

			besoin d'un autre système de chauffe-eau	
Hybride	Produire de l'électricité et de l'eau chaude	35 à 50 % d'économies sur votre facture d'électricité / production d'électricité et d'eau chaude sur une même surface	Prix très élevés	Nettoyage régulier des panneaux Entretien annuel de l'ondulateur

Source : Dualsun.com

Afin d'optimiser la conception urbaine, notre choix se porte sur les systèmes solaires hybrides. Ce système intègre à la fois des panneaux solaires photovoltaïques et des capteurs solaires thermiques, permettant ainsi la production simultanée d'électricité et de chaleur. Un panneau solaire hybride a la capacité d'exploiter la chaleur générée par les cellules photovoltaïques afin de chauffer un fluide caloporteur, qu'il s'agisse d'un liquide ou de l'air. Ceci conduit à une amélioration de l'efficacité des cellules photovoltaïques tout en exploitant l'énergie solaire pour la production d'eau chaude sanitaire ou le chauffage. Le fluide caloporteur employé dans un panneau solaire hybride à circulation d'eau (PV/ST à eau) est composé d'eau. On utilise habituellement ce procédé pour participer à la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Le fluide caloporteur utilisé dans un panneau solaire hybride vecteur air (PV/ST à air) est de l'air. On utilise généralement ce procédé pour contribuer au chauffage des locaux.

V.4.4.3 Modélisation des panneaux hybrides PV/ST retenue :

La production des panneaux solaire est un secteur émergent en Algérie où plusieurs fabricants commencent à produire des panneaux solaires localement, toutefois les systèmes hybrides sont encore au stade des expérimentations et sont très peu commercialisable (Sopian et al., 2019 ; Sundaram et al., 2022). De ce fait et afin de sélectionner le type de panneau hybride le plus approprié, nous avons entrepris une démarche visant à choisir le modèle le plus approprié à nos objectifs parmi les offres des grands fabricants.

Pour effectuer un tel choix plusieurs critères doivent être pris en considération, notamment les coûts et le retour sur investissement, la durabilité...etc. Toutefois dans le cadre de notre recherche qui est axée sur l'évaluation du rendement énergétique des différentes configurations urbaines, nous avons accordé une attention particulière au critère du rendement énergétique qui sera pris comme le principale critère de sélection.

Abora Solar conçoit, développe et fabrique le panneau solaire le plus rentable du monde (figure 59a) avec un rendement de 89 %, réalisant ainsi un record mondial certifié (Martínez-Gracia et al., 2019).

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

Le panneau solaire hybride doté de la technologie aHTech® produit la même énergie que quatre panneaux photovoltaïques. La technologie aHTech® consiste en une série de couches (figure 59b) dont la conception et la fabrication minimisent les pertes thermiques du panneau et maximisent la production d'électricité grâce au refroidissement obtenu par les cellules photovoltaïques (Penaka et al., 2020).

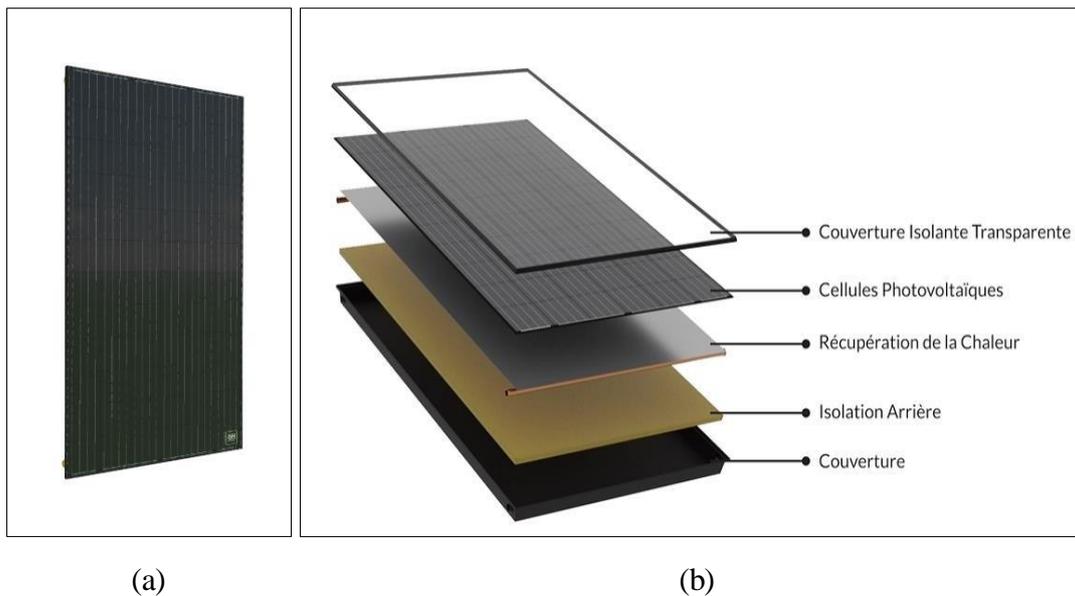


Figure 59 : Le panneau solaire hybride Abora solaire (a) est ses couches constructives (b)

Source : Abora solar.com

Ce panneau solaire hybride, en raison de leur capacité à générer à la fois de l'électricité et de la chaleur, transforment de manière efficace la lumière solaire en énergie pendant des décennies. La technologie hybride permet de produire quatre fois plus d'énergie que le photovoltaïque tout en nécessitant un espace restreint. L'installation de ce panneau permet de réaliser des économies d'énergie d'environ 70% dès le premier jour de mise en service du système solaire.

Ce panneau hybride a des propriétés géométriques, électriques et thermiques (tableau 15).

Tableau 15 : Caractéristiques électriques et thermiques du panneau hybride retenue

Description générale	Caractéristique électrique	Caractéristique thermique
Dimensions (L x l x h) 1.970 x 995 x (85+22) mm	Type de cellule Monocristalline	Performances optiques Coef. 0,7
	Puissance nominale (W) 350 W	
Surface totale 1,96m ²	Tension d'alimentation maximale (Vmpp) 39,86 V	
	Courant de puissance maximum (Impp) 8,76 A	

Chapitre 05 : Matériels et méthodes

Surface d'ouverture 1,88 m ²	Tension en circuit ouvert (Voc) 48,61 V	Pertes thermiques, a1 5,98 W/m ² K
	Courant court-circuit (Isc) 9,16 A	
N° de cellules 72	Efficacité du module (%) 17,8	
	Tolérance de puissance (W) +/- 4%	
Poids 50 kg	Tension maximale du système DC 1000V (IEC)	Pertes thermiques, a2 0,00 W/m ² K ²
Verre avant 3,2 mm. Trempé	Feuille de fond Noire	Volume liquide interne 1,78L
Cadre Aluminium	Coefficient de température Pmpp -0,36%/°C	Température de stagnation 126C°
Protection caisse de connexion IP65	Coefficient de température Voc -0,28%/°C	Num. Connexions hydrauliques 4 connexions
Dimensions des cellules 156 x 156	Coefficient de température Isc +0,06%/°C	Mesure connexion hydraulique connexion rapide
N° diodes 3 diodes	Courant inverse maximum 15 A	Pression maximale admissible 10 bar
Type de connexion FV /Longueur câbles Solarlok PV4 / 1m	Température NOCT * 45+/-2 °C	Débit nominal 60 L/h

Source : Abora Solar.com

CONCLUSION

Ce chapitre expose en détail la méthodologie adoptée pour mener notre étude. La méthodologie adoptée pour cette étude consiste en l'utilisation de la méthode de quantification énergétique sur une géométrie en trois dimensions. Cette méthode présente des opportunités précieuses pour analyser divers paramètres de l'efficacité des systèmes solaires.

Ce chapitre s'appuie sur l'utilisation d'un ensemble d'outils divers en conception assistée par ordinateur, simulation et calcul. Nous avons exposé de façon minutieuse les différentes étapes des opérations d'évaluation réalisées.

Le but principal de cette méthodologie consiste à étudier et à prédire les facteurs morpho-énergétiques de chaque forme urbaine afin d'analyser leur influence sur la potentiel énergétique (production d'énergie solaire hybride PV/ST) de notre ensemble d'étude.

De plus, les modèles sélectionnés ont été soumis à un processus de calibration afin d'obtenir des résultats plus précis.

À la conclusion du chapitre, une sélection des facteurs typo-morphologiques les plus influents sur le potentiel solaire hybride a été réalisée en vue de les intégrer dans l'analyse de corrélation effectuée dans le chapitre suivant.

Chapitre 6,

Résultats Et Discussions

INTRODUCTION

La discussion des résultats occupe une place essentielle dans l'authenticité d'une thèse. Elle valorise le travail en soulignant l'importance de l'argumentation et de la réflexion. Cela met en évidence que les études ne sont pas le fruit du hasard et cela leur confère une certaine robustesse. De plus, les objectifs de la discussion des résultats consistent à établir une corrélation entre nos résultats et les hypothèses formulées dans l'introduction, à évaluer la qualité et la validité de nos résultats en les confrontant aux conclusions scientifiques préexistantes, c'est-à-dire aux études déjà publiées, et à mettre en évidence les similitudes et les différences entre notre travail et d'autres études afin d'en évaluer la pertinence.

Dans ce contexte, ce chapitre se concentre principalement sur les résultats de la calibration, tout en identifiant les incertitudes associées aux plages de température intérieure modélisées et en interprétant les écarts de consommation. Ensuite, ce chapitre examine l'évaluation de la production d'énergie solaire et souligne l'importance de cette analyse pour améliorer l'efficacité énergétique dans notre étude de cas. En outre, il explore l'impact des paramètres de la forme urbaine sur la génération d'énergie solaire hybride, combinant les technologies photovoltaïque et thermique.

Chapitre 06 : Résultats et discussions

VI.1 Résultat de la calibration et réduction des incertitudes

Dans cette section, nous cherchons à expliquer les résultats et l'application de la procédure d'étalonnage du modèle.

Pour comprendre les températures d'ajustement expliquées ci-dessus, la procédure pour chaque forme urbaine est illustrée dans le tableau 16 et les figures 60, 61 et 62.

VI.1.1 Identification des incertitudes liées aux plages de température intérieur modélisé :

L'étalonnage (tableau 16) montre que pour le chauffage (à partir de 18°C), les températures diminuent dans les spécimens A et C, mais augmentent dans le spécimen B. Pour la climatisation (à partir de 25°C), les températures augmentent dans tous les spécimens, avec des variations entre eux. Ces résultats indiquent des ajustements distincts selon les spécimens pour le chauffage et la climatisation.

Tableau 16 : Plage de températures intérieures modélisées et incertitudes de modélisation pour le chauffage et la climatisation

Spécimens	Plages de températures intérieures modélisées (°C)		Incertitude sur l'estimation de la consommation de chauffage (%)	Incertitude sur l'estimation de la consommation de climatisation (%)
	Tmin (°C)	Tmax (°C)		
A	18	25	1,26	34,21
	17	26	-13,31	21,22
	17,5	27	-6,15	8,54
	17,8	27,5	-1,71	2,34
	17,9	27,6	0,1	1,14
	18	27,7	1,26	-0,09
	17,9	27,7	0,1	0,14
B	18	25	-18,88	18,24
	19	26	-4,37	6,66
	19,5	26,5	3,34	1,05
	19,4	26,6	1,76	0
	19,3	26,6	0,18	0

Chapitre 06 : Résultats et discussions

C	18	25	3,74	71,74
	17,5	27	-4,67	38,68
	17,6	28	-3,01	23,21
	17,8	28,5	0,31	15,82
	17,7	29,5	-1,35	1,64
	17,8	29,6	0,31	0,35

Source : Auteur, 2024

Les figures ci-dessous montre comment on effectue l'étalonnage, c'est à dire le réglage de la température du chauffage et de climatisation des trois spécimens d'étude.

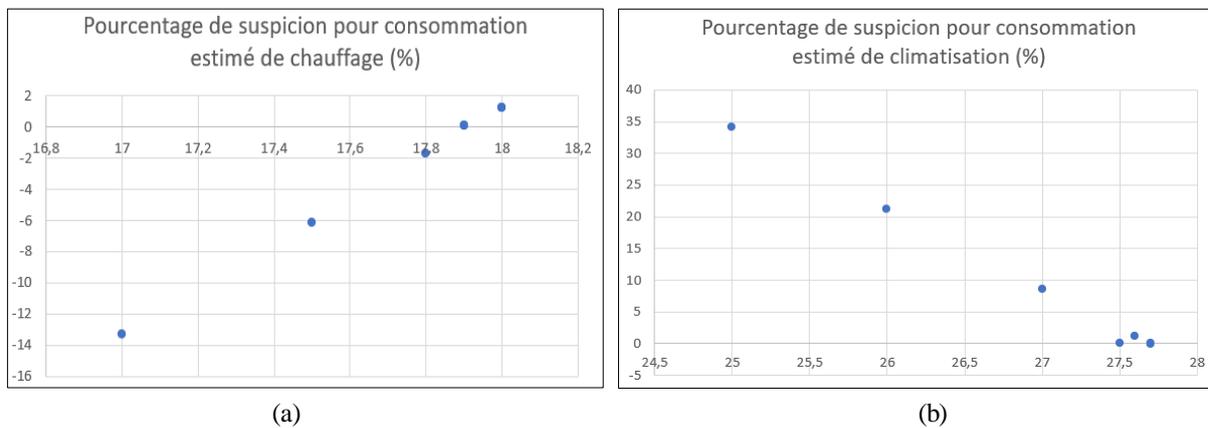


Figure 60 : Le pourcentage de suspicion pour les consommations estimées des chauffages (a) et des climatisations (b) pour le spécimen A

Source : Excel

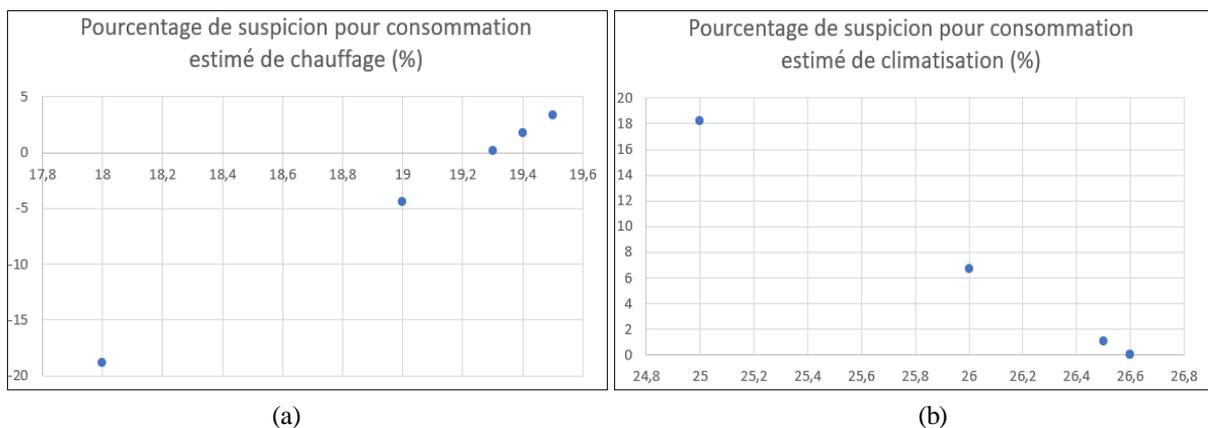


Figure 61 : Le pourcentage de suspicion pour les consommations estimées des chauffages (a) et des climatisations (b) pour le spécimen B

Source : Excel

Chapitre 06 : Résultats et discussions

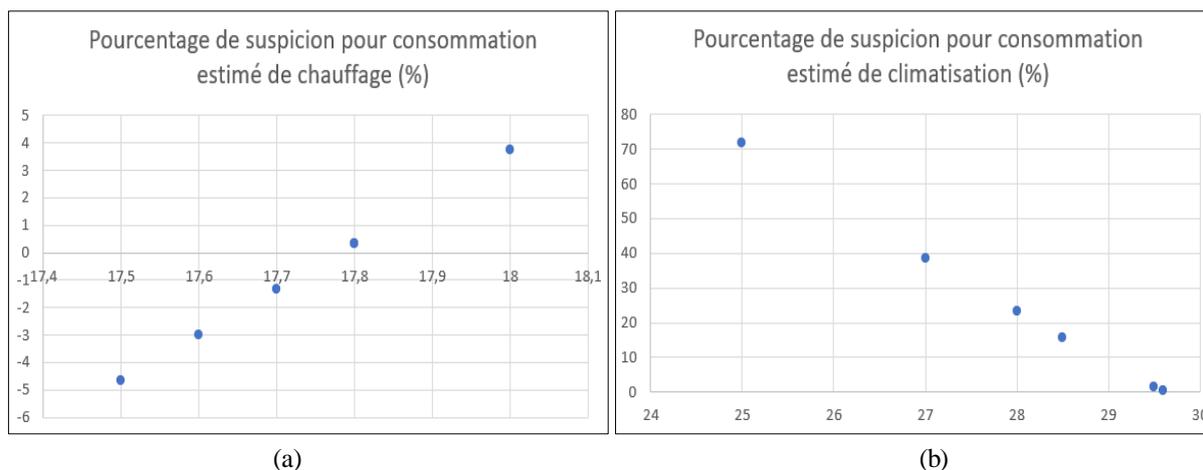


Figure 62 : Le pourcentage de suspicion pour les consommations estimées des chauffages (a) et des climatisations (b) pour le spécimen C

Source : Excel

Le tableau 17 présente les valeurs de température intérieure modélisée ajustée pour les besoins de chauffage et de climatisation estimés des trois formes urbaines. Les écarts d'ajustement des paires de points de consigne de température entre la demande modélisée et la demande estimée varient de 0 % à 0,35 %.

