

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Polytechnique d'Architecture
et d'Urbanisme
« Le Moudjahid Hocine Ait Ahmed »

المتعددة العلوم للهندسة المعمارية
المدرسة العمران
"المجاهد حسين ايت احمد"

Laboratoire Ville, Urbanisme et Développement Durable (VUDD)



Thèse en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat LMD en : Architecture



Spécialité : Ville Durable, Urbanisme et Environnement (VDUE)

**Processus d'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque dans le
secteur de l'habitat en Algérie : l'impact de la morphologie urbaine
sur l'évaluation du potentiel solaire à Laghouat**

Présentée par :

BOULAHIA Meskiana

Dirigée par :

Pr. DJIAR Kahina Amal Directrice de thèse EPAU
Pr. Miguel Amado Co-encadrant Universidade de Lisboa (IST-UL)

Devant le jurée composé de :

Pr. BOUSSOUALIM Aicha	Professeur	Epau , Alger	Présidente
Dr. KACHER Sabrina	Docteur	Epau , Alger	Examinatrice
Pr. OUISSI Nabil	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Pr. BENCHEIKH Hamida	Professeur	Université de Laghouat	Examineur
Pr. HAMOUINE Abdelmadjid	Professeur	Université de Bechar	Examineur
Pr. DJIAR Kahina Amal	Professeur	EPAU, Alger	Rapporteur
Pr. Miguel Amado	Professeur	Université de Lisboa	Co-rapporteur

Soutenue publiquement le 27/10/2021

A tous ceux
et celles qui m'ont soutenu
le long de ce parcours....

Financement

Cette recherche a été financée par le Ministère algérien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche par le biais du Programme National Exceptionnel (PNE), avec la contribution du financement du laboratoire par la Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique DGRSDT). Un grand merci à tous ceux (MESRS, DGRSDT, VUDD, EPAU) qui ont contribué au financement de cette thèse.

Remerciements

En premier lieu, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance envers mes encadrants, Pr Kahina DJIAR et Pr Miguel AMADO, pour leurs précieuses orientations et les encouragements le long de ce parcours. Je remercie très chaleureusement tous les membres de jury qui ont accepté d'examiner et rapporter ce modeste travail.

Un grand merci à tous les membres de l'équipe de recherche HAD du Laboratoire VUDD de l'EPAU. Des collègues qui sont devenus des amies et qui ont contribué amplement à rendre cette aventure plus qu'agréable par l'ambiance et la bonne humeur à toute épreuve. Je tiens à remercier également toute l'équipe scientifique du laboratoire GEOTPU. Lab pour l'assistance le long de la formation à l'étranger mais aussi pour l'accueil chaleureux dès le premier jour, ce fut comme se sentir en famille. Je tiens à remercier également le personnel du département du génie civil et d'architecture de l'Université de Lisbonne pour toutes le support administratif pour faciliter mes déplacements et l'accès à l'université durant la période du confinement.

J'aimerais exprimer ma gratitude à tous les membres du conseil de la formation doctorale de l'EPAU pour la qualité de la formation pédagogique.

Un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué à fournir les données de Laghouat, architectes et administrations, qui ont pris le temps de discuter de mon sujet. Chacun de ces échanges m'a aidé à faire avancer mon analyse.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mes chers parents, sœurs et frères pour leur affection inconditionnelle et le soutien continu dans tous mes choix académiques.

Résumé

Cette thèse pose les fondements d'un processus d'intégration du potentiel solaire photovoltaïque (PV) du secteur de l'habitat dans la planification urbaine. La méthodologie proposée combine des méthodes d'ingénierie, de statistiques et de méthode paramétrique.

Tout d'abord, la méthode d'ingénierie se traduit par des simulations solaires des typologies résidentielles afin de déterminer le rayonnement solaire reçu annuellement. Elle tient compte des pertes dues aux obstacles sur les toits, l'ombrage de l'environnement proche et l'espacement minimal entre les panneaux PV. Par la suite, la méthode statistique permet d'estimer la surface totale des toitures résidentielles, la surface effective adaptée à l'installation PV et le potentiel PV urbain et technique. Les résultats propres à chaque typologie sont extrapolés à l'échelle de la commune pour une diffusion spatiale à l'aide du système d'informations géographiques (SIG). Sur la base de ces résultats, un modèle d'agrégation est établi afin de calculer le bilan énergétique et classer les unités qui, similairement à des cellules, peuvent être considérées comme négatives, positives ou neutres en fonction du différentiel entre potentiels d'approvisionnement en énergie solaire et les modèles de consommation d'énergie existants. Cette agrégation permet également de mettre en relation une variété de déterminants morphologiques tels que le tracé des rues, l'orientation des bâtiments, la densité et l'occupation des sols, qui ont une grande influence sur la production de l'énergie solaire. À ce stade, dans le but de limiter l'impact de l'exposition solaire sur le confort thermique extérieur, une étude paramétrique a été effectuée, en s'appuyant sur des outils numériques innovants, visant un compromis entre les considérations énergétiques et environnementales pour guider les conceptions futures.

Appliqué à la commune de Laghouat, les résultats identifient "le facteur d'utilisation" pour chaque typologie résidentielle et démontrent que le déploiement de systèmes PV distribués sur les toits offre un potentiel technique important, qui pourrait couvrir jusqu'à 55% des besoins annuels en électricité. De plus, l'agrégation statistique suggère un modèle de partage intelligent qui gère les typologies résidentielles en fonction de leur potentiel de

production solaire et permet d'atteindre un quartier à Net-Zéro-Energie (NZE). Enfin, les résultats de l'approche paramétrique, communiqués dans un tableau de bord interactif, offrent des indications fiables et des scénarios de conception des projets d'habitat collectif afin d'améliorer leur potentiel solaire et le niveau du confort thermique extérieur dans cette zone climatique.

Mots-clés : Energies Renouvelables ; Potentiel solaire photovoltaïque ; Planification énergétique ; Morphologie urbaine ; Simulations solaires ; Net-Zéro-Energie (NZE), Laghouat.

Thesis Summary

This thesis lays the foundation for a process to integrate the solar photovoltaic (PV) potential of the housing sector into urban planning. The proposed methodology combines engineering, statistical and parametric methods.

First, the engineering method involves solar simulations of residential typologies to determine the annual solar radiation received. It takes into account losses due to roof obstacles, shading from the surrounding environment and minimum spacing between PV panels. Subsequently, the statistical method is used to estimate the total area of residential roofs, the effective area suitable for PV installation and the urban and technical PV potential. The results for each typology are extrapolated to the scale of the municipality for spatial distribution using the Geographic Information System (GIS). Based on these results, an aggregation model is established in order to calculate the energy balance and classify the units that, similar to cells, can be considered as negative, positive or neutral according to the differential between solar energy supply potentials and existing energy consumption patterns. This aggregation also allows to relate a variety of morphological determinants such as street layout, building orientation, density and land use, which have a great influence on solar energy production. At this stage, in order to limit the impact of solar exposure on outdoor thermal comfort, a parametric study was performed, based on innovative numerical tools, aiming at a compromise between energy and environmental considerations to guide future designs.

Applied to the municipality of Laghouat, the results identify the "utilisation factor " for each residential typology and demonstrate that the deployment of distributed rooftop PV systems offers a significant technical potential, which could cover up to 55% of annual electricity needs. Furthermore, the statistical aggregation suggests a smart sharing model

that manages residential typologies according to their solar production potential and achieves a Net-Zero Energy (NZE) neighborhood. Finally, the results of the parametric approach, communicated in an interactive dashboard, offer reliable indications and design scenarios for collective housing projects in order to improve their solar potential and the level of outdoor thermal comfort in this climate zone.

Keywords: Renewable Energy; Photovoltaic solar potential; Energy planning; Urban morphology; Solar simulations; Net-Zero Energy (NZE), Laghouat.