Tableau 17 : Tableau récapitulatif qui montre la plage de température intérieure modélisée, la consommation estimée, l'erreur de modélisation du chauffage et de climatisation pour les trois spécimens

Spécimen	TMIN (°C)	TMAX (°C)	Consommation estimée de chauffage (KWh/m³/an)	Pourcentage de suspicion (%)	Consommation estimée de climatisation (KWh/m³/an)	Pourcentage de suspicion (%)
A	17,9	27,7	19,85	0,1	20,05	0,14
B	19,3	26,6	10,77	0,18	11,40	0
C	17,8	29,6	9,65	0,31	8,56	0,35

Source : Auteur

Chapitre 06 : Résultats et discussions

Après avoir interpréter la figure 63a, 63b qui représente la consommation estimée de chauffage et de climatisation selon les températures minimales et maximales respectivement, on constate que, le spécimen C c'est le profil favorable qui nécessite un faible besoin de chauffage et un faible besoin de climatisation.

Ces résultats suggèrent une utilisation intensive de chauffage et de climatisation dans les formes urbaine B et A respectivement.

On peut voir que la demande d'énergie suit la logique de construction des bâtiments (enveloppe et matériaux utilisés) dans les trois spécimens d'étude, avec une consommation plus élevée dans les formes urbaines B et A par rapport à la forme urbaine C.

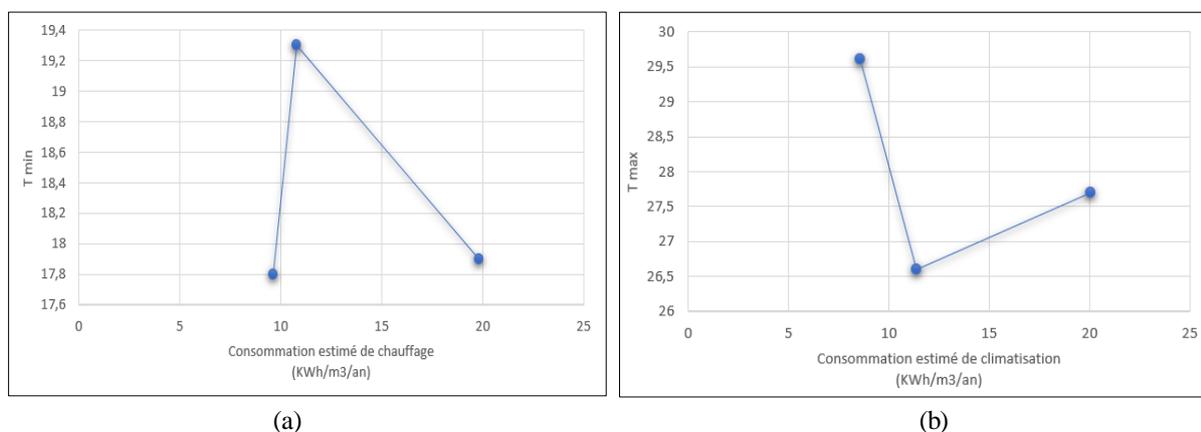


Figure 63 : Les consommations estimées des chauffages (a) et climatisations (b) pour les trois spécimens choisis selon les températures intérieures minimales et maximales

Source : Excel

VI.1.2 Interpréter les écarts de consommation :

La comparaison entre la consommation réelle et estimée (tableau 18) pour chaque spécimen nous permet d'identifier les tendances générales ou l'on peut affirmer que les incertitudes entre les valeurs réelles et les valeurs simulées sont très minime avec 0.35% d'incertitude comme pourcentage maximal en climatisation et 0.31% d'incertitude pour le chauffage. Ainsi nous pouvons affirmer que les trois spécimens objet de cette étude ont tendance à consommer plus ou moins une valeur presque égale à ce qui est estimé soit un écart absolu maximal de 0.03 KWh/m3/an comme valeur maximale pour la climatisation et le chauffage. C'est ainsi que l'on peut conclure que nos spécimens d'analyse ne présentent pas des erreurs systématiques dans la modélisation et que l'écart minime trouvés peut être liés à certaines conditions météorologiques spécifiques ou même à l'utilisation de données climatiques moyennes (meteonorme 7.2) et ne peuvent pas influencer sur la pertinence des résultats.

Chapitre 06 : Résultats et discussions

Tableau 18 : Consommation réelle et estimée, incertitude de la modélisation du chauffage et du refroidissement pour trois spécimens

Spécimens	Consommation réelle de chauffage (KWh/m ³ /an)	Consommation estimée de chauffage (KWh/m ³ /an)	Incertitude sur l'estimation de la consommation de chauffage (%)	Consommation réelle de climatisation (KWh/m ³ /an)	Consommation estimée de climatisation (KWh/m ³ /an)	Incertitude sur l'estimation de la consommation de climatisation (%)
A	19,83	19,85	0,1	20,02	20,05	0,14
B	10,75	10,77	0,18	11,40	11,40	0
C	9,62	9,65	0,31	8,53	8,56	0,35

Source : Auteur, 2024

L'estimation de l'incertitude est définie par l'équation suivante :

$$\frac{M \text{ Value} - T \text{ Value}}{T \text{ Value}} \times 100 \quad \text{Eq. VI-1}$$

Où :

Valeur M : représente la valeur mesurée en (kWh/m³/an)

Valeur T : représente la valeur réelle en (kWh/m³/an)

Dans cette étude, la valeur mesurée correspond à la consommation prévue de chauffage et de refroidissement calculée à l'aide de CitySim Pro. La valeur réelle correspond à la consommation effective de chauffage et de climatisation mesurée par la société algérienne d'électricité et de gaz (SONALGAZ).

VI.2 Evaluation de la production solaire

VI.2.1 Dimensionnement et emplacement des panneaux hybrides

VI.2.1.1 Surface et orientation

La superficie requise pour implanter les panneaux hybrides est estimée à 18 m² pour un bâtiment de spécimen A, 55 m² pour un bâtiment de spécimen B et 127 m² pour le spécimen C. La surface installée a été choisi comme un équilibre entre la production photovoltaïque-thermique comparable à la demande d'électricité et de chauffage de chaque spécimen d'analyse. De toute évidence, les panneaux hybrides PV/ST doit être orienté quand c'est possible vers le Sud, et incliné d'un angle de 30° (Laetitia Brottier, 2019).

Chapitre 06 : Résultats et discussions

Avec un azimut de 180° dans les toitures plates des trois spécimens d'étude et $150^\circ - 240^\circ$ dans les toitures en tuiles dans le spécimen A. L'azimut de cette dernière diffère selon la position des bâtiments (figure 64).

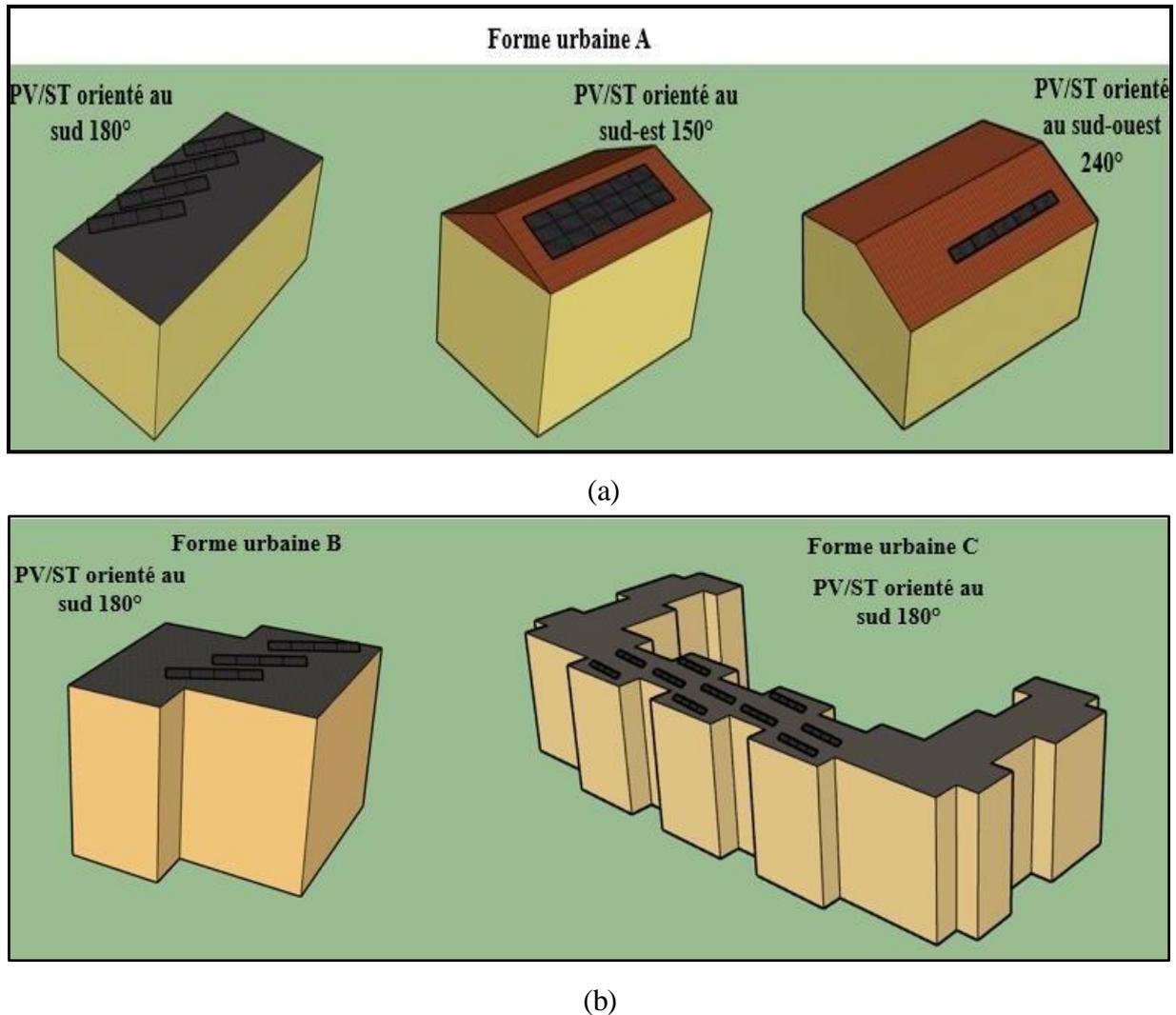


Figure 64 : Orientation des panneaux hybrides dans le spécimen A (a) et les spécimens B et C (b)

Source : Auteur, 2024

VI.2.1.2 Choix de l'emplacement des panneaux dans les toitures

Le choix de l'emplacement des panneaux hybrides photovoltaïques thermiques sera basé sur l'irradiation solaire annuelle, comme indiqué par le logiciel Citysim (figure 65). Les résultats montrent que les toitures reçoivent une irradiation plus élevée par rapport aux façades. Ces dernières sont moins propices à la production d'énergie en raison de leur rendement inférieur et de leurs coûts plus élevés.

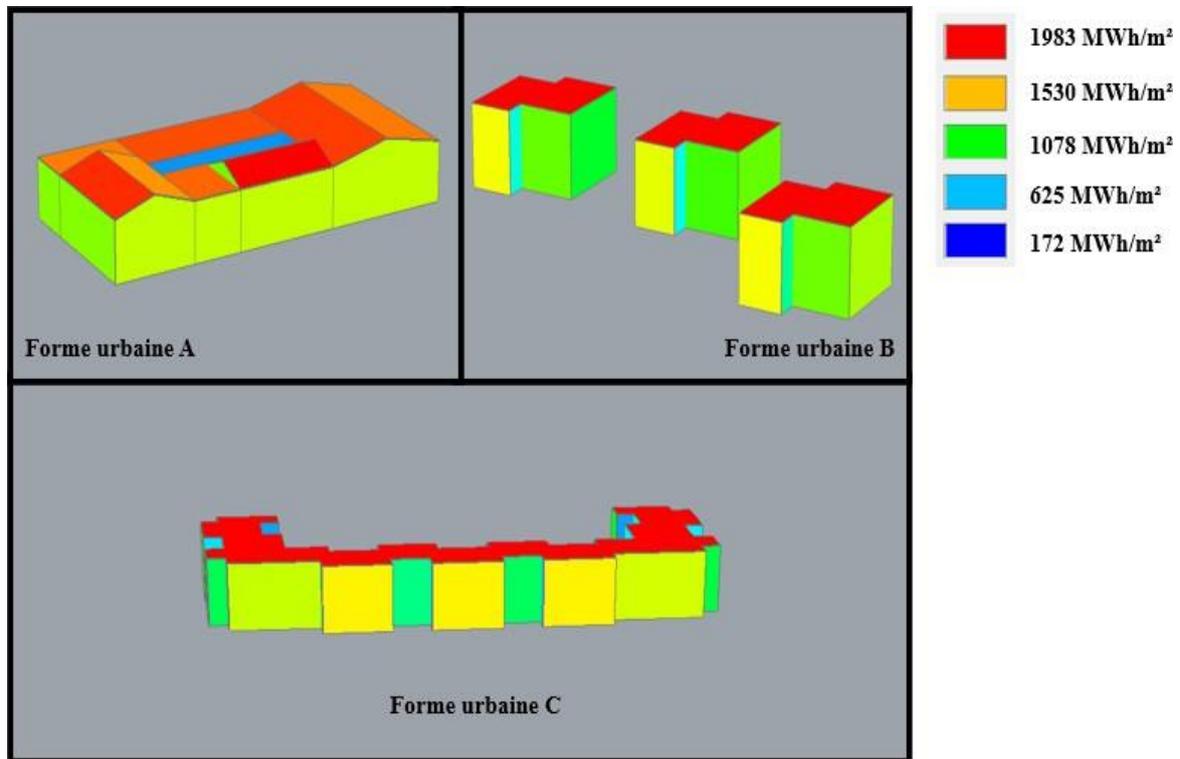


Figure 65 : Rayonnement solaire annuel dans les trois spécimens sélectionnés

Source : Citysim, 2024

VI.2.1.3 Nombre de panneau à retenir

Le nombre de panneaux hybrides installés sur le toit est déterminé à partir le ratio entre la consommation annuelle de chaque spécimen et la production annuelle des panneaux hybrides photovoltaïques thermiques. Cela a donné un résultat de 55 panneaux pour le spécimen A, 84 pour le spécimen B, et 64 pour le spécimen C.

Cependant, les panneaux hybrides peuvent projeter des ombres sur le bâtiment, réduisant ses gains solaires. Comme Citysim ne peut pas modéliser cet effet, il est nécessaire d'utiliser trois configurations différentes pour évaluer l'impact des systèmes PV/ST sur les toitures.

- Modèle de référence :

Il simule la forme urbaine de base sans panneaux hybrides PV/ST pour obtenir des estimations de chauffage et de climatisation.

Chapitre 06 : Résultats et discussions

- Modèle avec couche d'ombre :

Ce modèle simule des panneaux PV/ST qui ne produisent ni électricité ni chaleur, mais génèrent des ombres sur le toit. Il évalue l'effet de ces ombres sur le chauffage et la climatisation par rapport au modèle de référence.

- Modèle avec couche photovoltaïque/thermique :

Ce modèle permet de simuler des panneaux hybrides photovoltaïques/thermiques qui génèrent à la fois de l'électricité et de la chaleur. Il analyse l'influence de cette production d'énergie sur les trois spécimens sélectionnés.

L'effet de l'ombrage projeté causé par les panneaux solaires PV/ST sur les toits des trois échantillons sélectionnés a entraîné une augmentation modeste des besoins de chauffage en hiver, variant de 3 à 8 % en fonction de la forme urbaine. Cet effet peut également entraîner une réduction des besoins de climatisation en été de 6 à 12 %, en fonction de la forme urbaine étudiée.

VI.3 Amélioration de l'énergie dans le cas d'étude par l'évaluation de la production énergétique des techniques solaires utilisées (photovoltaïque et thermique)

VI.3.1 Analyse énergétique pour les études de cas (PV/ST)

Les bâtiments des diverses formes urbaines des trois cas d'étude sélectionnés démontrent une variation significative en termes de production d'énergie photovoltaïque et solaire thermique. L'éventuels de la production énergétique suit plusieurs paramètres. Parmi ces derniers, c'est la configuration urbaine c'est à dire les facteurs typo-morphologiques de chaque spécimen d'étude. La forme urbaine A, caractérisée par des bâtiments de faible hauteur, une grande densité et des rues étroites, présente des inconvénients majeurs en termes de production photovoltaïque, mais offre des avantages significatifs pour la production thermique. En revanche, la production d'énergie solaire thermique est généralement inférieure à celle de l'énergie solaire photovoltaïque dans le cas de la forme urbaine C. Cette disposition se distingue par des édifices plus élevés que ceux de la forme A, une densité moyenne et des voies larges. La forme urbaine B et avec leur forme urbaine la plus faible en densité, avec ses bâtiments moins hauts que la forme urbaine C et leurs rues de petite taille, se caractérise par une production PV plus élevée que celle ST mais à faible quantité par rapport à celui de la forme urbaine C.

La forme urbaine C affiche le plus haut niveau de production photovoltaïque, atteignant 992,25 KWh/m²/an, suivie par la forme urbaine B avec 749,23 KWh/m²/an, tandis que la forme urbaine A présente le niveau le plus bas de production électrique, soit 621,86 KWh/m²/an.

En revanche, en ce qui concerne la production solaire thermique, la forme urbaine C affiche la valeur la plus basse avec 193,20 KWh/m²/an, suivie de la forme urbaine B avec 276,34 KWh/m²/an, tandis que la forme urbaine A présente la valeur la plus élevée de production solaire thermique, soit 302,89 KWh/m²/an (figure 66).

Chapitre 06 : Résultats et discussions

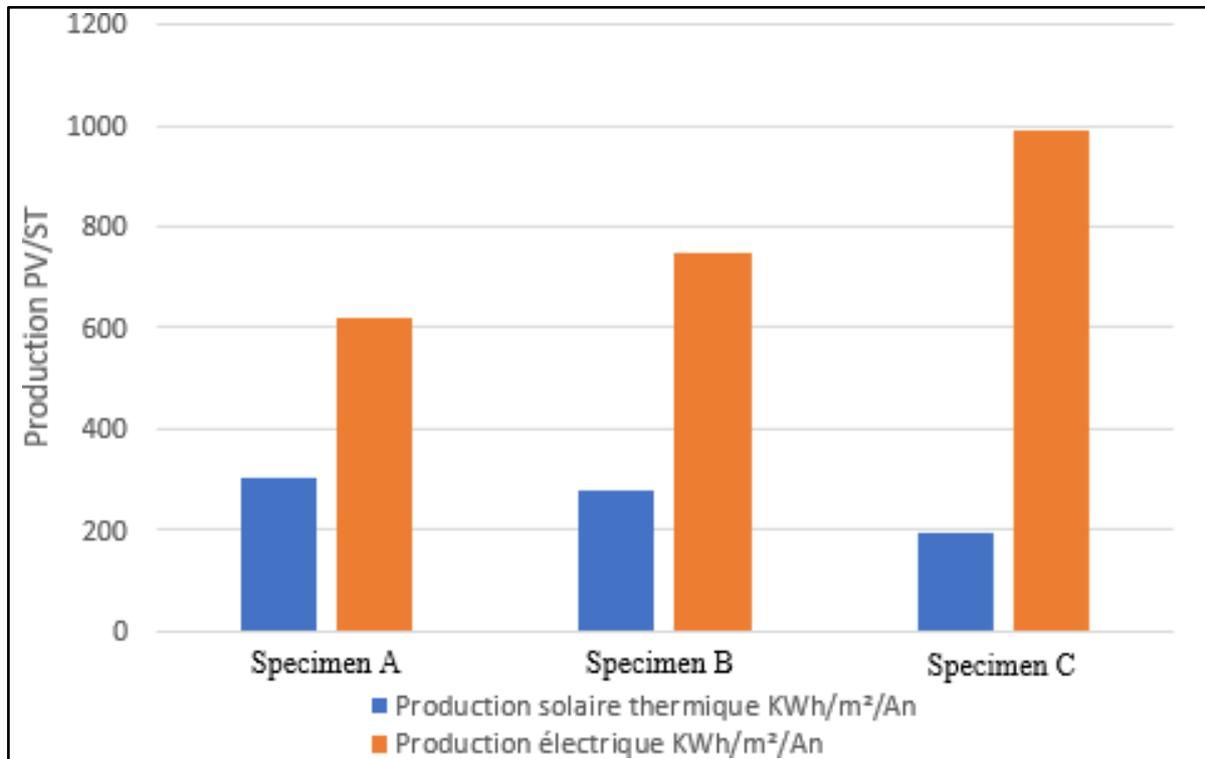


Figure 66 : La production solaire photovoltaïque et thermique pour les trois spécimens choisis

Source : Excel

La production énergétique des formes urbaines des cas d'études choisies est montrée dans les figures 67 et 68 à travers le logiciel de modélisation énergétique Citysim Pro. Dont, la figure 67 représente la production photovoltaïque des trois spécimens d'études et la figure 68 montre la production solaire thermique de ces derniers.

L'interprétation des figures montrent que la couleur rouge présente la valeur la plus forte en production énergétique, tandis que, la couleur bleue présente la valeur la plus faible de la production énergétique.

Chapitre 06 : Résultats et discussions

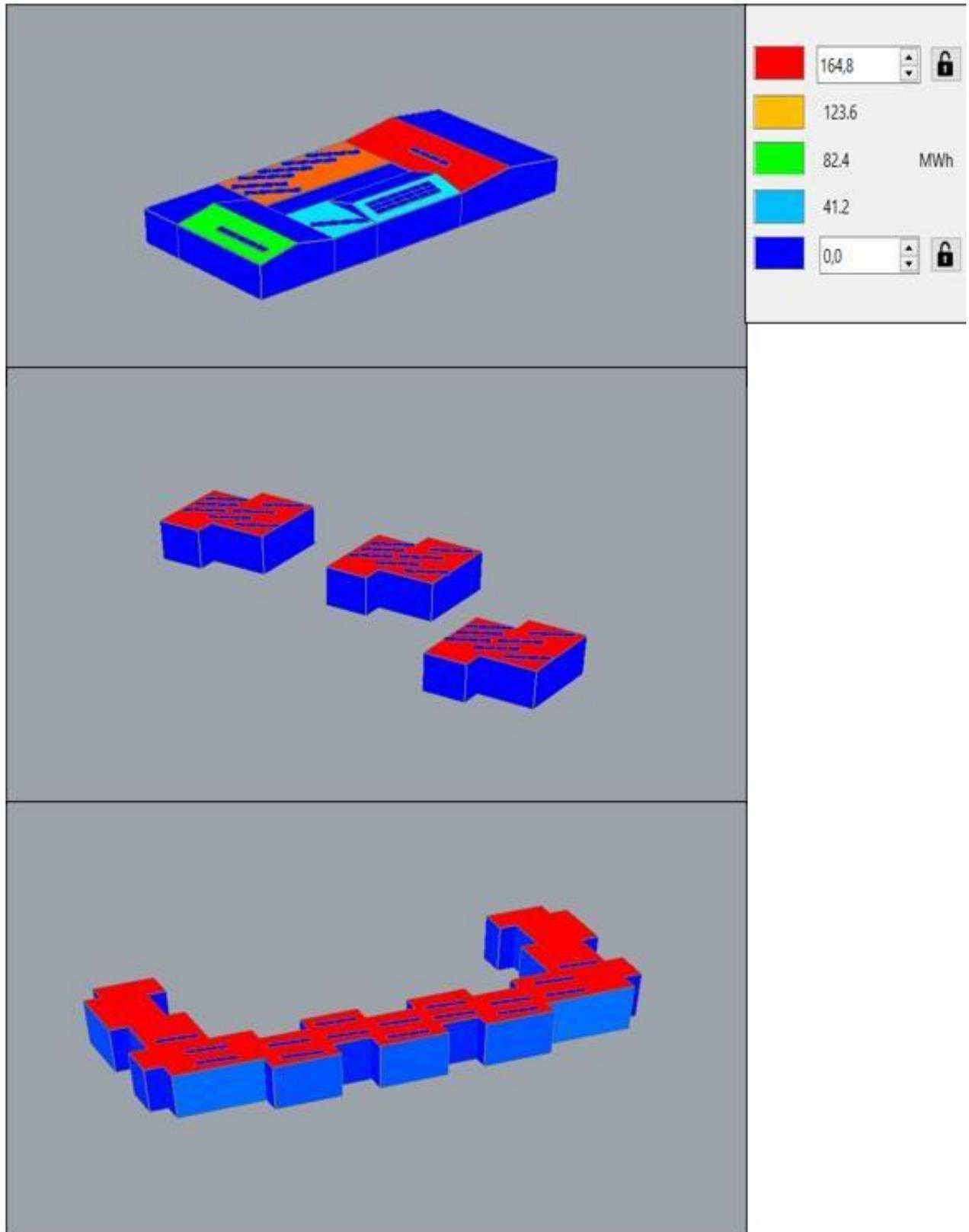


Figure 67 : La production solaire photovoltaïque pour les trois spécimens choisis

Source : Citysim Pro

Chapitre 06 : Résultats et discussions

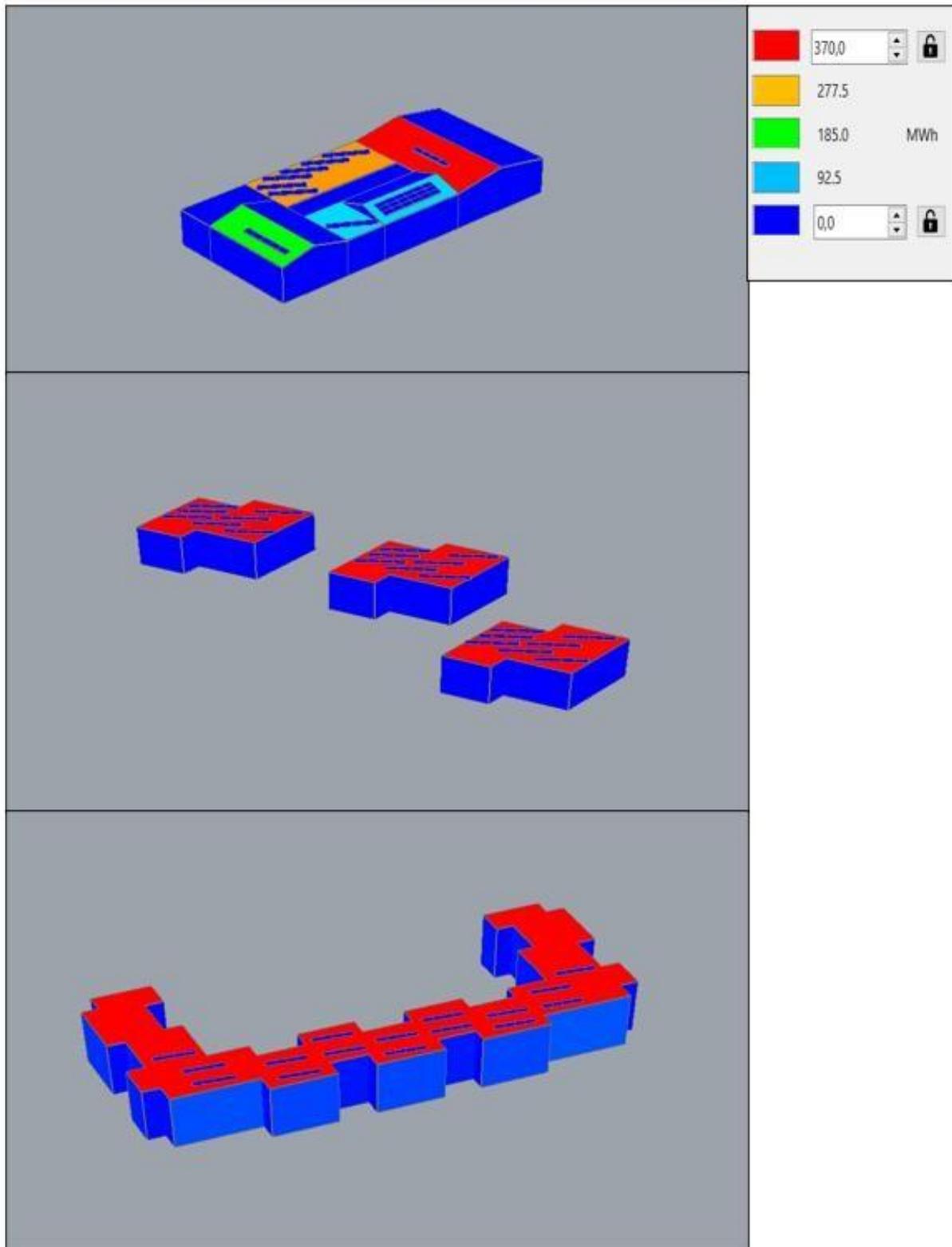


Figure 68 : La production solaire thermique pour les trois spécimens choisis

Source : Citysim Pro

Chapitre 06 : Résultats et discussions

VI.3.2 Evaluation de la production électrique/thermique par rapport aux besoin énergétiques

La recherche menée dans cette étude nous a amené à évaluer la capacité de la production solaire, à la fois électrique et thermique, de notre corpus d'analyse. Les résultats obtenus, tels qu'indiqués dans le tableau 19, démontrent que la production moyenne annuelle d'électricité solaire photovoltaïque peut satisfaire entièrement la demande en électricité des spécimens A et B, ainsi que celle du spécimen C, et répondre à environ 43% à 51% des besoins de chauffage en hiver (pompe à chaleur). La production thermique peut assurer la totalité des besoins en eau chaude sanitaire pendant la saison estivale, et en moyenne 50 à 70% des besoins annuels. Elle a la capacité de satisfaire la moitié des besoins de chauffage.

Tableau 19 : La production photovoltaïque et thermique dans les trois spécimens sélectionnés

Spécimen	Surface des panneaux solaires m ²	Production électrique KWh/m ² /An	Production solaire thermique KWh/m ² /An	Auto-consommation KWh/m ³ /An ⁶	Mesure nette (Avec stockage) KWh/m ³ /An ⁷
A	107,8	621,86	302,89	2,26	0,34
B	164,64	749,23	276,34	1,47	0,05
C	127,0	992,25	193,2	0,42	0,0

Source : Auteur, 2024

Cependant, il convient de souligner que la consommation d'électricité des trois cas d'étude analysés est significativement élevée, ce qui implique que la production d'énergie pendant la journée devra être étroitement synchronisée avec les besoins en électricité (tableau 19). Toutefois, l'emploi de dispositifs de stockage tels que des batteries permet de dissocier la production de l'utilisation. Afin de compenser le décalage potentiel entre la surproduction estivale d'énergie solaire et la pénurie hivernale, il est essentiel d'exploiter l'excédent d'énergie généré durant les mois estivaux en le stockant dans des batteries.

⁶ Il s'agit de l'utilisation synchronisée d'énergie produite localement par les panneaux solaires placée dans chaque spécimen d'analyse pour satisfaire ses propres besoins en énergie, mesurée en fonction du volume des bâtiments sur une période d'un an.

⁷ Un système de comptage de l'énergie où la production d'électricité, des panneaux PV est comparée à la consommation annuelle. Le terme "avec stockage" suggère l'utilisation de batteries pour stocker l'énergie excédentaire produite.

Chapitre 06 : Résultats et discussions

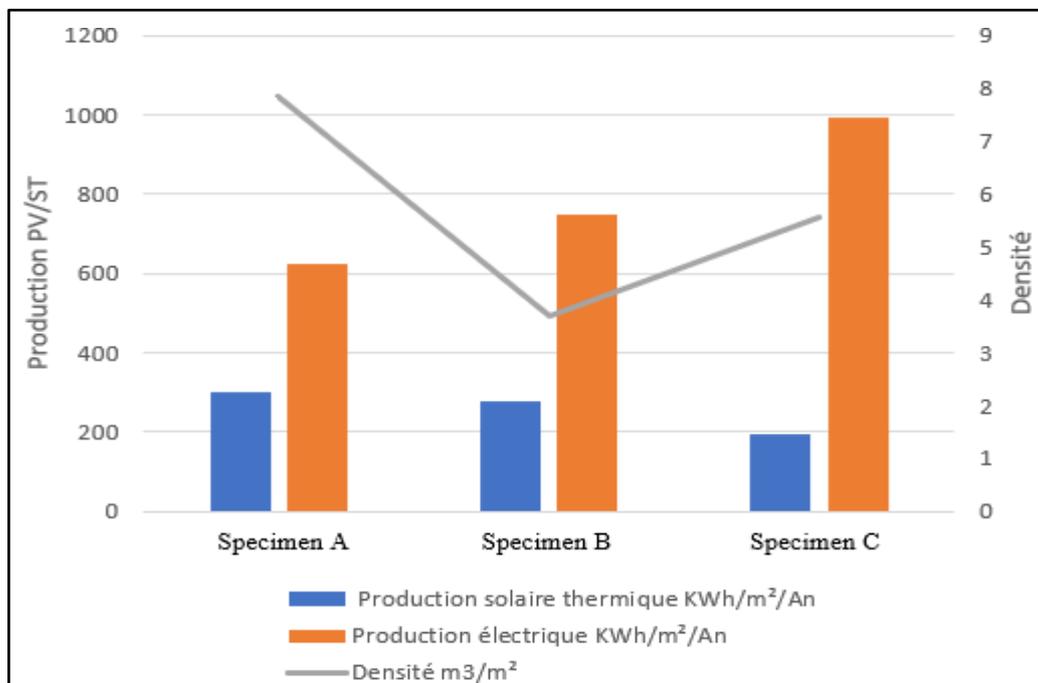
Cet excédent pourra ensuite être utilisé durant l'hiver, quand l'ensoleillement est réduit, assurant ainsi une utilisation constante et efficace de l'énergie solaire tout au long de l'année. Nous pouvons donc conclure que le système énergétique hybride photovoltaïque/thermique choisi dans ce travail de recherche pourrait contribuer à répondre aux besoins énergétiques de notre spécimens d'étude.

VI.4 Impact des indicateurs de la forme urbaine sur la production solaire hybride (photovoltaïque et thermique)

Au cours de l'examen de la littérature scientifique réalisé dans le chapitre 3, nous avons identifié les paramètres géométriques de la forme urbaine qui ont le plus d'influence sur le potentiel solaire et qui sont les plus pertinents pour notre contexte spécifique. Les éléments à considérer incluent la couverture du site, la densité urbaine, le coefficient d'occupation du sol (COS), la compacité, ainsi que le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue.