ملخص

تضع هذه الأطروحة الأسس التقنية لإمكانيات عملية دمج الطاقة الشمسية الكهروضوئية الخاصة بقطاع السكن في التخطيط الحضري . المنهجية المقترحة تجمع بين الأساليب الهندسية والإحصائية والمعيارية.

أولاً وقبل كل شيء، المحاكاة الشمسية لأنماط السكنية تسمح بتحديد الإشعاع الشمسي الذي يتم تلقيه سنوياً بعد الأخذ بعين الاعتبار العوائق على الأسطح ، تظليل البيئة المحيطة والحد الأدنى للتباعد بين الألواح الكهروضوئية. بعد ذلك، تتيح الطريقة الإحصائية تقدير المساحة الإجمالية للأسطح السكنية التي تعتبر المنطقة الفعالة المناسبة لتركيب الألواح الكهروضوئية. يتم استقراء النتائج الخاصة بكل تصنيف سكني باستخدام نظام المعلومات الجغرافية . بناءً على هذه النتائج، تم إنشاء نموذج تجميع احصائي من أجل حساب توازن الطاقة وتصنيف الوحدات التي ، على غرار الخلايا ، يمكن اعتبارها سلبية أو إيجابية أو محايدة اعتماداً على الفرق بين الطاقة الشمسية وأنماط استهلاك الطاقة الحالية. يتيح هذا التجميع أيضاً إمكانية ربط مجموعة متنوعة من المحددات المورفولوجية مثل تخطيط الشوارع واتجاه المباني والكثافة واستخدام الأراضي ، والتي لها تأثير كبير على إنتاج الطاقة الشمسية. في هذه المرحلة، من أجل الحد من تأثير التعرض للشمس على الراحة الحرارية الخارجية ، تم إجراء دراسة معيارية، بناءً على أدوات رقمية مبتكرة ، بهدف التوصل إلى حل وسط بين اعتبارات الطاقة الشمسية والبيئية لتوجيه التصميم المستقبلية.

عند تطبيق المنهجية على بلدية الأغواط، تحدد النتائج "عامل الاستخدام" لكل تصنيف سكني وتوضح أن نشر الأنظمة الكهروضوئية الموزعة على الأسطح يوفر إمكانيات تقنية كبيرة ، والتي يمكن أن تغطي ما يصل إلى 55٪ من الاحتياجات السنوية من الكهرباء. بالإضافة إلى ذلك ، يشير التجميع الإحصائي إلى نموذج ذكي يدير الأنماط السكنية وفقاً لإمكانيات إنتاج الطاقة الشمسية الخاصة بهم ويجعل من الممكن تحقيق حي ذو اكتفاء ذاتي من الكهرباء . أخيراً ، تقدم نتائج النهج المعياري ، التي يتم نشرها في لوحة معلومات تفاعلية ، مؤشرات موثوقة وسيناريوهات تصميم لمشاريع الإسكان الجماعي من أجل تحسين إمكانياتها الشمسية ومستوى الراحة الحرارية الخارجية في هذا المنطقة المناخية.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة. إمكانيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية ؛ تخطيط الطاقة التشكل الحضري المحاكاة الشمسية (NZE) Net-Zéro-Energie ، الأغواط.

Liste des figures

Figure 1. Raisonnement scientifique , démarche méthodologique et résultats attendus de cette thèse	14
Figure 2. Consommation énergétique mondiale par source.	16
Figure 3 . World Bank open data modifiée.....	20
Figure 4. Variations annuelles des émissions CO2 liée à l'énergie 1900-2020	22
Figure 5. Emissions totale de CO2 avec et sans un plan de relance durable.	24
Figure 6. L'intégration des énergies renouvelables dans la consommation finale dans le scénario Net-Zéro émissions	26
Figure 7. L'adoption des mesures d'efficacité énergétiques dans le scénario Net-Zéro émissions Source : (IEA, 2021c).	26
Figure 8. La trajectoire des émissions CO2 dans le scénario net zéro 2050.	27
Figure 9. Émissions de CO2 liées à l'énergie du secteur des bâtiments	30
Figure 10. Les variations annuelles de l'intensité énergétique comparant aux objectifs SDG.	33
Figure 11. L'utilisation finale de l'énergie par secteur d'activité.	34
Figure 12. Emission Co2 évitées 2018-2019 grâce aux énergies renouvelables entre 2018- et 2019 (Source : IEA,2020)	36
Figure 13. La variation entre les CO2 émissions provenant des énergies renouvelables par rapports aux autres secteurs d'électricité	39
Figure 14. Schema d'un Système énergétique intégrée l'échelle de la ville.	42
Figure 15. Les options technologiques selon le type et les besoins des villes	45
Figure 16. Spectre des objectifs des énergies renouvelables.....	52
Figure 17. Les objectifs de 100 % énergies renouvelables dans les villes en 2019.	56
Figure 18. Politiques mondiales appliquées en faveur de l'intégration des énergies renouvelables en milieu urbain .(Source:REN21,2020)	59
Figure 19. Les niveaux hiérarchique du potentiel solaire à l'échelle de la ville	67
Figure 20. Synthese des méthodes pour l'évaluation du potentiel solaire à l'échelle de la ville	75
Figure 21. Ses composants du plugin Ladybug (rn haut) et honney bee (en bas)	99
Figure 22. Les composants « iterator » et « Agregator »de Colibri	100

Figure 23. Le processus méthodologique adopté.	101
Figure 24. Le workflow de la méthode combinée pour l'estimation du potentiel solaire.	102
Figure 25. Schema démonstratif du CGR et SBR.....	106
Figure 26. Les algorithmes visuels pour la simulation solaire	107
Figure 27. Le modèle d'agrégation statistique. (Source :Amado & Poggi, 2014) adapté par l'auteure.....	111
Figure 28. Schéma récapitulatif de l'approche paramétrique.	113
Figure 29. Les données inputs de l'approche paramétriques (fait par l'auteure).	114
Figure 30. Parametres de simulation solaire et énergétique	120
Figure 31. Préparation des zones et des variables des typologies résidentiels pour la simulation.....	121
Figure 32. Situation Géographique et localisation de la commune de Laghouat.	125
Figure 33. Les étages bioclimatiques de la wilaya de Laghouat.	126
Figure 34. Graphe démontrant l'année source de chaque valeur horaire utilisée dans le TMW 3.	127
Figure 35. Les variations des températures moyennes, maximales et minimales quotidiennes à Laghouat.	129
Figure 36. Les variations horaires de températures moyennes, minimales et maximales pendant une journée typique de chaque mois à Laghouat.	129
Figure 37. Heating degree days and cooling degree days à Laghouat.....	129
Figure 38. Classification des températures ressentis à l'extérieur à Laghouat, selon l'indice thermal international. Source : CBE Climat Tool modifié par l'auteure	130
Figure 39. Precipitation et nébulosité à Laghouat	131
Figure 40. Profil topographique et l'azimut solaire à Laghouat.....	132
Figure 41. Les variations saisonnières des vents à Laghouat.(Source : CBE Clima Tool).....	133
Figure 42. Irradiation horizontale normale à Laghouat.	134
Figure 43. .Trajectoire et intensité des radiations solaires	134
Figure 44. Détails Morphologiques des typologies d'habitat Individuel.	137
Figure 45. .Détails morphologiques des typologies de l'habitat collectif.	138
Figure 46. Récapitulatif des typologies résidentielles sélectionnées.	139
Figure 47. Principe de constitution de la base de données sur le SIG.....	141
Figure 48. Les couches géographique de la base de données créée pour Laghouat	142
Figure 49. Capture sur les attribues relative à la couche d'agrégation	144
Figure 50. Carte des subdivisions par type d'habitat à Laghouat.....	145
Figure 51. Carte des unités d'agrégation adoptés	145
Figure 52. Carte de répartition de la population	147
Figure 53. Carte de répartition de la consommation à Laghouat	148
Figure 54. .Carte de répartition de la consommation en fonction de la population	149
Figure 55. .Repartions de l'ombre des éléments structurel dans des différentes orientations	153
Figure 56. .Profil de l'électricité produite d'un panneau solaire sous différents angles d'inclinaison.....	155
Figure 57. .l'intensité des irradiations solaires selon l'angle d'inclinaison dans chaque saison.	156
Figure 58. Carte des irradiations solaires reçus sur les toits.....	161