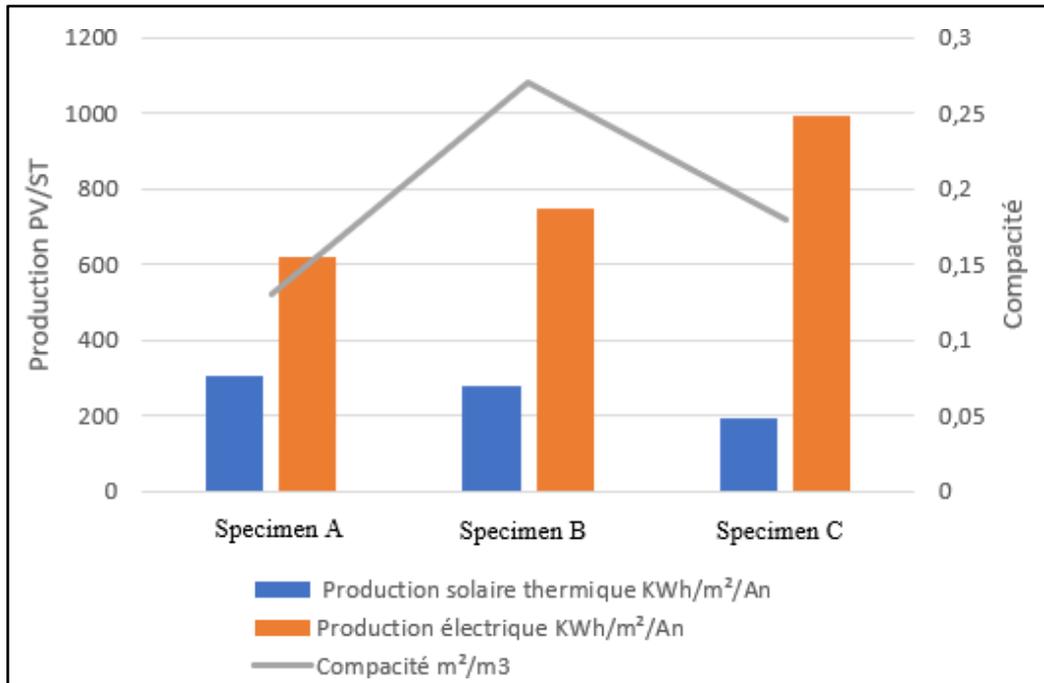
VI.4.1 Corrélations forme urbaine-Energie solaire hybride

Pour mettre en évidence l'influence des caractéristiques de la forme urbaine mentionnées précédemment sur la production d'énergie (photovoltaïque et solaire thermique), une analyse de corrélation a été réalisée. Cette analyse a été illustrée à l'aide de diagrammes combinés représentant la production d'énergie PV/ST sous forme de barres et l'indicateur de forme urbaine sous forme de courbe (figures 69 et 70).

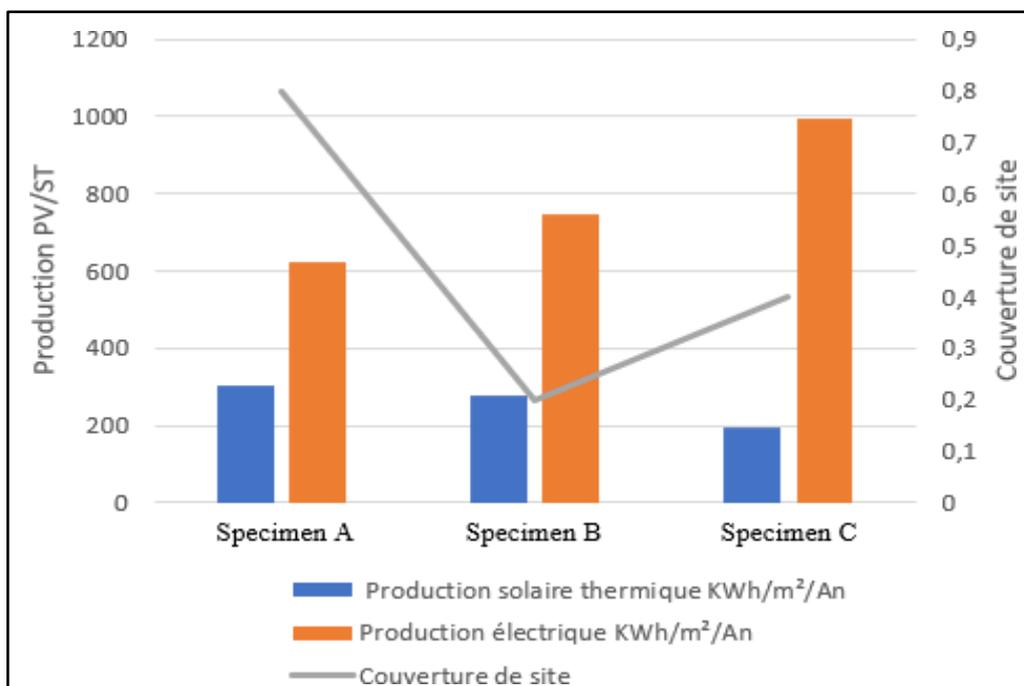


(a)

Chapitre 06 : Résultats et discussions



(b)



(c)

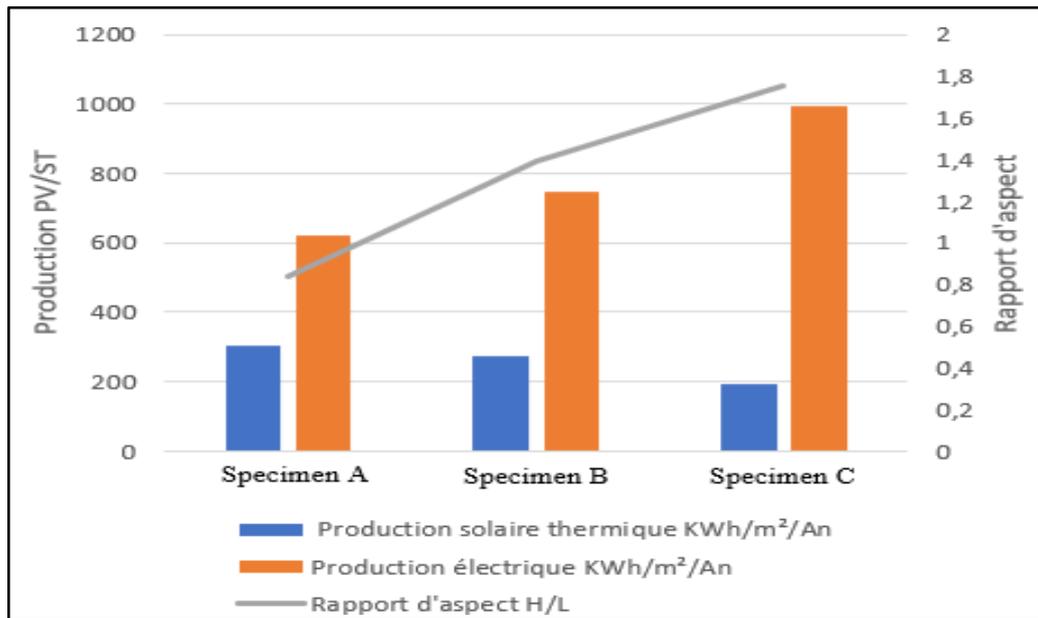
Figure 69 : Production PV/ST et : densité (a) / compacité (b) / couverture du site (c) du corpus d'analyse pour les trois spécimens sélectionnés

Source : Citysim 2024, traité par l'auteur

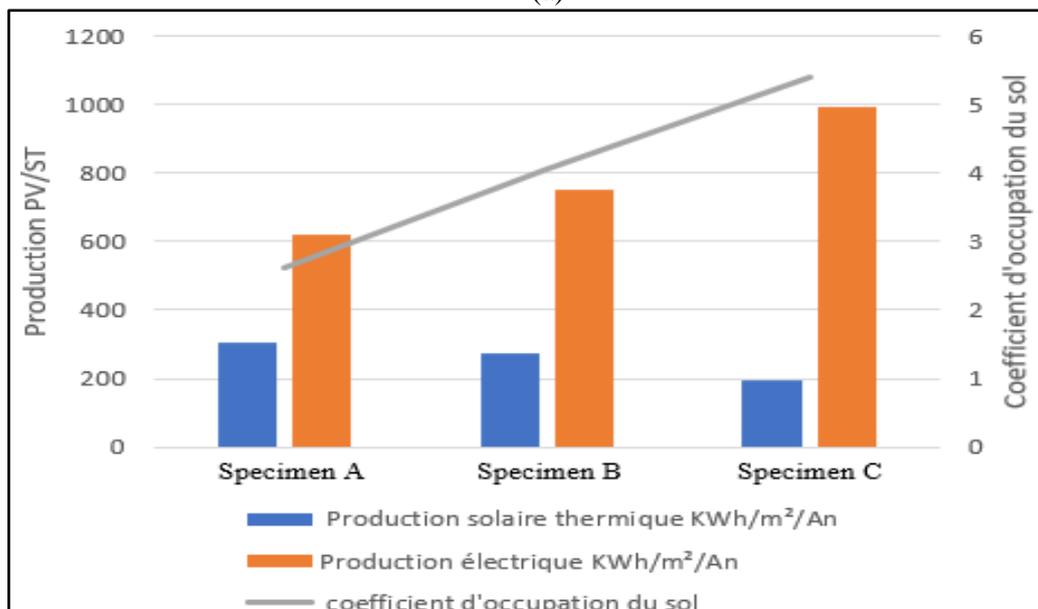
Chapitre 06 : Résultats et discussions

L'analyse des corrélations entre la densité urbaine et la couverture du site avec la production PV/ST révèle une tendance inverse par rapport à la corrélation avec la compacité.

Toutefois les variations de ces trois facteurs semblent avoir des effets fluctuants sur la production PV/ST. Les graphiques utilisés pour cette étude suggèrent que ces facteurs typomorphologiques ont des influences qui ne sont pas toujours évidentes et qui peuvent s'entremêler, rendant l'analyse des systèmes énergétiques hybrides plus complexe.



(a)



(b)

Figure 70 : Production PV/ST et : rapport d'aspect (a)/ coefficient d'occupation du sol (b) du corpus d'analyse pour les trois spécimens sélectionnés

Source : Citysim 2024, traité par l'auteur

Chapitre 06 : Résultats et discussions

Cependant, les indicateurs : ratio Hauteur/Largeur des voies (H/L) et coefficient d'occupation du sol présentent un impact significatif sur les productions PV/ST. Un ratio H/L (prospect) plus élevé, qui suggère des bâtiments plus hauts par rapport à la largeur de la rue, peut augmenter la production photovoltaïque. Cela peut être dû à une exposition accrue des toits à la lumière du soleil, facilitant l'installation de panneaux solaires et réduisant les risques d'obstruction ou d'ombrage. Toutefois la corrélation est inverse avec la production thermique, une augmentation du ratio H/L peut réduire la production solaire thermique.

Ceci peut être justifiée par le fait que la composante thermique des panneaux hybrides est étroitement liée à l'exposition au rayonnement solaire, laquelle peut être altérée par la hauteur significative du bâtiment ou la largeur de la rue, impactant ainsi la capacité des panneaux à capter l'énergie solaire et réduisant par conséquent leur efficacité thermique. Les résultats que nous avons obtenus sont en accord avec les données de la littérature scientifique concernant l'influence de la morphologie urbaine sur le potentiel énergétique (Mohajeri et al., 2019 ; Mahaya et al., 2022).

VI.4.2 Description statistique des résultats de la corrélation

L'analyse de corrélation a été employée comme méthode statistique dans notre étude afin d'évaluer la relation entre diverses variables de la morphologie urbaine et la production solaire hybride PV/ST. Elle permet d'établir si et dans quelle mesure les fluctuations d'une variable sont liées aux fluctuations d'une autre variable. En d'autres termes, elle permet d'évaluer l'intensité et la direction de la relation linéaire entre les variables.

La relation entre la densité, la compacité et la couverture du site donne des résultats variables en matière de production électrique et thermique. Il est clair que la combinaison d'une densité élevée (7,85 m³/m²) et d'une couverture du site (0,8) avec une compacité réduite (0,13 m²/m³), comme le montre le spécimen A, est la plus favorable à la production de ST (302,89 kWh/m²/an) mais la plus défavorable à la production d'électricité photovoltaïque (621,86 kWh/m²/an).

Cela peut s'expliquer par des facteurs liés aux principes de fonctionnement de chaque technologie. Les capteurs ST du panneau hybride collectent l'énergie solaire et la convertissent en chaleur. Le spécimen A présente plusieurs avantages à cet égard, notamment un meilleur captage de l'énergie solaire grâce à sa densité et à sa couverture élevée et une diminution des pertes de chaleur grâce à sa compacité réduite.

En revanche, les capteurs photovoltaïques du panneau hybride convertissent l'énergie solaire en électricité, de sorte qu'une densité et une couverture élevées peuvent provoquer un ombrage mutuel entre les panneaux et réduire la production d'électricité.

Chapitre 06 : Résultats et discussions

Cependant, une faible compacité peut réduire la circulation de l'air et limiter le refroidissement des capteurs photovoltaïques, ce qui réduit leurs performances.

C'est ainsi que le spécimen C, qui a une densité moyenne (5,56 m³/m²), une couverture moyenne (0,4) et une compacité moyenne (0,18 m²/m²), atteint la production d'électricité la plus élevée (992,25 kWh/m²/an).

VI.4.3 Corrélations forme urbaine-technologie PV et technologie ST selon la revue de littérature

Lorsqu'on examine la corrélation entre le rapport hauteur/largeur de la voie (H/L) et le coefficient d'occupation du sol, on observe que la production de PV et de ST varie de manière similaire à ce qui a été décrit précédemment. Cette constatation démontre qu'un rapport H/L élevé (1,75) et un coefficient d'occupation du sol élevé (5,4) sur la sortie d'un panneau solaire hybride peut entraîner une production d'électricité PV (992,25 kWh/m²/an) et une production ST plus faible (193,2 kWh/m²/an), comme le montre le spécimen C.

Si ces indicateurs indiquent des bâtiments plus hauts par rapport à la largeur de la rue (Canyon), cela explique parfaitement l'impact positif sur la production électrique dû à l'exposition accrue des toits à l'ensoleillement, ce qui facilite l'installation de panneaux solaires et réduit le risque d'obstruction ou d'ombrage.

Cependant, il existe une relation inverse avec la production de ST. Ce résultat s'explique par le fait que les collecteurs ST des panneaux hybrides sur des bâtiments plus hauts sont souvent exposés à des vents plus forts, ce qui peut accélérer le flux d'air autour du collecteur ST, ce qui réduit son efficacité. Il est également important de noter que de nombreux autres facteurs, tels que l'environnement immédiat et le microclimat, contribuent aux fluctuations observées dans la production PV et ST.

Les résultats indiquent qu'il n'existe pas de configuration optimale unique pour les panneaux solaires hybrides. La décision est basée sur l'analyse de l'année des priorités entre la production PV et ST. En donnant la priorité à la production électrique, on peut observer que le spécimen C'est un bon compromis en termes de propriétés morpho-énergétiques par rapport à une meilleure production hybride (Harbi et al., 2024).

Tian et Xu (2021) ont choisi le coefficient d'occupation du sol et la hauteur moyenne des bâtiments comme paramètres pour les blocs résidentiels étudiés dans le centre de la Chine. Mahaya et al. (2022) ont choisi le rapport H/L, le rapport de la surface de plancher, le rapport de la parcelle, le rapport de la surface du volume et la couverture du site comme paramètres pour leur étude des blocs résidentiels à Batna en Algérie.

Selon les conclusions de ces études, il est établi que ces paramètres présentent la corrélation linéaire la plus élevée avec l'indicateur de la technologie photovoltaïque. L'étude de Mahaya et al. (2022) a confirmé, à travers la corrélation et l'analyse de régression linéaire, que les paramètres de la morphologie urbaine et l'indicateur solaire actif (ASCI) présentent la corrélation linéaire la moins significative avec l'indicateur de technologie ST.

CONCLUSION

La modélisation énergétique en milieu urbain permet de mieux comprendre les impacts des constructions sur le potentiel énergétique, la réduction des émissions de CO₂ et l'optimisation des ressources naturelles. Dans ce contexte, ce chapitre a mis en évidence les conclusions de la modélisation énergétique réalisée à l'aide de Citysim Pro. Ces résultats indiquent que les toits des bâtiments étudiés présentent un potentiel solaire important, ce qui ouvre la voie à l'implantation de panneaux hybrides PV/ST. Ces résultats démontrent que même une superficie réduite dédiée à l'installation de panneaux hybrides peut satisfaire une part significative des exigences énergétiques. L'intégration des systèmes photovoltaïques sur les toits pourrait jouer un rôle crucial dans la transition énergétique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre et en promouvant la durabilité à long terme.

L'analyse de corrélation est une technique statistique couramment employée afin d'évaluer la relation entre deux variables ou plus. Elle permet d'établir si et dans quelle mesure les fluctuations d'une variable sont liées aux fluctuations d'une autre variable. En d'autres termes, elle permet d'évaluer l'intensité et la direction de la relation linéaire entre les variables.

Dans cette section, l'analyse exposée dans la seconde partie de ce chapitre se focalise sur l'étude de la corrélation entre les facteurs typo-morphologiques et la production d'énergie solaire hybride PV/ST. Cette étude souligne l'influence majeure de la forme urbaine sur la capacité de production d'énergie solaire hybride.

Les résultats obtenus sont en accord avec les conclusions des études précédentes, démontrant que les paramètres choisis présentent une corrélation significative avec les indicateurs de la technologie photovoltaïque et une corrélation faible avec les indicateurs de la technologie solaire thermique.

Conclusion générale

Conclusion

Générale

Conclusion générale

L'accroissement de la population citadine à l'échelle planétaire est en progression continue. Selon les prévisions en vigueur, on anticipe une augmentation de 25 % de la population mondiale d'ici 2050, avec l'urbanisation de 2,5 milliards de personnes supplémentaires au cours des trente prochaines années. D'autres facteurs de stress tels que la pollution de l'air, les changements climatiques et l'épuisement des ressources fossiles sont en hausse, mettant en lumière l'importance croissante d'un environnement construit plus durable et résistant. Ainsi, la question de la gestion de l'énergie est au centre des préoccupations dans différents domaines tels que les transports, l'industrie et le secteur de la construction.

Il est primordial de prendre en compte spécifiquement les bâtiments résidentiels déjà existants, qui se caractérisent par leur complexité due à divers facteurs tels que les habitudes des occupants, leur style de vie, la variété des types de bâtiments et les fluctuations des conditions climatiques.

De nos jours, les normes climatiques mondiales et la sécurité énergétique représentent des défis majeurs à l'échelle mondiale, tandis que l'environnement construit est considéré comme un élément crucial. Plus spécifiquement, le secteur du bâtiment a récemment été souligné pour sa consommation élevée d'énergie, son impact sur l'environnement et sa contribution à la perturbation de l'écosystème.

Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments existants apparaît comme la solution la plus appropriée pour aborder cette problématique. La réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ne se limite pas à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments existants, mais inclut également leur conformité aux réglementations en vigueur et leur adaptation aux défis environnementaux actuels.

En raison de sa localisation géographique, l'Algérie détient l'un des plus vastes gisements solaires mondiaux. Dans la majeure partie du territoire national, la durée d'ensoleillement excède 2000 heures par an et peut même atteindre 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Une surface plane de 1 mètre carré reçoit environ 3 kWh/m² d'énergie par an dans les régions septentrionales, tandis qu'elle reçoit plus de 5,6 kWh/m² dans les régions méridionales.

Conclusion générale

Au cours des trois dernières décennies, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) a enregistré la plus forte croissance parmi les sources d'énergie renouvelable (SER), représentant 36 %, tandis que l'énergie solaire thermique (ST) a occupé la quatrième place avec une croissance de 10,5 %.

D'après les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), l'énergie photovoltaïque devrait couvrir environ 30 % de la demande mondiale en électricité d'ici 2030, avec un taux de croissance annuel moyen estimé à 13 %. Les avantages des systèmes photovoltaïques intégrés au bâtiment et du solaire thermique sont multiples : ils permettent de transformer les surfaces non utilisées en sources actives d'énergie, de diminuer les pertes liées au transport et à la distribution de l'électricité grâce à une production locale, et d'offrir une flexibilité énergétique accrue en cas de conditions météorologiques extrêmes.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette étude est d'approfondir la compréhension du potentiel solaire des configurations urbaines. Elle a facilité l'identification de configurations urbaines plus appropriées pour l'intégration de systèmes hybrides PV/ST dans trois archétypes de bâtiments résidentiels à Guelma. Les particularités de la production d'énergie solaire hybride ont été analysées en tenant compte des spécificités de chaque configuration urbaine.

Chaque chapitre est conclu par une section récapitulative mettant en lumière la contribution apportée et synthétisant l'ensemble des informations présentées. Dans la suite, nous allons d'abord récapituler les diverses conclusions tirées de la recherche théorique. En outre, nous présentons les conclusions importantes de la partie pratique de la thèse en prenant en considération l'interrelation entre ses différents chapitres. La conclusion se compose de deux parties distinctes : la première présente les contributions majeures de l'étude, tandis que la seconde souligne les limites et les perspectives futures de la recherche.

Le premier chapitre traite de l'importance primordiale de la transition énergétique dans l'ensemble des activités humaines et de son impact sur l'amélioration du confort. Cela a été encouragé par le développement des sources d'énergie renouvelable. De nombreux pays ont adopté des politiques visant à améliorer la gestion et l'efficacité énergétique, ce qui s'avère crucial pour réduire la consommation d'énergie et résoudre les problèmes environnementaux.

Conclusion générale

Le deuxième chapitre de cette étude s'est concentré sur l'analyse de l'influence de la forme urbaine sur les potentiels énergétiques. En particulier, dans le secteur résidentiel, plusieurs facteurs typo-morphologiques ont été identifiés comme des critères déterminants influençant ces potentiels. Cette section a souligné l'impact significatif de la morphologie urbaine sur l'intégration des technologies d'énergie renouvelable, qu'il s'agisse de systèmes individuels ou hybrides.

Il apparaît ainsi indispensable d'intervenir sur les caractéristiques morphologiques à l'échelle urbaine afin d'optimiser la performance énergétique.

La configuration urbaine affecte non seulement la quantité de rayonnement solaire reçue par l'enveloppe des bâtiments, mais aussi le microclimat environnant et la dynamique des flux d'air à proximité des constructions. Des éléments tels que la compacité de la forme urbaine, la densité des constructions et leur agencement ont un impact significatif sur la capacité d'accès à l'irradiation solaire des espaces intérieurs et extérieurs. Sur cette base, le troisième chapitre a commencé par établir un état de l'art des recherches les plus influentes dans ce domaine.

La sélection a été basée sur le nombre des citations des travaux, et ainsi vingt articles ont été retenus en utilisant le logiciel d'intelligence artificiel Connected Papers. Ce chapitre a abordé ensuite les différentes méthodes de quantification énergétique, en mettant en lumière les outils utilisés dans la littérature scientifique. Les quinze premières études sélectionnées ont été classées à l'aide de l'outil d'intelligence artificielle mentionné précédemment.

Le quatrième chapitre est dédié à la présentation des éléments de contextualisation essentiels concernant la ville de Guelma afin d'aborder notre étude de cas. Dans cette optique, ce chapitre a présenté initialement la ville, en examinant simultanément son contexte historique, sa localisation géographique et ses particularités morphologiques.

Conclusion générale

Il propose en second lieu, une analyse climatologique de la ville de Guelma en utilisant le logiciel Climate Consultant qui peut convertir les données climatiques brutes en plusieurs représentations graphiques pertinentes. Le but n'est pas uniquement de recueillir des données climatiques, mais de les structurer et de les présenter de manière claire, mettant en évidence les caractéristiques subtiles du climat et leur influence sur l'architecture des bâtiments.

En conclusion, ce chapitre a traité de l'évolution urbaine de la ville de Guelma, marquée par l'émergence de diverses formes d'urbanisation. Elle se caractérise par trois phases majeures d'urbanisation (précoloniale, coloniale et post-coloniale).

La catégorisation des diverses typologies de logements urbains à Guelma nous a permis d'établir notre corpus d'analyse, lequel est présenté en tant que première section du cinquième chapitre. De même que l'identification des facteurs typo-morphologiques les plus significatifs pour notre étude. Ces indicateurs représentent un élément essentiel de cette recherche, ils ont été choisis à la suite d'une analyse approfondie de la littérature scientifique.

Ce chapitre expose la méthodologie employée dans cette étude, à savoir la méthode de quantification énergétique sur une géométrie 3D. Il analyse également l'efficacité énergétique des configurations urbaines en comparant les rendements des panneaux solaires photovoltaïques à ceux des panneaux solaires hybrides, dans le but de légitimer la sélection de la technologie solaire examinée.

Le chapitre final s'est penché sur l'analyse des résultats. Il s'est concentré sur les résultats de la calibration, l'évaluation de la production d'énergie solaire, ainsi que l'importance de cette étude pour l'amélioration de l'efficacité énergétique dans notre cas spécifique.

En dernier lieu, il a examiné l'influence des indicateurs de la forme urbaine sur la production d'énergie solaire hybride ce qui nous a permis de confirmer notre première hypothèse de recherche affirmant la corrélation significative entre la forme urbaine et le potentiel d'intégration des systèmes énergétiques hybride.

Conclusion générale

Les résultats de ce chapitre s'inscrivent dans les tendances actuelles de l'urbanisme, qui vise à accroître la densité des constructions tout en s'éloignant des plans dispersés du mouvement moderne ayant longtemps défini le tissu urbain des villes algériennes. Sur la base de cette analyse, ces conclusions peuvent être appliquées à d'autres villes algériennes présentant des environnements climatiques et urbains similaires à ceux de Guelma.

Ainsi, ces résultats ne confirment que partiellement la seconde hypothèse de recherche en démontrant qu'il n'existe pas de forme unique garantissant une production optimale ; il s'agit plutôt d'une combinaison de plusieurs facteurs conduisant à la meilleure configuration possible. De ce fait, en l'absence d'une configuration urbaine optimale pour la production hybride, les ensembles issus de l'intervention publique ou privé à cadre sociale, construit dans les années 2000, semble être un modèle exemplaire pour le contexte spécifique de Guelma.

Ces résultats ont des implications pratiques significatives pour les recommandations en matière de construction et de planification qui seront intégrées dans les instruments de planification urbaine futures, d'autant plus que l'Algérie est en voie de redéfinir sa politique de transition énergétique.

Les limites de la recherche

D'après une étude antérieure ([Harbi & Salah-Salah., 2023](#)) qui se fait sur le comportement des occupants où nous avons montré que ces derniers à un impact très important sur la consommation énergétique des bâtiments résidentiels.

Dans notre étude, nous avons obtenu une différence entre la consommation réelle et la consommation estimée d'un petit écart en raison de l'utilisation des données climatiques Métronome, qui sont des données climatiques moyennes et ne représentent pas les conditions météorologiques réelles pendant la période de mesure.

CitySim est basé sur des hypothèses de modélisation simplifiées afin d'établir un lien entre les besoins en données d'entrée, les exigences et le temps de calcul ([Kämpf, 2009](#)). Parmi ces limites, Citysim ne peut pas modéliser l'effet indésirable des panneaux solaires ; ce dernier projettera une ombre sur les bâtiments, réduisant ainsi ses gains solaires.

Conclusion générale

Les perspectives de développement

Enfin, cette étude se porte sur la corrélation entre les facteurs typo-morphologiques et le potentiel hybride PV-ST. Donc, il convient de noter que cette étude ouvre la porte à l'expérimentation de la morpho-énergétique via d'autres systèmes hybrides, tels que les systèmes solaire/éolien ou solaire/géothermique.

Sur la base de notre expérimentation, d'autres chercheurs pourraient réutiliser ce protocole méthodologique sur d'autres contextes urbain et climatique.

Cette étude a également ouvert la voie à d'autres recherches portant sur l'impact de la forme urbaine sur le potentiel énergétique, en utilisant d'autres méthodes de quantification énergétique telles que les méthodes basées sur les cartes d'irradiation, Google Street View, l'analyse de la géométrie solaire et les cartes d'ombre. Par la suite, les recherches à venir peuvent recourir à d'autres outils tels que CESAR, EnergyPlus, EnviBatE, SOLENE, etc.

Références bibliographiques

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Articles scientifiques

- Adolphe, L. (2001). A Simplified Model of Urban Morphology: Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Vol. 28, pp. 183-200. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/b2631?journalCode=epba>
- Afram, A., Janabi-Sharifi, F., Fung, A., Raahemifar, K. (2017). Artificial neural network (ANN) based model predictive control (MPC) and optimization of HVAC systems: A state-of-the-art review and case study of a residential HVAC system. *Energy and Buildings*, Vol. 141, 15 April 2017, pp. 96-113. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778816310799>
- Agra, T., Martins, D. L., Adolphe, L., Eurico, L., Bastos, G., Agra, M., & Martins, D. L. (2016). Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context. *Solar Energy*, Vol.137, pp.11–24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.053>
- Ahmadian, E., Sodagar, B., Bingham, C., Elnokaly, A., & Mills, G. (2021). Effect of urban built form and density on building energy performance in temperate climates. *Energy & Buildings*, Vol.236. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110762>
- Ahmadian, E., Sodagar, B., Mills, G., Byrd, H., Bingham, C., & Zolotas, A. (2019). Sustainable cities: The relationships between urban built forms and density indicators. *Cities*, Vol.95. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.06.013>
- Ahmad, M. W., Mourshed, M., & Rezgui, Y. (2017). Trees vs neurons: Comparison between random forest and ann for high-resolution prediction of building energy consumption. *Energy and Buildings*, 147, 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.038>
- Albdour, S, Balint, B. (2019). An overview of microclimate tools for predicting the thermal comfort, meteorological parameters and design strategies in outdoor spaces. *Pollack Periodica*, Vol. 14, pp. 109-118. <https://akjournals.com/view/journals/606/14/2/article-p109.xml>
- Andreou, E. (2014). The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean. *Renewable Energy*, Vol.63, pp.587–596. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2013.09.051>

Références bibliographiques

- Arantes. L, Marry. S, Baverel. O, Quenard. D. (2016). Efficacité énergétique et formes urbaines : élaboration d'un outil d'optimisation morpho-énergétique. *Energy balance in the urban built environment: a "morpho-energetic" optimisation tool*, Vol. 10, pp. 27-58.
<https://journals.openedition.org/cybergeogeo/27584>
- Ashari. M, Nayar. C, Keerthipala. W. (2001). Optimum operation strategy and economic analysis of a photovoltaic-diesel-battery-mains hybrid uninterruptible power supply. *Renewable Energy*, Vol. 22, pp. 247-254.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148100000136>
- Astrid. D, El Hassar. S, Baradiy. S. (2014). Guide pour une construction écoénergétique en Algérie. Programme, ressources naturelles. https://www.academia.edu/34739223/Guide_Construction_Eco_%C3%A9nerg%C3%A9tique_APRUE_GIZ
- Ayoub, M., & Elseragy, A. (2018). Parameterization of traditional domed-roofs insolation in hot-arid climates in Aswan, Egypt. *Energy & Environment*, Vol.29(1), pp.109–130.
<https://doi.org/10.1177/0958305X17741285>
- Badoud. A, Khemliche. M, Bouamama. B, Bacha. S, Lavado. V. (2013). Bond graph modeling and optimization of photovoltaic pumping system: Simulation and experimental results. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 36, pp. 84-103.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569190X13000804>
- Baker N., Steemers K., 2000, *Energy and environment in architecture: a technical design guide*, New-York, E&FN. DOI : 10.4324/9780203223017
- Bensehla. S, Lazri. Y, Brito. MC. (2021). Solar potential of urban forms of a cold semi-arid city in Algeria in the present and future climate. *Energy for Sustainable Development*, Vol. 62, pp. 151-162. https://www.researchgate.net/publication/351373162_Solar_potential_of_urban_forms_of_a_cold_semi-arid_city_in_Algeria_in_the_present_and_future_climate
- Bergmann. A, Hanley. N, Wright. R. (2006). Valuing the attributes of renewable energy investments. *Energy Policy*, Vol. 34, pp. 1004-1014.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421504002782>

Références bibliographiques

- Berkouk, D., Bouzir, T., Mazouz, S., Boucherit, S., Mokhtari, N. (2022). Studying the influence of shading devices on indoor thermal comfort in desert and Mediterranean climates. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 992(1), pp. 004012.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/992/1/012004>
- Bertaud, A & Malpezzi, S. (2003). The Spatial Distribution of Population in 48 World Cities : Implications for Economies in Transition. http://alain-bertaud.com/AB_Files/Spatia_%20Distribution_of_Pop_%2050_%20Cities.pdf
- Bianchi, C., Overby, M., Willemsen, P., Smith, A. D., Stoll, R., & Pardyjak, E. R. (2020). Quantifying effects of the built environment on solar irradiance availability at building rooftops. *Journal of Building Performance Simulation*, 13(2), 195-208.
<https://doi.org/10.1080/19401493.2019.1679259>
- Bie, Z., Lin, Y., Li, G., Jin, X., Hua, B. (2013). Smart Grid in China: a promising solution to China's energy and environmental issues. *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 70, pp. 702-718
- Borie, A, Pinon, P, Yerasimos, S. (1991). Tokat : essai sur l'architecture domestique et la forme urbaine. *Anatolia moderna Yeni anadolu*, Vol. 1, pp. 239-273. https://www.persee.fr/doc/anatm_1297-8094_1991_num_1_1_861
- Boumaouche, M & Bouchahem, Y. (2017). Contribution de la géothermie dans la réhabilitation énergétique des maisons individuelles, cas de Constantine/ville Hamma.B Algérie. *Sciences & technologies*, N°46, pp. 57-69. <http://revue.umc.edu.dz/index.php/d/article/view/2779>
- Bouramdane, A. (2022). Chaleur caniculaire, incendies gigantesques à répétition: des signes du changement climatique ?. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7594264>
- Bowen, A, Cowie, M, Zakay, N. (2001). The performance of a remote wind–diesel power system. *Renewable Energy*, Vol. 22, pp. 429-445.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148100001002>
- Bruun Jørgensen, O., Dahlberg, J., Deschamps, L., Delmas, A., Florio, P., Frontini, F., Garde, F., Giostra, S., Kanters, J., Kappel, K., Korolkow, M., Tilmann, K., & Lun, K. (2018). Approaches, Methods and Tools for Solar Energy in Urban Planning. <https://doi.org/10.18777/ieashc-task51-2018-0004>
- Cao, X., Dai, X., & Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, 128, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>

Références bibliographiques

- Chatzipoulka, C., Compagnon, R., Kaempf, J., & Nikolopoulou, M. (2018). Sky view factor as predictor of solar availability on building façades. *Solar Energy*, 170, 1026-1038.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.028>
- Chow, A., Fung, A. S., & Li, S. (2014). GIS Modeling of Solar Neighborhood Potential at a Fine Spatiotemporal Resolution. *Buildings*, 4(2), Article 2.
<https://doi.org/10.3390/buildings4020195>
- Christopher. W, Ajan. S, Shahnawaz. A, Hussien. B, Faridah. T, Abdullah. B. Mohd. Z. (2003). On the policy of photovoltaic and diesel generation mix for an off-grid site : East Malaysian perspectives. *Solar Energy*, Vol. 74, pp. 453-467.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X03002287>
- Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, Vol.36(4), pp.321–328. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.009>
- Copiello. S. (2017). Building energy efficiency: A research branch made of paradoxes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, pp. 1064-1076.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116305858>
- Croce. S, Vettorato. D. (2021). Urban surface uses for climate resilient and sustainable cities: A catalogue of solutions. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 75, pp. 103-313.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721005898>
- De Lemos Martins, T. A., Adolphe, L., Bastos, L. E. G., & de Lemos Martins, M. A. (2016). Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context. *Solar Energy*, 137, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.0>
- De Lemos Martins, T. A., Faraut, S., & Adolphe, L. (2019). Influence of context-sensitive urban and architectural design factors on the energy demand of buildings in Toulouse, France. *Energy and Buildings*, 190, 262–278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.019>
- De Luca, F., Dogan, T., & Sepúlveda, A. (2021). Reverse solar envelope method. A new building form-finding method that can take regulatory frameworks into account. *Automation in Construction*, Vol.123. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2020.103518>
- Eddrief-Cherfi. S. (2019). L'énergie renouvelable en Algérie Quelles alternatives aux énergies fossiles? *Solaire, nucléaire ou les deux à la fois. Energies renouvelables*, N°609, pp. 372-387.