Figure 59 .Carte du potentiel Solaire Technique à Laghouat.	162
Figure 60 . Classification des unités urbaines de Laghouat selon leur bilan énergétique.	163
Figure 61 .Principe des scénarios d'équilibre pour atteindre NZE	165
Figure 61 .Le mix optimal des typologies résidentielles pour atteindre le NZE	167
Figure 63 . Partager au sein de la même unité d'agrégation urbaine.	169
Figure 64 . Carte classification des unités urbaines à Laghouat selon leur bilan énergétique	171
Figure 65 . Produire et partager entre plusieurs unités d'agrégation urbaines	172
Figure 66 . Impact des paramètres urbains sur l'indice de correspondance des charges (Lm%)	178
Figure 67 . Impact des paramètres architecturaux sur l'indice de correspondance des charges (Lm%).....	179
Figure 68 . Impact des paramètres urbains sur l'indice de confort thermique extérieur (Otc%).....	182
Figure 69 . Impact des paramètres architecturaux sur l'indice de confort thermique extérieur (Otc%).	183
Figure 70 .Scenarior de conception pour la typologie T2 offrant la meilleure LM %	185
Figure 71 . Scenarior de conception pour la typologie T2 offrant la meilleure OTC %	186
Figure 72 . Multiples scénarios de conception pour la typologie T2 offrant les meilleures valeurs LMm% et Otc %	187
Figure 73 . Scenarior de conception pour la typologie T3 offrant la meilleure LM %	188
Figure 74 . Scenarior de conception pour la typologie T3 offrant la meilleure Otc %.....	189
Figure 75 . Multiples scénarios de conception pour la typologie T3 offrant les meilleures valeurs LMm% et Otc %	190
Figure 76 . Scenarior de conception pour la typologie T1 offrant la meilleure LM %	191
Figure 77 . Scenarior de conception pour la typologie T3 offrant la meilleure Otc %.....	192
Figure 78 . Multiples scénarios de conception pour la typologie T1 offrant les meilleures valeurs LMm% et Otc %	193
Figure 79 .Vue d'ensemble sur le Dashboard qui regroupent tous les résultats de l'approche paramétrique pour toutes les typologies	196

Liste des tables

Table 1. Synthèse du raisonnement hypothétique/problématique	13
Table 2 . Le rôle des villes dans le développement des énergies renouvelables à diverses échelles de gouvernance.	32
Table 3. Les seuils relatifs à la technologie photovoltaïque	67
Table 4. Index pour la classification des surfaces adéquates pour l'exploitation du solaire	67
Table 5. Récapitulatif des résultats de la méthode manuelle appliquée dans la littérature	72
Table 6. Tableau récapitulatif des résultats des méthodes GIS pour l'évaluation du potentielsolaire.	73
Table 7. Synthèse des avantages et des inconvénients de chaque méthode	76
Table 8. Récapitulatif des concepts et des outils numériques de simulation du potentiel solaire. ...	81
Table 9. Etat des lieux de l'habitat traditionnel	135
Table 10. Organisation de la base des données sur SIG.	142
Table 11. Détails des obstacles sur les toitures	150
Table 12. Table comparatif du CGR	154
Table 13. Comparaison de la valeur UF par rapport à la revue de littérature.	156
Table 14. Table recapitulatif du potentiel solaire technique par quartier .Source :	160

Liste des abréviations et acronymes

APRUE	Agence Nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie
CDER	Centre de développement des énergies renouvelables
IEA	International Energy Agency
IRENA	International Renewable Energy Agency
CO2	Carbone dioxide.
CGR	Coverage Ground Ratio.
GIS	Geographic Information System.
Lm	Indice de correspondance des charges (Load Match)
MRT	Température radiante moyenne (Mean Radiant Temperature)
NZE	Net-zero energy.
NZB	Net Zero Buildings
Otc	Confort thermique extérieur (Outdoor Thermal Comfort)
OSM	Open street map.
PV	Photovoltaic.
PCP	Parallel cords Plot
SBR	Set Back Ratio.
TOF	Tilt and Orientation Factor.
WWR	Window-Wall Ratio
FU	Facteur d'utilisation
UTCI	L'indice universel de climat thermique

Table des matières

<u>Introduction générale</u>	2
Constat : Potentiel énergétique et engagement politique.....	2
Définition du sujet : Le Couple « Ville /Energie » un sujet transdisciplinaire	4
Problématique.....	7
Hypothèses de la recherche	8
Objectifs de la recherche.....	9
Démarche méthodologique	10
Structure de la thèse	14
Partie 1. L'impératif transition énergétique des villes	
Introduction	17
<u>Chapitre 1.Contexte énergétique mondiale : Transition des villes vers des énergies à faibles émissions</u>	18
Introduction	18
1. Transition énergétique : Le secteur de l'énergie face aux défis du changement climatique	18
1.1. Tendances énergétique globales	18
1.2. De la nécessité d'une relance durable pour les systèmes énergétiques : Quel avenir Post-COVID	23
1.2.1. Les orientations du <i>Recovery Plan</i>	23
1.2.2. L'objectif Net-Zéro Emissions d'ici 2050	25
2. La ville au cœur de la transition énergétique	27
1.1. L'urbanisation et le changement climatique	27
2.1. Efficacité énergétique ou développement des énergies renouvelables : Un duo dynamique au service de la transition énergétique	32
3. Le rôle des énergies renouvelables : dé-carboniser en répondant à la demande croissante.....	36
3.1. Une solution clé pour répondre à la demande croissante dans le contexte de changement climatique	36
3.2. Une opportunité pour créer des systèmes énergétiques urbains intégrés et intelligents	39
3.3. Quelle technologie des énergies renouvelables en milieu urbains ? :	42

Conclusion.....	46
<u>Chapitre 2.Politique, potentiel et Outils d'évaluation de l'énergie solaire.....</u>	48
Introduction	48
1. La planification de l'énergie solaire	48
1.1. Première étape - fixer des objectifs	51
1.2. Définir les besoins et renforcer les capacités	57
1.3. Politique et instruments réglementaires :	59
1.3.1. Le zonage	60
1.3.2. Les règles d'accès à l'énergie solaire	61
1.3.2.1.La servitude pour l'énergie solaire	61
1.3.2.2. Le permis pour l'énergie solaire	62
2. Le potentiel de production solaire photovoltaïque dans la littérature : Approches et échelles d'évaluation	62
2.1. A l'échelle du quartier	63
2.2.A l'échelle de de la ville	66
3. Les Outils d'évaluation.....	76
3.1. Concepts et méthodes numériques	76
3.1.1. Facteur de vue du ciel (SVF).....	77
3.1.3. L'approche par le ciel cumulé.....	78
3.1.4. Le Daysim	79
3.2. Modèles basés sur le SIG	79
3.2.1. Le module r.sun	79
3.2.2. ArcGIS Solar Analyst.....	80
3.3. Le " Web-based" model et les cadastres solaires	81
3.3.1. PVGIS	82
3.3.2. PVWATTS	83
3.3.3. Les cartes des systèmes solaires Mapdwell	84
Conclusion.....	86
<u>Chapitre 3 .Positionnement Scientifique et démarche méthodologique</u>	91
Introduction :	91
1. Positionnement Scientifique	91
2. Protocole de la recherche :.....	92
2.1. Définition du périmètre d'étude :	92