Références bibliographiques

- Elnokaly, A., Ayoub, M., & Elseragy, A. (2019). Parametric investigation of traditional vaulted roofs in hot-arid climates. *Renewable Energy*, Vol.138, pp.250–262. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.061>
- Elnokaly, A., & Thomas, M. (2019). Sustainable management of native landscape / woodland in the transition to a low carbon society. *Habitat International*, Vol.90. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.05.007>
- Elseragy, A., & Elnokaly, A. (2007). Assessment criteria for form environmental performance of building envelope in hot arid climates. *Sun, Wind and Architecture - The Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, PLEA 2007*, November, pp.169–175
- Épaulard, A., & Malliet, P. (2024). La transition écologique en europe : tenir le cap
- Erling Holden. E. (2004). Ecological footprints and sustainable urban form. *Journal of Housing and the Built Environment*, Vol. 19, pp. 91-109. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:JOHO.0000017708.98013.cb>
- Evins. R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 22, pp. 230-245. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113000920>
- Fokaides. P, Christoforou. E, Ilic. M, Papadopoulos. A. (2016). Performance of a Passive House under subtropical climatic conditions. *Energy and buildings*, Vol. 133, pp. 14-31. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778816309586>
- Fonseca. J, Nguyen. T, Schlueter. A, Marechal. F. (2016). City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy and Buildings*, Vol. 113, pp. 202–226. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.11.055>
- Foura. S, Zerouala. M. (2007). Simulation des paramètres architecturaux du confort d'hiver en Algérie. *Sciences & Technologie*. Vol. 26. <https://revue.umc.edu.dz/index.php/d/article/view/534>
- Ghedamsi, R., Settou, N., Gouareh, A., Khamouli, A., Saifi, N., Recioui, B., & Dokkar, B. (2016). Modeling and forecasting energy consumption for residential buildings in Algeria using bottom-up approach. *Energy and Buildings*, 121, 309-317. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.030>
- Gong. F, Zeng. Z, Ng. E, Norford. L. (2019). Spatiotemporal patterns of streetlevel solar radiation estimated using Google Street View in a high-density urban environment. *Building and Environment*, Vol. 148, pp. 547–566. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.10.025>

Références bibliographiques

- Gong, J, Kostro, A, Motamed, A, Schueler, A. (2016). Potential advantages of a multifunctional complex fenestration system with embedded micro-mirrors in daylighting. *Solar Energy*, Vol. 139, pp. 412-425. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X16304765>
- Greggio, R., & Maff'ei, B. (2016). La pénurie ´ énergétique, obstacle insurmontable ` a la croissance ´ économique des pays africains ? *Géoéconomie*, 82(5), 133–148. <https://doi.org/10.3917/geoec.082.0133>
- Grenier, A. (2007). Ville et énergie : spécificité et complexité de la question en France. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, Vol. 103, pp. 128-136. https://www.persee.fr/doc/aru_0180-930x_2007_num_103_1_2722
- Groppi, D., de Santoli, L., Cumo, F., & Astiaso Garcia, D. (2018). A GIS-based model to assess buildings energy consumption and usable solar energy potential in urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 40, 546-558. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.005>
- Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., & Musy, M. (2016). Simulation tools to assess microclimate and building energy – A case study on the design of a new district. *Energy and Buildings*, Vol.114, pp.112–122. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.06.032>
- Hadjadj, R., Deak, ´ C., Palot´ as, A. ´ B., Mizsey, P., & Viskolcz, B. (2019). Renewable energy and raw materials – The thermodynamic support. *Journal of Cleaner Production*, 241, Article 118221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118221>
- Hamiti, D., & Bouzadi-daoud, S. (2021). Etude du concept du développement durable. *مجلة ابن خلدون للإبداع والتنمية*, 3(2), 147–133.
- Harbi, I., Salah-Salah, H., Bensehla, S., Gherraz, H., & Alkama, D. (2024). “Assessment of hybrid solar energy potential in semi-arid urban residential buildings : A study on Guelma town in northern Algeria”. *Energy for Sustainable Development*, 81, 101521. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101521>
- Isabel, C, María, S, Angel, M. (2022). Urban Wind : An Alternative for Sustainable Cities. *Energies*, Vol. 15, pp. 47-59. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4759>
- Kamaruzzaman, S, Ali, A, Adnan, I, Hussein, K. (2019). Evaluation and Design Criteria of Photovoltaic Thermal (PV/T). *ScienceDirect*, Vol. 19, pp. 1111-1118. https://www.academia.edu/92702571/Evaluation_and_Design_Criteria_of_Photovoltaic_Thermal_PV_T_?email_work_card=title
- Kanase-Patil, A, Saini, R, Sharma, M. (2010). Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area. *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 1342-1349. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148109004315>

Références bibliographiques

- Kanters. J, Horvat. M, Dubois. M. (2014a). Tools and methods used by architects for solar design. *Energy and Buildings*, Vol. 68(PART C), pp. 721–731. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.031>
- Kanters. J, Horvat. M, Dubois. M. (2014b). Tools and methods used by architects for solar design. *Energy and Buildings*, Vol. 68(PART C), pp. 721–731. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.05.031>
- Kapsalaki, M., Leal, V., & Santamouris, M. (2011). A methodology for economic efficient design of net zero energy buildings. *Energy Build*, 43, 3279-3288.
- Karteris, M., Slini, Th., & Papadopoulos, A. M. (2013). Urban solar energy potential in Greece : A statistical calculation model of suitable built roof areas for photovoltaics. *Energy and Buildings*, 62, 459-468. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.033>
- Kevin Lynch. K & Hack. G. (1984). Site Planning. *The Ecological Design and Planning Reader*, pp. 386-378. https://link.springer.com/chapter/10.5822/978-1-61091-491-8_31
- Labeeuw, F. L., Dujardin, S., Lambotte, J. M., & Teller, J. (2011). Morphologie urbaine et consommation énergétique du bâti résidentiel pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. *The Eighteenth International Seminar on Urban Morphology and the Post-Carbon City*. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/98157>
- Lau, K. K., Lindberg, F., Johansson, E., Isabel, M., & Thorsson, S. (2017). Investigating solar energy potential in tropical urban environment: A case study of Dar es Salaam, Tanzania. *Sustainable Cities and Society*, Vol.30, pp.118–127. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.010>
- Lazarov. V, Schaeffer. C, Shishkov. M, Ivanova. M. (2005). Hybrid solar collector. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 161, pp. 229-233. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013604009215>
- Lee, K. S., Lee, J. W., & Lee, J. S. (2016). Feasibility study on the relation between housing density and solar accessibility and potential uses. *Renewable Energy*, 85, 749-758. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.070>
- Levasseur. V, Pasquini. M, Kouamé. C, Temple. L. (2006). A review of urban and peri-urban vegetable production in West Africa. *Acta Horticulturae*, Vol. 762, pp. 245-252. [urban_vegetable_production_in_West_Africa](https://doi.org/10.1016/j.actahort.2006.06.001)

Références bibliographiques

- Levinson, R., Akbari, H., Pomerantz, M., Gupta, S. (2009). Solar access of residential rooftops in four California cities. *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 2120-2135.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X0900173X>
- Levy, A. (2005). Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*, Vol. 122, pp. 25-48. <https://www.cairn.info/revue-espaces-et-societes-2005-3-page-25.htm>
- Lévy, J. P., Roudil, N., Flamand, A., & Belaïd, F. (2014). Les déterminants de la consommation énergétique domestique. *Flux*, 96(2), 40-54. <https://doi.org/10.3917/flux.096.0040>
- Li, B., Yao, R. (2012). Building energy efficiency for sustainable development in China: challenges and opportunities. *Building Research & Information*, Vol. 40, pp. 417-431.
DOI: 10.1080/09613218.2012.682419
- Li, C., Song, Y., & Kaza, N. (2018). Urban form and household electricity consumption: A multilevel study. *Energy and Buildings*, Vol.158, pp.181–193.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.007>
- Li, D., Liu, G., & Liao, S. (2015). Solar potential in urban residential buildings. *Solar Energy*, Vol.111, pp.225–235. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.045>
- Li, Y. L., Han, M. Y., Liu, S. Y., & Chen, G. Q. (2019). Energy consumption and greenhouse gas emissions by buildings: A multi-scale perspective. *Building and Environment*, 151, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.003>
- Li, Y, Liu, C. (2017). Estimating solar energy potentials on pitched roofs. *Energy and Buildings*, Vol. 139, pp. 101–107. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.12.070>
- Lobaccaro, G., Carlucci, S., Croce, S., Paparella, R., & Finocchiaro, L. (2017). Boosting solar accessibility and potential of urban districts in the Nordic climate: A case study in Trondheim. *Solar Energy*, Vol.149, pp.347–369.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.015>
- Lobaccaro, G., Lindkvist, C., & Wall, M. (2018). Lessons Learnt from Case Studies of Solar Energy in Urban Planning. <https://doi.org/10.18777/ieashc-task51-2018-0003>
- Lobaccaro, G., Lisowska, M. M., Saretta, E., Bonomo, P., & Frontini, F. (2019). A Methodological Analysis Approach to Assess Solar Energy Potential at the Neighborhood Scale.
<https://doi.org/10.3390/en12183554>

Références bibliographiques

- Lopez-Ruiz, H, Blazquez, J, Vittorio, M. (2020). Assessing residential solar rooftop potential in Saudi Arabia using nighttime satellite images: A study for the city of Riyadh. *Energy Policy*, Vol. 140, pp. 111-399. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421520301531>
- Mahaya, C., Zemmouri, N., Benharra, H., & Elnokaly, A. (2022). Solar Access Assessment in Semi-Arid Urban Context: An Application Study for Ten Urban Forms of Existing Apartment Buildings Districts in Batna City, Algeria. *Sustainable Cities and Society*, Vol.83. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103909>
- Maignant. (2005). Compacité et forme urbaine, une analyse environnementale dans la perspective d'un développement urbain durable. Actes du colloque Développement urbain durable, gestion des ressources et gouvernance. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=fr&user=89dFS9AAAAAJ&citation_for_view=89dFS9AAAAAJ:zYLM7Y9cAGgC
- Mainzer, K., Killinger, S., McKenna, R., & Fichtner, W. (2017). Assessment of rooftop photovoltaic potentials at the urban level using publicly available geodata and image recognition techniques. *Solar Energy*, 155, 561-573. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.065>
- Maïzia. (2007). L'énergétique urbaine et la morphologie des villes. L'analyse du bâti parisien. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, Vol.103, 9pp.79-85. https://www.persee.fr/doc/aru_0180-930x_2007_num_103_1_2716
- Maïzia, M. (2010). Densité énergétique versus densité urbaine. *Études foncières*, N°145, pp. 37-38. <https://www.aurm.org/uploads/media/f7018dfe821c61135f2016a5d277c984.pdf>
- Marshall, S. (2012). Science, pseudo-science and urban design. *URBAN DESIGN International*, Vol. 17, pp. 257-271. <https://link.springer.com/article/10.1057/udi.2012.22>
- Martínez-Gracia, A, Del Amo, A., Torné, S, Bayod-Rújula, A, Uche, J, Usón, S. (2019). Solar-assisted heat pump coupled to solar hybrid panels. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'19)*, Vol.17. https://zaguan.unizar.es/record/87637/files/texto_completo.pdf
- Martins, T. A. de L., Adolphe, L., Bastos, L. E. G., & Martins, M. A. de L. (2016). Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context. *Solar Energy*, Vol.137, pp.11–24. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.07.053>
- Martins, T. A. de L., Faraut, S., & Adolphe, L. (2019). Influence of context-sensitive urban and architectural design factors on the energy demand of buildings in Toulouse, France. *Energy*

Références bibliographiques

- Massot M.-H., Orfeuill J.-P., 2007, "La contrainte énergétique doit-elle réguler la ville ou les véhicules ? Mobilités urbaines et réalisme écologique", *Les Annales de la recherche urbaine*, No.103, 1-14. DOI : 10.3406/aru.2007.2710
- Mendis, T., Huang, Z., Xu, S., & Zhang, W. (2020). Economic potential analysis of photovoltaic integrated shading strategies on commercial building facades in urban blocks: A case study of Colombo, Sri Lanka. *Energy*, 194, 116908. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116908>
- Merzaux, J. (2023). Le GIEC, urgence climat. Le rapport incontestable expliqué à tous // Sylvestre Huet, Paris, Tallandier, 2023, 261 p. *Revue internationale et stratégique*, 132(4), 152-153. <https://doi.org/10.3917/ris.132.0152>
- Miao, C., Yu, S., Hu, Y., Zhang, H., He, X., & Chen, W. (2020). Review of methods used to estimate the sky view factor in urban street canyons. *Building and Environment*, 168, 106497. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106497>
- Mindali, O., Raveh, A., Salomon, I. (2004). Urban density and energy consumption: a new look at old statistics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 38, pp. 143-162. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965856403000946>
- Mohajeri, N., Gudmundsson, A., Kunckler, T., Upadhyay, G., Assouline, D., Kämpf, J., Scartezzini, J. (2019). A solar-based sustainable urban design: The effects of cityscale street-canyon geometry on solar access in Geneva, Switzerland. *Applied Energy*, Vol.240, pp.173–190. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.02.014>
- Mohajeri, N., Perera, A. T. D., Coccolo, S., Mosca, L., Le Guen, M., & Scartezzini, J.-L. (2019). Integrating urban form and distributed energy systems: Assessment of sustainable development scenarios for a Swiss village to 2050. *Renewable Energy*, 143, 810-826. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.033>
- Mohajeri, N., Upadhyay, G., Gudmundsson, A., Assouline, D., Kämpf, J., & Scartezzini, J. L. (2016). Effects of urban compactness on solar energy potential. *Renewable Energy*, Vol.93, pp.469–482. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.02.053>
- Monin, E., Descat, S., Siret, D. (2002). L'émergence du développement durable au regard des mutations de l'histoire urbaine. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, Vol. 92, pp. 7-16. <https://shs.hal.science/halshs-00574278/>
- Morganti, M., Salvati, A., Coch, H., & Cecere, C. (2017). Urban morphology indicators for solar energy analysis. *Energy Procedia*, Vol.134, pp.807–814.

Références bibliographiques

- Morrissey, J, Moore, T, Horne, R. (2011). Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation. *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 568-577.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148110003836>
- Morvaj, B, Evins, R, Carmeliet, J. (2017). Decarbonizing the electricity grid: The impact on urban energy systems, distribution grids and district heating potential. *Applied Energy*, Vol. 191, pp. 125-140. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917300661>
- Mousel. (1999). Maîtrise de l'énergie et effet de serre : De la maîtrise de l'énergie aux politiques et mesures. *La maitrise de l'énergie*, N°42, pp. 4-7. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=1189299>
- Mousseau, N. (2015). La maîtrise de l'énergie, une approche intégrée permettant au Québec de transformer à la fois sa consommation énergétique et de faire face à ses responsabilités environnementales (p. 15-22). http://w3.uqo.ca/crdc/00_fichiers/publications/cahiers/C15.pdf
- Muljadi, E & Bialasiewicz, J. (2003). Hybrid power system with a controlled energy storage. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1280240/authors#authors>
- Mumford, E. (2006). The story of socio-technical design: reflections on its successes, failures and potential. *Information systems journal*, Vol. 16, pp. 317-342.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2575.2006.00221.x>
- Muselli, M, Notton, G, Poggi, P, Louche, A. (2000). PV-hybrid power systems sizing incorporating battery storage: an analysis via simulation calculations. *Renewable Energy*, Vol. 20, pp. 1-7.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148199000944>
- Mutani, G, Gamba, A, Maio, S. (2016). "Space heating energy consumption and urban form. The case study of residential buildings in Turin (Italy)". In: 11th Conference on Sustainable of Energy, Water and Environmental Systems
- Natanian, J., Aleksandrowicz, O., & Auer, T. (2019). A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts. *Applied Energy*, Vol.254.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113637>
- Natanian, J., & Wortmann, T. (2021). Simplified evaluation metrics for generative energy driven urban design: A morphological study of residential blocks. *Energy and Buildings*, Vol.240. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110916>

Références bibliographiques

- Nault, E., Peronato, G., Rey, E., & Andersen, M. (2015). Review and critical analysis of early-design phase evaluation metrics for the solar potential of neighborhood designs. *Building and Environment*, 92, 679-691. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.012>
- Newman. P & Kenworthy. J. (1991). Transport and urban form in thirty-two of the world's principal cities. *Transport Reviews*, Vol. 11, pp. 249-272.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01441649108716787>
- Newman. (2000). *Forme de la ville et transport-vers un nouvel urbanisme*. Les cahiers de l'IAURIF, N°114-115, pp. 98-109. <https://www.jstor.org/stable/43122294>
- Ng. E, Yuan. C, Chen. L, Ren. C, Fung. J. (2011). Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 101, pp. 59-74.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204611000326>
- Notton. G, Cristofari. C, Poggi. P, Muselli. M. (2001). Wind hybrid electrical supply system: behaviour simulation and sizing optimization. *Wind Energy*, Vol. 4, pp. 43-59.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/we.46>
- O'Brien L.W., Kennedy C.A., Athienitis A.K., Kesik T.J., 2010, "The relationship between net energy use and the urban density of solar buildings", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol.37, No.6, 1002-1021. DOI: 10.1068/b36030
- Ouria, M., & Sevinc, H. (2018). Evaluation of the potential of solar energy utilization in Famagusta, Cyprus. *Sustainable Cities and Society*, 37, 189-202.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.036>
- Papakostas, K. T., Papadopoulos, A. M., & Vlahakis, I. G. (2005). Optimization of thermal protection in residential buildings using the variable base degree-days method. *International Journal of Sustainable Energy*, 24, 19-31.
https://www.researchgate.net/publication/242203796_Optimisation_of_thermal_protection_in_residential_buildings_using_the_variable_base_degree-days_method
- Penaka, S., Saini, P., Zhang, X., & Amo, A. (2020). Digital Mapping of Techno-Economic Performance of a Water-Based Solar Photovoltaic/Thermal (PVT) System for Buildings over Large Geographical Cities. *Buildings*, 10, 148.