2.2. Collecte et organisation des données	94
3.3. Outils Numériques :	96
3.2.3.1. La système d'information géographique SIG	97
3.3.2. Logiciels de simulation	98
3.3.3. Colibri pour l'étude paramétrique	99
3.3.4. Thread	100
3. Démarche méthodologique.....	101
3.1. Etape 1 , une méthode combinée pour l'estimation du potentiel solaire	102
3.1.1. La méthode d'ingénierie	102
3.1.1.1. La caractérisation des typologies résidentielles	103
3.1.1.2. L'analyse du rayonnement	104
3.1.1.3. L'analyse des heures d'ensoleillement.....	104
3.1.1.4. Le rapport de couverture au sol	105
3.1.2. La méthode statistique du SIG	107
3.1.2.1. La surface totale des toits	107
3.1.2.2. La carte du potentiel géographique.....	108
3.1.2.3. Le facteur d'utilisation.....	108
3.1.2.4. La cartes de potentiel technique	108
3.2. Etape 2, un modèle d'agrégation statistique pour établir le bilan énergétique de la commune. .	109
3.3. Etape 3, une méthode paramétrique pour l'optimisation du potentiel solaire	111
3.2.1. Les données d'input : Typologies et paramètres variables.....	113
3.2.2. Les paramètres de simulation	114
3.2.2.1. La simulation solaire.....	114
3.2.2.2. La simulation de la demande énergétique	115
2.2.2.3. L'indice thermique universel de climat pour le confort extérieur	116
3.2.3. Les données output : Mesures de performance.....	116
3.2.3.1. L'indice de correspondance des charges (Lm %) :	116
3.2.3.1. Confort thermique extérieur	117
Conclusion.....	120
Conclusion de la partie 1.....	121

Partie 2. Evaluation du Potentiel Solaire : Application à la ville de Laghouat

Chapitre 4. Introduction du cas d'étude : la commune de Laghouat.....124

Introduction :	124
1. Situation Géographique	124
2. Analyse du milieu Naturel.....	126
2.1. Température et précipitations	128

2.2. Topographie :	132
2.3. Les vents	133
2.4. Les radiations solaires	134
3. L' Analyse du milieu Urbain	135
3.1. Le développement urbain et le secteur de l'habitat dans la commune de Laghouat	135
3.1.1. L'habitat traditionnel du vieux Ksar	135
3.1.2. Les lotissements : Habitat Individuel.....	135
3.1.3. Habitat collectif et semi collectif	136
3.3. Organisation et principes de la donnée Géographique	139
3.2.1. Couches de données urbaines	140
3.2.2. Les couches d'agrégation statistiques	144
3.2.3. Les cartes thématiques finales :	146
Conclusion	150
<u>Chapitre 05. Potentiel physique urbain et technique de l'énergie solaire à Laghouat.....</u>	149
Introduction	151
1. Potentiel physique et géographique	151
1.1. Analyse du rayonnement	151
1.2. Facteur d'utilisation (FU).....	152
1.2.1. Occupation du toit	154
1.2.2. Pertes d'ombre	154
2. Le potentiel technique	159
3. Le bilan Energétique	163
4. Scenarios d'équilibre pour atteindre NZE à l'échelle de la ville	165
4.2. Produire et partager entre plusieurs unités urbaines	166
4.1. Produire et partager au sein de la même unité urbaine	169
Conclusion	173
<u>Chapitre 6. Au-delà du potentiel solaire, quelles considérations morphologiques pour une efficacité énergétique ?.....</u>	175
Introduction	175
1. Impact des paramètres morphologiques sur le (Lm%) :.....	175
2. Impact sur le microclimat (Otc %) :	180

3. Etablir un équilibre entre les deux variables	184
Conclusion de la partie 2 :	197
<u>Conclusion Générale</u>	201
1.Retour aux sources de réflexion	201
1.1. Rappel de la problématique.....	201
1.2. La vérification des hypothèses de départ	201
2. Les principaux résultats	204
3. Les limites de la recherche	209
4. Les perspectives et les futurs développements	209
<u>Références bibliographique</u>	212
A-Ressources académiques	221
B- Livres et rapports institutionnels.....	226
Annexe 1. Liste récapitulatif des méthodes et outils trouvés dans la littérature pour l'évaluation du potentiel solaire à l'échelle de la ville.....	231
Annexe 2. Les cartes thématiques du cas d'étude	239
Annexe 3. Les algorithmes visuels des simulations.....	243

Introduction générale

Constat : Potentiel énergétique et engagement politique

En Algérie, le système énergétique est essentiellement basé sur les énergies fossiles qui présentent le triple inconvénient d'être localisées, limitées et très polluantes. Les conséquences de la surconsommation de ces énergies conventionnelles sont multiples et soulèvent de nombreux enjeux politiques et environnementaux. C'est pourquoi, l'Algérie s'engage dans une politique de transition énergétique afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Cette décision est concrétisée par le programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique adopté en février 2011. À la faveur de ce programme, d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable et près de 200 millions de tonnes d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂) seront évitées (Ministère de l'Énergie, 2011) (APRUE, 2014). En effet, ledit programme vise à atteindre 22000 MW de sources d'énergies renouvelables entre 2011 et 2030, dont 70 % sont attribués à l'énergie solaire. En effet, l'énergie solaire est fortement dominante au sud de l'Algérie, recevant près de 3000 heures d'ensoleillement par an (CDER, 2011). Cette énergie est considérée comme un potentiel national et un levier de développement économique, environnemental et social.

Néanmoins, dix ans après le début du programme, un maigre taux de progression de 2% a été atteint, avec seulement de 22 centrales solaires à l'échelle industrielle (Ministère de l'Énergie, 2019). En effet, le gouvernement a favorisé l'investissement dans des centrales PV à l'échelle industrielle comme une alternative plus économique

à long terme. Cependant, leur implantation effective a été entravée par plusieurs obstacles de financement, qui ont retardé l'avancement du programme

En parallèle, la consommation d'électricité dans le secteur résidentiel du pays a doublé entre 2009 et 2017, atteignant 43% de la consommation globale d'électricité (APRUE), 2017). Afin de répondre à ces besoins croissants, la Société Nationale Algérienne d'Electricité et des Energies Renouvelables (SONELGAZ) a appelé à la construction de nouvelles infrastructures d'ici 2027, ajoutant ainsi 17.210 MW en matière de capacité de production d'électricité et environ 128.500 km du réseau de distribution d'électricité (SKTM Filiale du groupe SONELGAZ, 2018).

À cet égard, le système PV distribué sur les toits résidentiels semble être une option intéressante pour satisfaire ces besoins croissants. De nos jours, le système PV distribué retient de plus en plus l'attention des professionnels et des acteurs impliqués dans la prise de décision, notamment après la baisse significative des prix de la technique PV. Selon les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), les applications PV distribuées ont représenté près de la moitié de la croissance totale du PV dans le monde en 2018, et elles devraient doubler d'ici 2024, atteignant ainsi 530 GW (IEA, 2019 a).

Les installations solaires sur les toits résidentiels, commerciaux et industriels sont privilégiées dans le monde entier, comme un moyen efficace de réduire la consommation énergétique urbaine croissante. La flexibilité du PV distribué représente le principal avantage technique. En effet, un système distribué évite les pertes de transmission d'énergie et optimise la fiabilité du système en diminuant la pointe et en équilibrant l'offre et la demande (IEA, 2019c ; Pitt & Michaud, 2015). En outre, ces systèmes offrent également des avantages sociaux et environnementaux en matière de résilience climatique, d'efficacité des ressources et de faibles émissions de carbone (PNUE, 2015).

L'intégration massive du renouvelable dans le mix énergétique constitue en lui-même un enjeu majeur dans le sens où elle doit dépasser les considérations techniques qu'on lui attribue généralement. Elle doit également impliquer d'autres

considérations à travers une réflexion globale et transversale sur l'aménagement du territoire (Ibrahim, 2005). Elle nécessite d'une part, d'identifier et de connaître le potentiel énergétique (Souami, 2007) et d'autre part, d'adapter le type et la quantité d'énergie distribuée aux usages et aux besoins réels afin d'éviter les surconsommations (Blanchard & Debizet, 2015), tant dans le domaine du transport et de la mobilité que dans les secteurs résidentiels, tertiaire, industriel ou agricole.

Les expériences internationales ont montré que l'intégration des techniques PV dans les villes est principalement confrontée à des obstacles de planification et, plus précisément, au manque de sensibilisation des actionnaires aux ressources locales en énergie renouvelable (IEA-SHC Task 51, 2018). Autrement, le déploiement réussi du système PV distribué nécessite un engagement plus important par le biais d'outils d'évaluation qui aident à améliorer la connaissance de leur planification et de leurs applications dans les zones urbaines (IEA, 2019 b). En effet, l'identification du potentiel solaire dans les zones urbaines a une valeur importante pour promouvoir des politiques énergétiques adaptées, des programmes de financement et pour faire progresser les villes vers une transition énergétique à faible émission de carbone (Saretta et al., 2019).

C'est précisément dans ce contexte que nous avons jugé opportun d'orienter notre recherche sur l'évaluation du potentiel solaire réel en milieu résidentiel urbain. L'interrogation initiale, pour nous, visait à mesurer s'il était effectivement possible de soutenir et de promouvoir l'intégration de l'énergie renouvelable solaire dans les villes du Sud algérien de manière efficace et performante.

Définition du sujet : Le Couple « Ville /Energie » un sujet transdisciplinaire

L'énergie est un domaine qui a largement évolué depuis le début du XXe siècle, en fonction des changements de paradigme de la discipline et des préoccupations sociales, économiques et environnementales (Grenier, 2007). Dans le contexte actuel de crise énergétique, où la maîtrise des consommations et le développement des énergies renouvelables sont impératifs, le couple « Ville /énergie » apparaît au cœur de l'actualité, dans la mesure où la ville constitue une cible clé de la transition

énergétique mais aussi un moteur essentiel. Il nous paraît intéressant d'étudier cette interaction selon plusieurs approches, en vue de nourrir notre réflexion et positionner la recherche.

Les approches disciplinaires se distinguent. La géographie de l'énergie, par exemple, étudie la répartition spatiale de la production, la distribution et la consommation de l'énergie. Cette discipline a évolué au fil du temps vers l'analyse des organisations et pratiques à l'intérieur de la chaîne énergétique. A travers des approches territoriales ou d'analyses multi-scalaires, cette discipline développe des outils d'évaluation des consommations énergétiques et les GES des territoires et analysent les liens entre l'évolution socio-économique d'un territoire et l'évolution des conditions de production et de consommation énergétique de celui-ci (Laigle & Matthys, 2012). Selon Zimmerer, les nouvelles géographies de l'énergie emploient les outils cartographiques pour évaluer les ressources énergétiques des territoires et en les localisant (Zimmerer, 2011). Dans sa thèse doctorale, Camille Chanard défend le développement d'une approche locale de l'énergie, afin de proposer une utilisation rationnelle de l'énergie en tenant compte des orientations politiques et pour cibler les actions les plus efficaces, notamment en termes de réductions des consommations. Cette thèse nous offre une étude des conditions de mise en œuvre d'une politique énergétique territoriale à travers l'analyse des jeux d'acteurs et de l'organisation spatiale (Chanard, 2011).

Le développement des politiques de maîtrise de la demande énergétique, la nécessité de faire évoluer les modes de vie vers plus de sobriété, et la prise de conscience de l'existence d'une précarité énergétique ont ouvert le champ de la recherche pour la sociologie. Les études portent essentiellement sur l'analyse des comportements de consommation énergétique, notamment dans les logements (Subrémon, 2010). Il s'agit de connaître les usagers et leur comportement en matière de température, de chauffage, d'ouvertures des fenêtres ou d'usages technologiques pour favoriser une économie d'énergie. D'autres recherches portent sur l'appropriation des technologies et leur impact sur des modes de vie dans les bâtiments écologiques ou dans les éco-quartiers (Wüstenhagen *Et Al.* 2007) (Wolsink, 2012).

Dans une approche politique-économique, nous observons un décloisonnement progressif des acteurs et des secteurs dans le domaine de l'énergie. Le dialogue s'instaure entre producteurs, distributeurs et consommateurs. Ainsi, les recherches dans cette approche sont centrées sur la planification et les modes de coordinations entre les acteurs (Métreau, Laponche, 2003), et les outils et les instruments de politique énergétique (maîtrise de la consommation et développement des EnR). Cependant, on retrouve aussi des recherches d'évaluation des coûts de distribution des énergies fossiles et des énergies renouvelables, effectuées dans le but de réinventer des modèles de financement énergétique (Bouvier, 2009).

Dans une autre approche, cette fois-ci plus technique, quelques travaux s'intéressent aux déploiements des innovations technologiques de l'énergie dans la ville (Crape, 2003). Le développement des réseaux intelligents, dits « *smart grids* », ont permis la collecte des données, la communication bidirectionnelle, la gestion et le pilotage en temps réel des flux énergétiques. Dans ce sens, de nombreux chercheurs s'interrogent sur les conditions de leurs intégrations et la gestion hybride des flux énergétiques en vue d'optimiser la consommation, la distribution et la production (Carlos, 2003 ; Abbey, 2006 ; Degobert, 2006).

Enfin, dans le champ de la recherche urbaine, deux grands groupes de travaux ont retenu notre attention. Il s'agit des travaux relatifs à l'optimisation énergétique et ceux de la conception énergétique des quartiers à Net-zero-Energy. En effet, parmi les premières recherches qui ont été lancées pour élargir le champ d'application de l'énergie dans la ville, nous pouvons aborder l'importance de la morphologie urbaine dans l'efficacité énergétique. La forme de la ville est un critère fondamental pour réduire la consommation de ressources et les émissions mondiales de carbone. Elle peut, à elle seule, diviser la consommation d'énergie sur deux (Salat & Nowacki 2010).

Un autre pan de la recherche se focalise plus sur les actions et les conceptions adoptées dans les quartiers durables pour répondre à la question énergétique. Taoufik Souami met en évidence trois manières d'appréhender les quartiers durables sous l'angle énergétiques. D'abord, la conception idéale, qui selon lui, promeut la

vision d'un quartier autonome en énergie. Ensuite, la conception opérationnelle privilégie l'optimisation de toutes les composantes du système énergétiques à travers des solutions sur mesure. Enfin, la conception évaluative cherche à évaluer la performance énergétique du quartier et l'isole artificiellement du reste du territoire (Souami, 2007).

Le concept de Bâtiment à Energie Zéro (ZEB), qui a émergé dans le monde entier au début du 21^e siècle, se concentre sur le potentiel des bâtiments à couvrir autant d'énergie qu'ils en consomment grâce aux énergies renouvelables. Ce concept a été adapté par l'UE dans le cadre réglementaire des bâtiments (EPBD, 2010). Ceci a permis d'impulser de nombreuses études sur le potentiel solaire. Celles-ci ont commencé principalement à l'échelle du bâtiment, mais qui se sont progressivement étendues à l'échelle urbaine. Le récent débat sur les « *Zero Energy Districts (ZED)* » est considéré comme une opportunité d'atteindre des objectifs de haute performance qui auraient pu être irréalisables à l'échelle d'un seul bâtiment (Polly et al., 2016).

Si ces approches nous renseignent sur la transdisciplinarité de l'énergie dans la ville, elles contribuent partiellement à mettre en perspective notre problématique et à orienter notre recherche. Pour donner suite à ces multiples recherches recensées, nous avons décidé de mettre notre recherche à la croisée de deux disciplines. Tout d'abord, l'approche technique qui est indispensable car elle apporte des éléments incontournables ne pouvant être occultés dans la gestion de l'énergie, en particulier pour les réseaux de distribution. Puis, l'approche spatiale (architecturale et urbaine), qui constitue le socle de notre recherche. Elle vise, à partir de l'ensemble des éléments proposés par les autres approches, à mettre en relation les configurations spatiales et morphologiques avec les considérations techniques et sociales.