Références bibliographiques

- Pickett, S., Cadenasso, M., Grove, J. (2004). Resilient cities: meaning, models, and metaphor for integrating the ecological, socio-economic, and planning realms. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 69, pp. 369-384.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169204603002524>
- Pisani-Ferry, J., & Martin, A. (2017). L'Europe doit apprendre à agir dans une logique de puissance. *L'économie politique*, 2, 8–13. <https://www.cairn.info/revue-l-economie-politique-2017-2-page-8.htm>.
- Pollard J. (2011). Les groupes d'intérêt vus du local : les promoteurs immobiliers dans le secteur du logement en France. *Revue française de science politique*, Vol.61, No.4, pp. 681-706.
<https://www.jstor.org/stable/43122294>
- Poon, K. H., Kämpf, J. H., Tay, S. E. R., Wong, N. H., & Reindl, T. G. (2020). Parametric study of URBAN morphology on building solar energy potential in Singapore context. *Urban Climate*, 33, 100624. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100624>
- Ranjgar, B., & Niccolai, A. (2023). Large-scale rooftop solar photovoltaic power production potential assessment: A case study for Tehran metropolitan area, Iran. *Energies*, 16. <https://doi.org/10.3390/en16207111>
- Raquel, S & Daniel, W. (2006). A wind–diesel system with hydrogen storage: Joint optimisation of design and dispatch. *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 2296-2320.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014810500337X>
- Ratti, C, Baker, N, Steemers, K. (2005). Energy Consumption and Urban Texture. *Energy and buildings*, Vol. 37, pp. 762-776.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778804003391>
- Redweik, P., Catita, C., & Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, Vol.97, pp.332–341.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036>
- Reinhart, C. F., & Davila, C. C. (2016). Urban building energy modeling—a review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- Rit, M., Garreau, E., Thorel, M., Villot, J., & Girard, R. (2024). Optimiser les stratégies de rénovation des bâtiments résidentiels à l'échelle territoriale : Analyse des plans climats de différentes villes

Références bibliographiques

- Robinson. D, Campbell. N, Gaiser. W, Kabel. K, Le-Mouel. A, Morel. N, Page. J, Stankovic. S, Stone. A. (2007). SUNtool–A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. *Solar Energy*, Vol. 81(9), pp. 1196–1211. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.06.002>.
- Robinson, D. (2009). Urban morphology and indicators of radiation availability. *Solar Energy*, Vol.80(12), pp.1643–1648. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.01.007>
- Rocha. P, Siddiqui. A, Stadler. M. (2015). Improving energy efficiency via smart building energy management systems: A comparison with policy measures. *Energy and Buildings*, Vol. 88, pp. 203-213. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814010469>
- Roger F, Peter J.G. (2012). Past and prospective energy transitions: Insights from history. *Energy Policy*, Vol. 50, pp. 1-7. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421512006805>
- Romero Rodríguez. L, Duminil. E, Sánchez Ramos. J, Eicker. U. (2017). Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach. *Solar Energy*, Vol. 146, pp 264–275. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.02.043>
- Said, S., Habib, M., & Iqbal, M. (2003). Database for building energy prediction in Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*. 44, 191-201. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890402000420>
- Salah-Salah, H., & Harbi, I. (2023). About the regulatory framework for improving the energy efficiency of buildings : An overview of the Algerian Context. *Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.38027/iccaua2023en0088>
- Salat. S & Nowacki. C. (2010). De l'importance de la morphologie dans l'efficience énergétique des villes. *Energie et territoires*, N°86, pp. 141-146. <http://www.urbanmorphologyinstitute.org/de-limportance-de-la-morphologie-dans-lefficience-energetique-des-villes/>
- Samuelson. H, Claussnitzer. S, Goyal. A, Chen. Y. (2016). Parametric energy simulation in early design: High-rise residential buildings in urban contexts. *Building and Environment*, Vol. 101, pp. 19-31. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132316300622>
- Sanaieian, H., Tenpierik, M., Linden, K. Van Den, Mehdizadeh Seraj, F., & Mofidi Shemrani, S. M. (2014). Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.38, pp.551–560. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.007>

Références bibliographiques

- Sark. V, Lysen. E, Cocard. D, Beutin. P, Merlo. G, Wajeeh. A. (2006). The first PV-Diesel hybrid system in the maldives installes at mandhoo island. *Renewable*, pp. 1-5.
https://www.researchgate.net/profile/Wilfried-Van-Sark/publication/46691530_TheFirstPV-Diesel-Hybrid-System-in-the-Maldives-Installed-at-Mandhoo-Island/links/0912f5093e942beb10000000/The-First-PV-Diesel-Hybrid-System-in-the-Maldives-Installed-at-Mandhoo-Island.pdf
- Sarralde. J, Quinn. D, Wiesmann. D, Steemers. K. (2015). Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London. *Renewable Energy*, Vol.73, pp.10–17. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2014.06.028>
- Schneider. R. (2010). Déchets - Énergie. *Annuaire des Collectivités Locales*, Vol. 29, pp. 585-605.
https://www.persee.fr/doc/coloc_2111-8779_2009_num_29_1_2104
- Senthilarasu. S, Manosh. P, Yasser. M. (2022). Research on Hybrid Solar Photovoltaic/Thermal (PV/T) System. *Energies*, Vol. 18, pp. 886-889. https://www.academia.edu/103489512/Research_on_Hybrid_Solar_Photovoltaic_Thermal_PV_T_System?email_work_card=title
- Seong. Y., Kim, Y., Seok, H., Choi, J., & Yeo, M. (2011). Automatic computation for optimum height planning of apartment buildings to improve solar access. *Solar Energy*, Vol.85(1), pp.154–173. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.10.007>
- Shaahid. S & Elhadidy. M. (2003). Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic + diesel + battery) power systems in hot climates. *Renewable Energy*, Vol. 28, pp. 1741-1753.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148103000132>
- Shaahid. S & Elhadidy. M. (2004). Promoting applications of hybrid (wind + photovoltaic + diesel + battery) power systems in hot regions. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 517-528.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148103002805>
- Singh. R, Banerjee. R. (2015). Estimation of rooftop solar photovoltaic potential of a city *Solar Energy*, Vol. 115, pp. 589–602. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.03.016>
- Sophie M. (2014). La nouvelle révolution ou la renaissance des États-Unis. *Outre-Terre*, Vol.38, pp. 29-65. <https://www.cairn.info/revue-outre-terre2-2014-1-page-29.htm>
- Stefania.C, Salvatore. R, Giuseppe. T. (2005). Simulink modelling of LV photovoltaic grid-connected distributed generation. 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5427951/authors#authors>

Références bibliographiques

- Surahman, U., Hartono, D., Setyowati, E., & Jurizat, A. (2022). Investigation on household energy consumption of urban residential buildings in major cities of Indonesia during COVID-19 pandemic. *Energy and Buildings*, Vol.261. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111956>
- Svensson, M. K. (2004). Sky view factor analysis – implications for urban air temperature differences. *Meteorol. Appl.* 11, 201–211
- Swanson, S. R., & Boehm, R. F. (1977). Calculation of long term solar collector heating system performance. *Solar Energy*, Vol.19(2), pp.129–138. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90050-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(77)90050-0)
- Takebayashi, H., Ishii, E., Moriyama, M., Sakaki, A., Nakajima, S., & Ueda, H. (2015). Study to examine the potential for solar energy utilization based on the relationship between urban morphology and solar radiation gain on building rooftops and wall surfaces. *Solar Energy*, Vol.119, pp.362–369. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.05.039>
- Tang, L., Li, J., Du, H., Li, L., Wu, J., & Wang, S. (2022). Big Data in Forecasting Research: A Literature Review. *Big Data Research*, Vol.27. <https://doi.org/10.1016/J.BDR.2021.100289>
- Tian, J., & Xu, S. (2021). A morphology-based evaluation on block-scale solar potential for residential area in central China. *Solar Energy*, Vol.221, pp.332–347. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.049>
- Trepci, E., Maghelal, P., & Azar, E. (2020). Effect of densification and compactness on urban building energy consumption: Case of a transit-oriented development in Dallas, TX. *Sustainable Cities and Society*, 56, Article 101987. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101987>
- Vartholomaios, A. (2015). The residential solar block envelope: A method for enabling the development of compact urban blocks with high passive solar potential. *Energy and Buildings*, Vol.99, pp.303–312. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.04.046>
- Vulkan. A, Kloog. I, Dorman. M, Erell. E. (2018). Modeling the potential for PV installation in residential buildings in dense urban areas. *Energy and Buildings*, Vol. 169, pp. 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.052>
- Walter. E, Kämpf. J. (2015). A verification of CitySim results using the BESTEST and monitored consumption values. *Proceedings of the 2nd building simulation applications conference*, pp. 215-222. <https://infoscience.epfl.ch/record/214754>

Références bibliographiques

- Wang, D., Landolt, J., Mavromatidis, G., Orehounig, K., & Carmeliet, J. (2018). CESAR: A bottom-up building stock modelling tool for Switzerland to address sustainable energy transformation strategies. *Energy and Buildings*, Vol.169, pp.9–26.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.03.020>
- Wheal, R., Fulford, D., Wheldon, A., Oldach, R. (2004). Photovoltaics (PV) in social housing. *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 25, pp. 12-18.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01430750.2004.9674932>
- Wiginton, L. K., Nguyen, H. T., & Pearce, J. M. (2010). Computers, Environment and Urban Systems Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.34(4), pp.345–357.
- Wu, R, Mavromatidis, G, Orehounig, K, Carmeliet, J. (2017). Multi objective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community. *Applied Energy*, Vol. 190, pp. 634-649. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916319419>
- Xiang, C., Matusiak, B. S., Røyset, A., & Kolås, T. (2021). Pixelization approach for façade integrated coloured photovoltaics-with architectural proposals in city context of Trondheim, Norway. *Solar Energy*, Vol.224, pp.1222–1246.
<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.06.079>
- Xu, S., Huang, Z., Wang, J., Mendis, T., & Huang, J. (2019). Evaluation of photovoltaic potential by urban block typology: A case study of. *Reinforced Plastics*, Vol.29, pp.141–147.<https://doi.org/10.1016/j.ref.2019.03.002>
- Xu, S., Jiang, H., Xiong, F., Zhang, C., Xie, M., & Li, Z. (2021). Evaluation for block-scale solar energy potential of industrial block and optimization of application strategies: A case study of Wuhan, China. *Sustainable Cities and Society*, Vol.72.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103000>
- Xu, Z, Liu, S, Hu, G, Spanos, C. (2017). Optimal coordination of air conditioning system and personal fans for building energy efficiency improvement. *Energy and Buildings*, Vol. 141, pp. 308-320. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778816319363>
- Zhang, J., Xu, L., Shabunko, V., Tay, S. E. R., Sun, H., Lau, S. S. Y., & Reindl, T. (2019). Impact of urban block typology on building solar potential and energy use efficiency in tropical high-density city. *Applied Energy*, Vol.240, pp.513–533.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.02.033>
- Zhong, X., Hu, M., Deetman, S., Rodrigues, J. F., Lin, H.-X., Tukker, A., & Behrens, P. (2021). The evolution and futures perspectives of energy intensity in the global building sector 1971–2060. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127098.

Références bibliographiques

Zhu, R., Wong, M. S., You, L., Santi, P., Nichol, J., Ho, H. C., Lu, L., & Ratti, C. (2020). The effect of urban morphology on the solar capacity of three-dimensional cities. *Renewable Energy*, 153, 1111-1126. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.050>

Zuckerman, J., Koval, K., Kenneth, J., Aharonoff, G., Hiebert, R., Skovron, M. (2000). A Functional Recovery Score for Elderly Hip Fracture Patients: I. Development. *Journal of Orthopaedic Trauma*, Vol. 14, pp. 20-25.
https://journals.lww.com/jorthotrauma/Abstract/2000/01000/A_Functional_Recovery_Score_for_Elderly_Hip.5.aspx

Livres

ALAIN Borie, Pierre Micheloni, Pierre Pinon, 2006. *Forme et déformation des objets architecturaux et urbains*. Editions Parenthèses. Consulté 16 août 2024, à l'adresse <https://www.editionsparentheses.com/forme-et-deformation-des-objets>

ALLAIN Rémy, 2004. *Morphologie urbaine. Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Paris, Armand Colin, 256 pages. <https://www.erudit.org/fr/revues/cgq/2005-v49-n138-cgq1092/012570ar/>

BOUDON Françoise, Chastel André, Couzy Hélène, et al., 1977. *Système de l'architecture urbaine : le quartier des Halles*. Paris, Ed. Centre national de la recherche scientifique. 414 pages. <https://www.cnrseditions.fr/catalogue/arts-et-essais-litteraires/systeme-de-larchitecture-urbaine/>

DOUADY Clément, 2014. *De la trace à la trame : La voie, lecture du développement urbain*. 1-255

FRANCOISE Choay, 1965. *Urbanisme, utopies et réalités. Une anthologie*. Paris, Edition du Seuil, 448 pages. <https://www.seuil.com/ouvrage/urbanisme-utopies-et-realites-une-anthologie-francoise-choay/9782020020091>

DROEGE Peter, 2018. *Urban Energy Transition : Renewable Strategies for Cities and Regions* (2nd edition). Elsevier

ELAME Esoh, Nkeng George, 2022. *Transition vers les énergies renouvelables au Cameroun : Quelques idées innovantes pour les villes*. L'Harmattan Cameroun

GINOCCHIO Roger, Viollet Pierre, 2012. *L'énergie hydraulique*. Lavoisier.

HENRI Safa, 2013. *Quelle transition énergétique ? (EAN13 : 9782759810529) | La boutique EDP Sciences : e-librairie, vente en ligne de livres et ebooks scientifiques*. EDP Sciences. Consulté 7 août 2024, à l'adresse

Références bibliographiques

JON Lang, 11 février 1994. *Urban Design : The American Expérience*. John Wiley & Sons, 528 pages.

<https://www.amazon.fr/Urban-Design-Experience-Jon-Lang/dp/0471285420>

JON Lang, 02 septembre 2005. *Urban Design: A Typology of Procedures and Products*. London, 1st Edition, 448 pages.

<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/97880458656/urban-design-jon-lang>

KEVIN Lynch, 7 Janvier 1998. *Image de la cité*. Dunod, 222 pages.

<https://www.editionsimbernon.com/achat/1-image-de-la-cite/460DUP.htm>

KLAASEN Ina, 17 novembre 2004. *Urban Design : Not Just 'Delight', but 'Commodity' and 'Firmness' as Well*. Melbourne, 1st Edition, 62 pages.

<https://dl.designresearchsociety.org/cgi/viewcontent.cgi?article=2174&context=drs-papers/>

NICOLOSO, Barbara, 2021. *Petit traité de sobriété énergétique*. ECLM

PHILIPPE Panerai, JEAN Castex, JEAN-Charles Depaule, 1997. *Formes urbaines, de l'îlot à la barre*.

Parenthèses , 196 pages. <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/formes-urbaines-de-l-ilot-a-la-barre-9782863646021/>

PHILIPPE Panerai, Marcelle Demorgon, JEAN-Charles Depaule, 1999. *Analyse urbaine*. Marseille,

Parenthèses , 176 pages. <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/analyse-urbaine->

Sites internet

Academia.edu : Le guide pour une éco-construction en Algérie, GIZ, APRU, Ministère de l'énergie.

(2023). https://www.academia.edu/34739223/Guide_Construction_Eco_%C3%A9nerg%C3%A9tique_APRUE_GIZ

Ademe.fr : réussir sur la transition énergétique. (2023, janvier). <https://www.ademe.fr/>

Algérie 360°.com, article (en ligne). 21 novembre 2018. URL : <https://www.algerie360.com/guelma-un-precieux-patrimoine-en-friche>

Apur.org : Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes. (2022, décembre). <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/consommations-energie-emissions-gaz-effet-serre-liees-chauffage-residences-principales-parisiennes#:~:text=La%20consommation%20d'%C3%A9nergie%20des%20chauffage%20retenu%20par%20les%20habitants.>

Aprue.org.dz : Bulletin trimestriel APRUE numéro 18 du septembre. 2010. (2021, 17 avril).