Problématique

Le Sud algérien a été marqué par une urbanisation peu maîtrisée, calquant ses modèles sur ceux du nord du pays, sans se soucier de l'inadéquation avec ses milieux. Aussi, nous avons observé l'adoption de "formes urbaines traditionnelles" dans des îlots de la "ville coloniale", où il y a eu la création de nouveaux quartiers s'inspirant

du système d'îlots. Cette "hybridation" semble être le résultat d'une évolution par combinaisons successives des formes architecturales et urbaines. A toute reconstruction, ou extension nouvelle, les habitants ajoutent certains dispositifs, ou en éliminent d'autres. Ceci a détruit les spécificités des milieux et le microclimat, qui se fonde sur la forme du relief, les matériaux de construction mais également le tracé géométrique spécifiques (Côte, 1996).

Dans ce contexte, la problématique énergétique dans le sud algérien peut être considérée éminemment morphologique, car comme nous l'avons exposé précédemment, la production et la consommation énergétiques demeurent très dépendantes de l'organisation de la ville. En parallèle, plusieurs avancées technologiques mobilisant des énergies renouvelables en milieu urbanisé se sont développées de par le monde. Alors qu'en Algérie, l'énergie est encore produite dans les stations photovoltaïques ou éoliennes isolées, et injectée dans le réseau public sans que soient annoncés les espaces où elle est consommée.

Les données chiffrées démontrent que la consommation d'électricité dans le secteur résidentiel du pays a doublé entre 2009 et 2017, atteignant 43% de la consommation globale d'électricité. (APRUE, 2017). À ce rythme, d'ici 2027, l'État programme encore de rajouter 17 210 MW en matière de capacité de production d'électricité et environ 128 500 km du réseau de distribution d'électricité (SKTM Filiale du groupe SONELGAZ, 2018). Ce constat était un point déclencheur pour notre problématique. L'intégration des énergies renouvelables dans le secteur résidentiel est une option intéressante aux multiples avantages. Du moment qu'elle pourrait répondre à ces besoins croissants, elle offre plusieurs avantages techniques. En matière de flexibilité, éviter les pertes de transmission d'énergie et optimise la fiabilité du système ou même équilibre l'offre et la demande.

Ceci nous mène à nous interroger sur les pratiques de production, les habitudes de consommation et, plus largement, le processus de distribution. Il convient, dès lors, de poser la question suivante : **Quelle stratégie à adopter afin d'intégrer les énergies renouvelables en milieu résidentiel urbain ?**

L'intérêt de notre recherche réside dans le fait que nous cherchons une stratégie adaptée au contexte des villes algériennes en proposant une option technologique propice à la zone climatique, tendances démographiques et leur profil de consommation.

L'agence internationale des énergies renouvelables démontre que le potentiel des énergies renouvelables varie fortement en fonction des caractéristiques de chaque ville. Le solaire photovoltaïque en toiture est la technique la plus appropriée, étant dynamique et rentable pour les villes déjà établies à faible densité de population (IRENA, 2016).

A partir de ce constat, émerge un foisonnement de questions :

1. Quel est le niveau du potentiel solaire urbain dans le secteur de l'habitat ?
2. Comment gérer ce potentiel solaire afin d'assurer un équilibre entre l'offre et la demande énergétique et atteindre l'objectif le Net-zéro Energie ?
3. Quel est l'impact de la morphologie urbaine sur le potentiel solaire ? et comment assurer un compromis entre la performance solaire et la qualité environnementale dans les climats chauds pour guider les futures conceptions dans cette zone climatique ?

C'est à ces interrogations que notre recherche vise à répondre.

Hypothèses de la recherche

Dans le cadre de notre réflexion, trois principales hypothèses se sont esquissées. Elles se présentent comme suit :

1. La morphologie des villes du sud a le potentiel de développer des énergies renouvelables en site urbanisé et tolère mieux que d'autres un système de distribution décentralisé ;
2. L'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque en milieu urbain constituerait une opportunité de passer aux réseaux intelligents et attendre le net-zéro énergie ;

3. L'intégration du solaire photovoltaïque imposerait une adaptation et conduirait à des nouvelles organisations morphologiques.

Objectifs de la recherche

L'objectif de cette thèse est de développer une dimension urbaine qui permettrait d'accompagner le programme de promotion des énergies renouvelables pour une meilleure efficacité et une utilisation plus rationnelle de l'énergie. Nous nous intéressons, plus particulièrement, à l'évaluation du potentiel solaire dans le secteur de l'habitat. L'approche que nous adoptons pose les fondements d'un processus défini par une interaction urbaine, architecturale et technique afin d'améliorer la performance énergétique du bâti existant et pour guider les futures conceptions à atteindre l'objectif net zéro.

En se concentrant sur une partie du sud algérien, la pertinence scientifique et l'originalité de cette thèse se traduisent par le souci d'identifier le processus par lequel un compromis éclairé se dresse entre les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire. Il s'agit de saisir l'opportunité de la ressource solaire abondante en faveur d'une intégration des panneaux photovoltaïques dans le secteur de l'habitat, mais également relever le défi climatique de réduire son impact sur le confort thermique.

Au terme de ce raisonnement, notre objectif se scinde en trois principaux points complémentaires, que l'on exprime de la manière suivante :

1. Estimer le potentiel solaire urbain et technique dans le secteur de l'habitat à l'échelle de la ville.
2. Proposer des scénarios d'optimisation des interrelations complexes entre l'offre solaire et la demande d'énergie dans le secteur de l'habitat dans l'objectif d'atteindre le net zéro énergie.
3. Examiner l'impact de la morphologie urbaine sur les performances solaire et environnementale et déterminer un équilibre optimal entre les performances relatives à la qualité environnementale et celles liées au potentiel solaire.

Démarche méthodologique

Pour garantir une conception solide et légitime de notre méthodologie de recherche, nous adoptons une démarche convergente adductive qui associe les connaissances théoriques et les données empiriques afin de poser les fondement d'un processus d'intégration de l'énergie solaire en milieu urbain. En effet, notre recherche a ainsi pour ambition de mettre en place une évaluation du potentiel solaire et énergétique du secteur de l'habitat par ses déterminants morphologiques et typologiques.

Une telle démarche requiert pour son développement une étude scientifique qui, en premier lieu, se base sur une approche analytique des études théoriques déjà établies autour des concepts clés de cette recherche d'où la nécessité de recourir à la démarche déductive. Cela implique de passer en revue la sémantique et l'épistémologie de la transition énergétique appréhendée par l'intégration des énergies renouvelables et le solaire particulièrement. Pour ce faire, une recherche bibliographique approfondie a été élaborée ayant pour but de cerner les différents méthodes et outils d'évaluation du potentiel solaire dans le devoir de positionner scientifiquement notre recherche et répondre au mieux aux différentes interrogations établies par la présente. Dans ce sens, la littérature a guidé notre raisonnement hypothétique et a influencé nos orientations méthodologiques en termes d'échelles d'intervention, outils et protocole élaboré pour examiner les données. Le Tableau 1 viens récapituler et synthétiser l'ensemble de la démarche scientifique élaborée dans la présente recherche, et ce à travers la matérialisation du raisonnement scientifique qui vise à explorer la problématique principale de la recherche.

En parallèle, notre problématique prend appui également sur l'observation empirique et les données climatiques, urbaines et énergétiques relatives aux cas d'étude. L'ensemble de ces données s'interprète selon une approche analytique. Nous sommes partis du constat national que la stratégie adoptée par le gouvernement privilégie le photovoltaïque à l'échelle industrielle ; or que les villes du Sud particulièrement constituent une infrastructure prometteuse pour le développement de cette ressource en milieu urbain. Ce constat nous a poussés à poser des questionnements ouverts sur le potentiel solaire des villes du Sud algérien,

les défis et les opportunités que l'on dispose en faveur de l'intégration des techniques solaires dans le secteur de l'habitat. Ces derniers ont été affinés le long de la démarche, cette fois-ci, inductive en explorant les différents éléments à prendre en considération pour une estimation réaliste du potentiel solaire photovoltaïque dans le secteur de l'habitat. L'objectif vise à proposer des scénarios de gestion en fonction du bilan énergétique local établi et aboutir ainsi à un équilibre entre la demande énergétique et la production photovoltaïque. De plus, pour relever le défi climatique dans le contexte du sud algérien, une exploration d'un compromis entre les considérations énergétiques et environnementales s'est effectuée à travers une approche paramétrique visant l'optimisation du potentiel solaire des typologies résidentielles mais au même temps qui respecte les conditions climatiques à travers des indications ciblées. La pertinence scientifique réside dans le fait que la présente recherche aspire à trouver un équilibre optimal entre les approches relatives à la qualité environnementale et celles liées à l'évaluation du potentiel solaire.

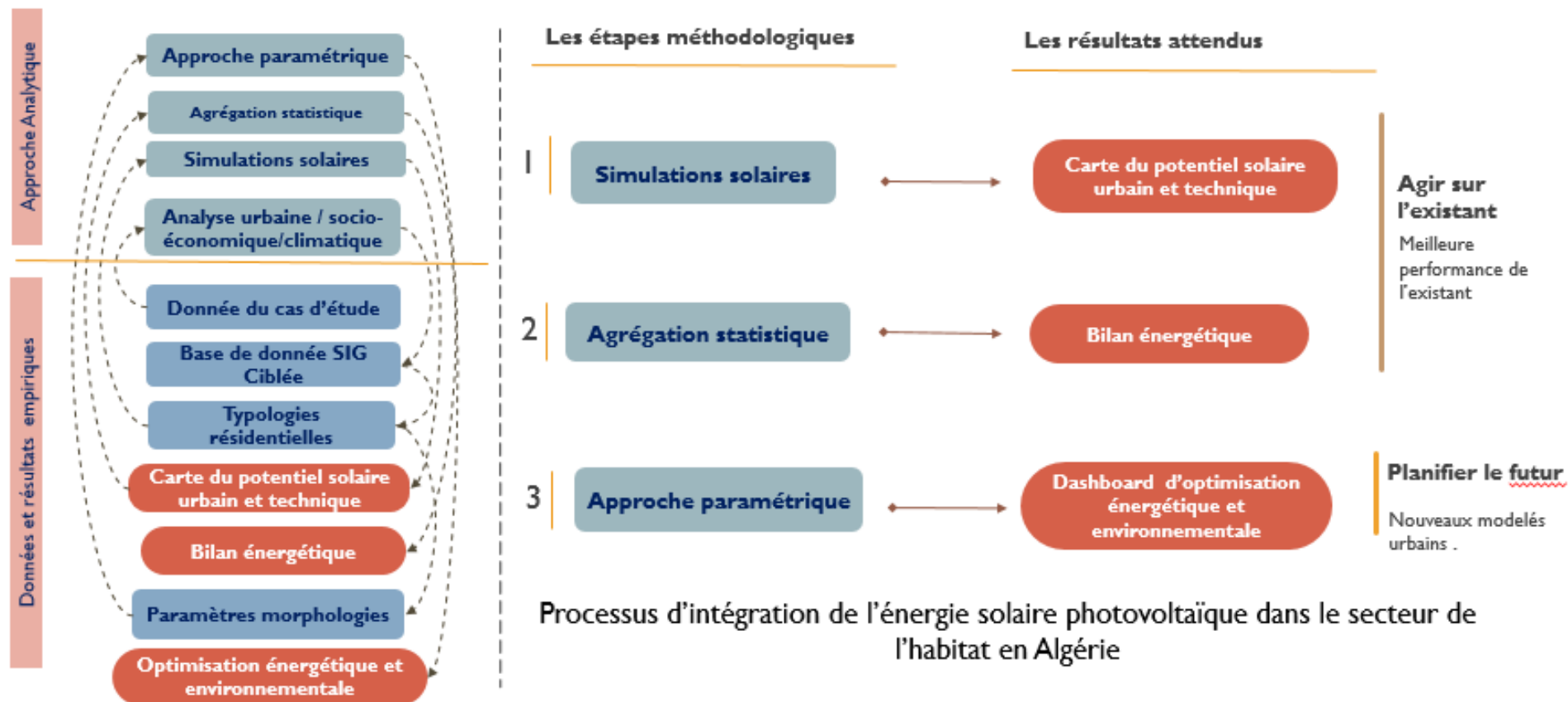
L'adoption d'une démarche adductive combinant l'induction et abduction s'est avérée impérative dans la mesure où les résultats issus de chacune des démarches se complètent et se nourrissent. Ainsi, l'approche développée procède par interaction spirale entre observations, hypothèses, analyses et confrontation avec la littérature permettant un haut niveau d'innovation. La figure 1 schématise le raisonnement établis.

Table 1. Synthèse du raisonnement hypothétique/problématique

Problématique : Comment intégrer l'énergie solaire photovoltaïque en milieu résidentiel urbain ?

Question de recherche	Hypothèse	Etapas à suivre
Quel est le niveau du potentiel solaire urbain dans le secteur de l'habitat à Laghouat ?	La morphologie de Laghouat permettrait de développer l'énergie solaire en site urbanisé et tolère un système de distribution décentralisé .	Une approche combinée pour l'estimation du potentiel solaire de la commune.
Comment gérer ce potentiel solaire pour assurer un équilibre entre l'offre et la demande énergétique et atteindre l'objectif le Net-zéro Energie ?	L'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque en milieu urbain constituerait une opportunité de passer aux réseaux intelligents et atteindre le net-zéro énergie..	Un modèle d'agrégation statistique pour établir le bilan énergétique de la commune.
Quel est l'impact de la morphologie urbaine sur le potentiel solaire ? et comment assurer un compromis entre la performance solaire et qualité environnementale pour guider les futures conceptions dans cette zone climatique ?	L'intégration du solaire photovoltaïque imposerait une adaptation et conduirait à des nouvelles organisations morphologiques.	Une approche paramétrique pour l'optimisation du potentiel solaire des typologies résidentielles en fonction des paramètres urbains et architecturaux

Figure 1.raisonnement scientifique , démarche méthodologique et résultats attendus de cette thèse .



Structure de la thèse

La thèse est organisée en deux principales parties. **La première partie** retrace le parcours de réflexion autour de notre objet de recherches et pose les fondements du cadre contextuel, théorique et méthodologique du propos. Cette dernière se décline en trois chapitres.

Le chapitre 1 examine les circonstances clés et les tendances récentes du contexte énergétique et climatique mondial mettant en exergue l'interrelation conceptuelle entre la transition énergétique, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables. Cela démontre le rôle de la ville comme l'échelle la plus appropriée pour mener la transition énergétique et expliciter ses motivations visant à promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables en milieu résidentiel urbain.

Le chapitre 2 s'interroge sur le processus d'intégration des énergies renouvelables dans le milieu résidentiel urbain comme une solution clé pour accélérer la transition énergétique. Le chapitre se focalise, d'une part, sur la planification et les leviers d'actions en faveur de l'adoption énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie solaire. D'autre part, à travers une revue de littérature, il identifie un nombre d'approches, de méthodes et d'outils liés à l'évaluation des aspects solaires dans le milieu urbain afin de saisir la complexité de ce sujet et souligner le positionnement et l'originalité de notre approche.