<https://www.aprue.org.dz/index.php/fr/>

Références bibliographiques

- Are.admin.ch : Le rapport Brundtland, ONU, 1987. (2022, aout).
<https://www.are.admin.ch/are/fr/home/media-et-publications/publications/developpement-durable/brundtland-report.html>
- Cder.dz : Bulletin trimestriel n° 10. (2022, septembre).
https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_010_17.pdf
- Cder.dz : Guide des énergies renouvelables. (2023, mars).
<https://www.cder.dz/bulletin/bull28/ber28.pdf>
- Cder.dz : La loi nationale n°04/09 du 14 Aout 2004, relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable. (2023). https://www.cder.dz/loi/loi_avant.pdf
- ClimaMaison : le guide expert du confort thermique. (2023, 28 mars). <http://www.climamaison.com>
- Edf.fr : Qu'est-ce que l'énergie hydraulique ? (2023, janvier). <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-hydraulique#:~:text=L'%C3%A9nergie%20hydraulique%20permet%20de%20de%20l'eau>.
- Energy.gov.dz : Loi n° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie - article 02. (2023).
https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/loi_99-09_5b68630e15102.pdf
- Energy.gov.dz, Ministère Algérien de l'énergie et des mines : guide des énergies renouvelables. (2020, octobre). <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- Europe-energie.com : Efficacité énergétique et bâtiment. (2023). <https://www.europe-energie.com/blog/lefficacite-energetique-batiment/#:~:text=L'efficacit%C3%A9%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20d'un%20finie%20comme%20le,d'%C3%A9nergie%20dans%20un%20logement>.
- Europa.eu : efficacité énergétique. (2022, septembre).
<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/69/efficacite-energetique#:text=L'efficacit%C3%A9%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20est%20donc,est%20en%20cours%20de%20n%C3%A9gociation>.
- Eyrolles.com : Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement. (2022, novembre).
<https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/dictionnaire-de-l-urbanisme-et-de-l-amenagement-9782130547730/>
- Fao.org : Loi n° 99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie. (2023).

Références bibliographiques

- Inis.iaea.org : ADEME, 2010, *Feuille de route sur les bâtiments et îlots à énergie positive et à bilan carbone minimum*. (2023, janvier).
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/020/50020634.pdf
- Inis.iaea.org : *quelles énergies pour demain*, Commissariat à l'énergie Atomique Européen. (2023).
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/002/31002547.pdf
- Joradp.dz : *Journal officiel de la république Algérienne n° 51 du 02/08/1999*. (2022, décembre).
<https://www.joradp.dz/FTP/JO-FRANCAIS/1999/F1999024.pdf?znjo=24>
- La transition énergétique fait évoluer la vision américaine du rôle de l'État ». (2022, octobre 12). La Croix. <https://www.la-croix.com/Debats/transition-energetique-fait-evoluer-vision-americaine-role-lEtat-2022-10-12-1201237439>
- Lepetitrobert.com : le dictionnaire de la langue française. (2023, avril).
<https://www.lerobert.com/dictionnaires/francais/langue>
- Ministère de commerce.com, Guelma (en ligne). Décembre 2020.
URL : <http://dcwguelma.dz/index.php/10-menu-principal/28-historique>
- Schneider Electric : *Le livre blanc de l'Efficacité énergétique*. (2023, février). [Http://www.schneider-electric.fr](http://www.schneider-electric.fr)
- Transition énergétique pour tous—Éditions Odile Jacob. (s. d.). www.odilejacob.fr. Consulté 7 août 2024, à l'adresse https://www.odilejacob.fr/catalogue/sciences/environnement-developpement-durable/transition-energetique-pour-tous_9782738129796.php
- Wikipédia, l'encyclopédie libre : efficacité énergétique. (2023, 15 septembre).
https://fr.wikipedia.org/wiki/Efficacit%C3%A9_%C3%A9nerg%C3%A9tique_%C3%A9conomie#:~:text=L'efficacit%C3%A9%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20s'appuie,processus%20et%20outils%20plus%20efficaces
- Wikipédia, l'encyclopédie libre : énergies renouvelables. (2023, 29 octobre).
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Portail:%C3%89nergie_renouvelableA9nergies%20renouvelables%20sont%20des,l'%C3%A9chelle%20de%](https://fr.wikipedia.org/wiki/Portail:%C3%89nergie_renouvelableA9nergies%20renouvelables%20sont%20des,l'%C3%A9chelle%20de%20)
- Wikipédia, l'encyclopédie libre : énergie solaire photovoltaïque. (2023, 26 mars).
https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolta%C3%AFque
- Wikipédia, l'encyclopédie libre : énergie solaire thermique. (2023, 21 janvier).
https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_thermique

Références bibliographiques

Wikipédia, l'encyclopédie libre : sobriété énergétique. (2023, 02 décembre).

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Sobri%C3%A9nerg%C3%A9tique%20est%20la,et%20services%2C%20produits%20et%20consomm%C3%A9s>

Wikipédia, l'encyclopédie libre : système hybride d'Énergie. (2023, 4 février).

https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_hybride_d%27%C3%A9nergie

Wikipédia, l'encyclopédie libre : transition énergétique. (2023, 10 novembre).

https://fr.wikipedia.org/wiki/Transition_%C3%A9nerg%C3%A9tique%2C%20chauffage%2C%20etc.%20

World environnement Day.com, climatologie (en ligne). 5 juin 2021. URL : <https://www.infoclimat.fr/climatologie/globale/guelma/60403.html>

Thèses et mémoires

ACHOUR-BOUAKKAZ, N. (2006). La Relation entre l'îlot de chaleur urbain, phénomène du

changement climatique et la densité du plan bâti : cas de la ville d'Alger. [Mémoire de magister en architecture, université de Constantine 1].

<http://archives.umc.edu.dz/bitstream/handle/123456789/7143/MER5336.pdf?sequence>

BAFROUH, H., Debagh, M., & Mediani, A. (2021). Etude Expérimentale et Modélisation de la

Cinétique de Séchage Solaire de la Pomme de Terre [Thesis, université Ahmed Draia-ADRAR]. <https://dspace.univ-adrar.edu.dz/jspui/handle/123456789/6179>

BENCHEIKH, K., & Kaki, E. (2018). Municipal solid waste assesment in algéria [Thesis].

<http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/20113>

BENSEHLA, S. (2021). The impact of the urban form on energy consumption and solar

access, case of individual housing subdivisions in Constantine [Thesis].

<https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/11482>

BOUYER, J. (2009). Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de

l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. [Thèse de doctorat en Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture, université de Nantes].

<https://theses.hal.science/tel-00426508/>

CHEBOUAT, A. C., & Chebouat, F. (2023). Sensibilité des capteurs solaires plats pour différents

parameters thermo—Mécaniques [Thesis, Université Kasdi Merbah Ouargla].

<http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/34255>

Références bibliographiques

- COLOMBERT, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. [Thèse de doctorat en génie urbain, université de Paris-Est]. <https://theses.hal.science/tel-00470536/>
- DAHEUR, M., & Taini, S. A. E. (2020). Etude et simulation du système hybride PV/ Pile à combustible/Batterie [Thesis]. <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/25278>
- FARTAS, H. (2019). Etude, modélisation et simulation d'un système hybride autonome éolien-Photovoltaïque. Université Badji Mokhtar Annaba. <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/09/Fartas-Hafsia.pdf>
- KITOUNI, M. (2020). Consulté 16 août 2024, à l'adresse <http://dspace.univtebessa.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/6675/1/Marwa1.pdf>
- LACHI, E. (2017). Bâtiments à zéro énergie, une tentative vers l'autonomie énergétique [Working Paper]. <http://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/2408>
- LUDMIL, S. (2011). Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. [Thèse de doctorat en énergétique, université de corse Pasquale & université technique de Sofia]. <https://theses.hal.science/file/index/docid/653412/filename/TotalRrapideCORRECTED>
- MAHAYA, C. (2014). Optimisation de la forme urbaine par l'évaluation du potentiel solaire [Mohamed Khider Biskra]. <http://thesis.univ-biskra.dz/67/>
- MAHI, D., & Kadri, N. (2021). Simulation numérique du chauffage par géothermie via le logiciel COMSOL Multiphysiques [Thesis, Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem]. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/20265/m%C3%A9moire%20Mahi%20&%20Kadri.pdf?sequence=1>
- MATALLAH, M. (2015). L'impact de la morphologie des tissus urbains sur le confort thermique extérieur - Cas d'étude ville de Tolga (ressource textuelle, sauf manuscrits). [Mémoire de magister en architecture, université de Biskra]. <https://www.ccdz.cerist.dz/admin/notice.php?id=0000000000000866390000269>
- MILLOT, M. (2003). Développement urbain et insécurité routière : l'influence complexe des formes urbaines. [Thèse de doctorat en science -transport-, université de Lyon]. https://www.researchgate.net/publication/29975038_Developpement_urbain_et_insecurite_routiere_l'influence_complexe_des_formes_urbaines

Références bibliographiques

- MOUSSAOUI, A., Boukelkoula, K., & Dahbi, H. P. (2023). Etude et dimensionnement d'une alimentation Photovoltaïque destinée pour une station-service [Thesis, UNIVERSITE AHMED DRAIA- ADRAR]. <https://dspace.univ-adrar.edu.dz/jspui/handle>
- NAIT, N. (2011). La réhabilitation énergétique dans les logements collectifs existants. [Mémoire de magister en architecture, université de Constantine]. <https://bu.umc.edu.dz/theses/architecture/NAI6218.pdf>
- RACINE, F. (1998). Degré de discontinuité dans la transformation des tissus urbains au Québec : influence des types suburbains. [Thèse de doctorat en aménagement, université de Montréal]. <https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/ftp03/NQ43741.pdf>
- SAYAD, B. (2021). La contribution de la végétation et des plans d'eau pour améliorer le confort climatique dans les espaces extérieurs à Guelma [Thesis]. <http://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/11078>
- SEOUD, S. (2008). Audit énergétique des bâtiments tertiaires, cas de trois bâtiments existants à Alger. [Mémoire de magister en architecture, école polytechnique d'architecture et d'urbanisme d'Alger]. <https://docplayer.fr/10063445-Audit-energetique-de-batiments-tertiaires.html>
- SERBOUTI, A. (2021). Optimisation des ressources énergétiques pour la conception des bâtiments à haute efficacité énergétique. Thèse de doctorat. Université Hassan 1er, Maroc. [file:///C:/Users/GEEK/Downloads/Th%C3%A8se_FST_1%20\(86\).pdf](file:///C:/Users/GEEK/Downloads/Th%C3%A8se_FST_1%20(86).pdf)
- TACHTACHE, H., & HALLOUFI, O. (2020). La transition énergétique fossile vers l'énergie solaire dans les équipements éducatifs en Algérie: Cas d'étude école primaire Gharbi à El Aakabi Jijel. [Thesis, Université de Jijel]. <http://dspace.univ-jijel.dz:8080/xmlui/handle/123456789/5957>.
- ZOUAKOU, S (2016). Dimensionnement et simulation d'un système hybride éolien-photovoltaïque autonome avec batteries intégré dans un habitat individuel. Université Saad Dahlab, Blida. <https://di.univ-bli-da.dz/jspui/bitstream/123456789/6836/1/M%C3%A9moire%20ZOUAKOU%20Souhil%20Master%20ER%202016.pdf>

Annexes

Annexe

Annexes

Annexes

Annexe 1

Tableau 20 : Calibration du spécimen A

Consommation estimée	T (18-25)	T (17-26)	T (17,5-27)	T (17,8-27,5)	T (17,9-27,6)	T (18-27,7)	T (17,9-27,7)
Chauffage KWh/m3	20,08	17,19	18,61	19,49	19,83	20,08	19,83
Climatisation KWh/m3	26,87	24,27	21,73	20,49	20,25	20,00	20,02

Source : Auteur

Tableau 21 : Calibration du spécimen B

Consommation estimée	T (18-25)	T (19-26)	T (19,5-26,5)	T (19,4-26,6)	T (19,3-26,6)
Chauffage KWh/m3	8,72	10,28	11,11	10,94	10,75
Climatisation KWh/m3	13,48	12,16	11,52	11,40	11,40

Source : Auteur

Tableau 22 : Calibration du spécimen C

Consommation estimée	T (18-25)	T (17,5-27)	T (17,6-28)	T (17,8-28,5)	T (17,7-29,5)	T (17,8-29,6)
Chauffage KWh/m3	9,98	9,17	9,33	9,65	9,49	9,62
Climatisation KWh/m3	14,65	11,83	10,51	9,88	8,67	8,53

Source : Auteur

Annexes

Annexe 2

Tableau 23 : La consommation type des équipements électroménagers dans notre corpus d'analyse

Equipment	Mode de service	Energie (kW)	La durée / jour	Consommation moyenne/An (KWh/An)
Réfrigérateur	En service	200-500	Continue	237,62
TV/Démo	En service En mode veille	300-400 8,46-16,92	6 h 18 h	346,75
Ordinateur	En service En mode veille	400-600 100-150	1-8 h	185,79
Eclairage artificiel	/	109,50 (Une ampoule)	1 h – 6 h	724,53
Climatiseur	/	1500-2000	Période estivale	1241
Micro-onde	/	20-40	10 min	39,09
Rasoir électrique	/	10-18	5 min	0,55
Cuisiniere	/	1500-4500	Continue	1100,50
Vailleuse	/	15-20	2 h – 6 h	20,24
Résistance	/	800-1000	Période hivernale	547,5
Aspirateur	/	50-150	15 min	52,9
Séchoir	/	70-130	10 min	75,05
Four électrique	/	100-150	1 h – 2 h	146,21
Chargeur téléphone	/	0,5-2,6	5 h	0,99
Robot électrique	/	100-150	15 min	65,7
Machine à laver	/	190-200	30 min	91,25
Total Energie/An	/	/	/	3087,17

Source : Auteur à la base d'une enquête

Annexes

Annexe 3

Tableau 24 : Comparaison entre panneaux photovoltaïque et panneau hybride selon leurs productions

Type de panneau	Panneau PV	Panneau hybride PV/T
Production annuelle KWH/m ²	2015,8	8063,2

Source : Auteur

Le panneau solaire le plus rentable au monde.

Abora Solar conçoit, développe et fabrique le panneau solaire le plus rentable du monde avec un rendement de 89 %, réalisant ainsi un record mondial certifié.

Le panneau solaire hybride doté de la technologie aHTech[®] produit la même énergie que 4 panneaux photovoltaïques.



Figure 71 : Description du panneau solaire hybride (Abora Solar)

Source : Abora Solar.com

Annexes

Annexe 4

```
<CompositeCategory id="1" name="Wall 0" icon="">
<Composite id="30" name="Wall 0" color="-16776961" category="Wall">
<CompositeLayer materialID="131" thickness="0.02"/>
<CompositeLayer materialID="2222" thickness="0.03" insulation="true"/>
<CompositeLayer materialID="444" thickness="0.15"/>
<CompositeLayer materialID="1" thickness="0.05"/>
<CompositeLayer materialID="444" thickness="0.1"/>
<CompositeLayer materialID="119" thickness="0.02"/>
</Composite>
```

```
<Composite id="31" name="Wall 1" color="-16776961" category="Wall">
<CompositeLayer materialID="169" thickness="0.02"/>
<CompositeLayer materialID="447" thickness="0.5"/>
<CompositeLayer materialID="119" thickness="0.02"/>
</Composite>
```

```
<Composite id="33" name="Roof zero" color="-17111" category="Roof">
<CompositeLayer materialID="276" thickness="0.02"/>
<CompositeLayer materialID="126" thickness="0.04"/>
<CompositeLayer materialID="445" thickness="0.16"/>
<CompositeLayer materialID="3333" thickness="0.04" insulation="true"/>
<CompositeLayer materialID="119" thickness="0.02"/>
</Composite>
```

```
<Composite id="34" name="Roof one" color="-17111" category="Roof">
<CompositeLayer materialID="448" thickness="0.02"/>
<CompositeLayer materialID="449" thickness="0.03" insulation="true"/>
<CompositeLayer materialID="502" thickness="0.03"/>
<CompositeLayer materialID="500" thickness="0.02"/>
</Composite>
```

Annexes

```
<Composite id="35" name="Roof two" color="-17111" category="Roof">
<CompositeLayer materialID="448" thickness="0.02"/>
<CompositeLayer materialID="126" thickness="0.15"/>
<CompositeLayer materialID="119" thickness="0.02"/>
</Composite>
```

```
<CompositeCategory id="3" name="Floor" icon="">
<Composite id="36" name="Floor one" color="-6711681" category="Floor">
<CompositeLayer materialID="445" thickness="0.10"/>
<CompositeLayer materialID="126" thickness="0.1"/>
<CompositeLayer materialID="276" thickness="0.02"/>
<CompositeLayer materialID="446" thickness="0.01"/>
</Composite>
```

```
<Composite id="37" name="Floor two" color="-6711681" category="Floor">
<CompositeLayer materialID="447" thickness="0.30"/>
<CompositeLayer materialID="501" thickness="0.01"/>
<CompositeLayer materialID="276" thickness="0.02"/>
<CompositeLayer materialID="446" thickness="0.01"/>
</Composite>
```

```
-----
<Composite id="21" name="CitySim Asphalt road" category="ground">
<CompositeLayer materialID="280" thickness="3.855"/>
<CompositeLayer materialID="376" thickness="0.1"/>
<CompositeLayer materialID="281" thickness="0.02"/>
<CompositeLayer materialID="201" thickness="0.025"/>
</Composite>
```

```
-----
<PhotoVoltaic id="16" name="Abora Solar aH72SK-FR-v5-220718" type="Mono-
c" brand="Abora Solar" model="aH72SK-FR-v5-
220718" Pmp="250" Vmp="39.86" muVoc="-0.28" Tcnoct="45" Tref="25" Ac="1.96"/>
```

```
<SolarThermal id="8" name="Abora Solar aH72SK-FR-v5-220718" type="flat
plate" etaOptical="0.778" heatLoss1="5.98" heatLoss2="0.0096" area="1.96"/>
```