Le chapitre 3 vient construire le cadre méthodologique et définir le protocole et le périmètre de recherche afin de parvenir à un processus d'évaluation du potentiel solaire pour la planification actuelle et future. Pour ce qui est de la planification actuelle, il s'attache à proposer des scénarios d'aide à la décision et de gestion pour plus intelligente de l'énergie en se basant sur une estimation du potentiel solaire urbain et technique des toitures résidentielles existantes afin de parvenir à un bilan énergétique à net zéro. En ce qui concerne la planification future, le chapitre discute des outils d'aide à la conception solaire en mettant l'accent sur l'impact de la morphologie urbaine sur les performances photovoltaïques dans le secteur de l'habitat au Sud algérien et fournit des recommandations architecturales et urbaines pour les futures opérations de construction pour l'optimisation du potentiel solaire et environnementale. Ces étapes sont élaborées au sein d'un système innovant couplant plusieurs outils numériques avancées soutenue par la communauté scientifique à savoir le moteur radiance via les plugins *ladybug* de *Grasshopper* pour la simulation solaire, *energy plus* Via *honey bee* pour la consommation énergétique.

La seconde partie de cette thèse procède à l'application de la méthodologie en mettant en évidence les principaux résultats de recherche et en discutant chacune des étapes d'interprétation analytique. Elle pose les bases conceptuelles du processus d'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque en milieu urbain.

Le chapitre 4 met en avant le caractère local et les spécificités de notre cas d'étude dans son milieu naturel, urbain et socioéconomique. Il s'agit d'une analyse couvrant la composition urbaine de la commune de Laghouat et son secteur résidentiel. Cela implique également la constitution d'un socle numérique qui sert d'infrastructure spatiale pour notre approche analytique.

Le chapitre 5 évalue le potentiel solaire afin de déterminer le potentiel théorique, urbain et technique du cadre résidentiel existant. Il est nécessaire pour engager les perspectives de gestion au sein du système énergétique urbain dans le but d'équilibrer les interrelations complexes qui existent entre l'offre et la demande, et d'atteindre l'objectif du net zéro-énergie à l'échelle communale.

Bien que notre recherche vise à optimiser le potentiel solaire en faveur d'une intégration des panneaux photovoltaïques, ceci ne peut être établi indépendamment de la particularité climatique du Sud algérien. **Le chapitre 6** poursuit l'analyse de l'impact des paramètres morphologiques en mesurant les performances énergétiques, mais en considérant également les particularités environnementales de l'exposition solaire sur le confort thermique dans un climat du Sud. Pour ce faire, nous développons une réflexion relative à la création d'un Dashboard interactif. L'élaboration du Dashboard constitue une autre originalité de notre recherche car il est conçu dans le but d'aider à trouver l'équilibre entre les considérations énergétiques et environnementales quantitatives dans la conception des typologies résidentielles, ce qui permettra de guider les planifications futures en matière d'architecture et d'urbanisme dans le Sud algérien.

Partie 1.

L'impératif transition énergétique des villes

Durant la dernière décennie, le secteur de l'énergie a fait face à de nombreux défis d'ordre économique, technologique et environnemental. Dans ce contexte, la transition énergétique est apparue comme un processus impératif dicté par les tensions économiques autour des énergies fossiles et l'urgence de lutter contre les effets du changement climatique.

Cette première partie, nous allons retracer la construction de notre objet de recherches et posons les fondements du cadre contextuel, théorique et méthodologique du propos. Elle s'organise sur trois chapitres :

Le chapitre I examine le contexte énergétique mondial et les nombreux enjeux qu'il soulève dans l'objectif d'appréhender les incidences de la crise de l'énergie sur la ville et de s'interroger sur son rôle dans la transition des systèmes énergétiques vers un modèle à faibles émissions favorisant l'intégration des énergies renouvelables en milieu urbain.

Le chapitre 2 met en évidence les politiques et les principaux leviers d'actions reconnus par la communauté scientifique pour soutenir les décisions politiques en matière d'énergie solaire dans l'urbain existant et guider toute planification urbaine future. L'accent est mis sur les approches, les méthodes et les outils d'évaluation qui offrent des informations techniques relatives aux aspects solaires dans la planification spatiale de la ville.

Le chapitre 3 construit le cadre méthodologique, le protocole et le périmètre de recherche. L'objectif est de proposer une approche d'évaluation du potentiel solaire qui prend en compte deux échelles d'étude, à savoir la commune et les îlots résidentiels. La première permet d'estimer le potentiel solaire à l'échelle de la commune. La seconde permet de déterminer la méthode la plus efficace pour optimiser le potentiel solaire conception des blocs résidentiels pour la planification future

Contexte énergétique mondiale : Transition des villes vers des énergies à faibles émissions

Introduction

Nous entamons la réflexion par l'analyse du contexte global lié au changement climatique afin d'y situer notre problématique. Rappelons qu'il est question, dans cette thèse, d'explorer le processus d'intégration de l'énergie solaire en milieu urbain en évaluant l'impact de la morphologie sur le potentiel solaire. Pour ce faire, le premier chapitre vise à examiner les tendances récentes de la consommation énergétique face à de nombreux défis en mettant en exergue l'interrelation conceptuelle entre la transition énergétique, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables. L'objectif consiste à mieux appréhender les incidences de la crise de l'énergie sur la ville et de s'interroger sur le rôle de cette dernière dans la transformation des systèmes énergétiques vers un modèle à faibles émissions, favorisant un mix diversifié et ouvert à l'intégration des énergies renouvelables (EnR) en milieu urbain

1. Transition énergétique : Le secteur de l'énergie face aux défis du changement climatique

1.1. Tendances énergétique globales

Depuis la révolution industrielle jusqu'aujourd'hui, les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ont joué un rôle fondamental dans les systèmes énergétiques mondiaux. Corrélée avec la croissance démographique et économique, la consommation d'énergie primaire est en hausse constante à un rythme inquiétant. Presque chaque année entre 1950 et 1980, la consommation de combustibles fossiles

augmentait d'environ huit fois la consommation initiale. La quantité a carrément doublé depuis 1980.¹

Cette demande croissante a eu des conséquences préoccupantes sur l'environnement. Selon l'Agence Internationale de l'Energie, 65% des émissions du Gas à effet de serre provient de la production et la consommation énergétique

Ainsi, elle est considérée comme le contributeur majeur au changement climatique. Ses dommages environnementaux sont, désormais, ressentis partout sur le globe. Ils se traduisent en termes de fréquence et intensités par des vagues de chaleur, de la sécheresse, de fortes précipitations ou encore des inondations et élévation du niveau moyen de la mer.

En outre, les ressources fossiles sont de nature épuisable. L'estimation des réserves restantes n'est, cependant, pas mesurée car elle dépend du rythme et du prix de leur exploitation. Bien qu'un large éventail de sources d'énergie à faible émission de carbone (nucléaire, hydroélectricité, solaire, éolien, biocarburants) est mis à disposition, à l'échelle mondiale, les énergies fossiles ont conservé une position dominante comme principales sources d'énergie avec un pourcentage de 80 % dans le mix énergétique (Figure 3).

La communauté internationale a pris conscience du risque climatique et a établi les principes clés pour assurer à la fois la résilience climatique et une sécurité énergétique à travers de nombreuses négociations.² L'objectif consistait à stabiliser les émissions des Gas à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêcherait ou réduirait les perturbations climatiques. Ainsi, l'Accord de Paris ^a marqué un tournant décisif en termes d'efforts mondiaux. Cet accord a la particularité d'avoir un soutien quasi universel. En effet, pas moins de 196 pays dits développés et en voie de développement ont convenu de réduire leur émissions de gaz à effet de serre dans le

¹ Données publiées dans la revue Statistical Review of World Energy à partir de 1965. Egalement disponibles sur : <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>

² Le protocole de Kyoto en 1997 et les Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques.

but d'empêcher les températures moyennes mondiales de dépasser 1.5 °C (Nations Unies, 2015)

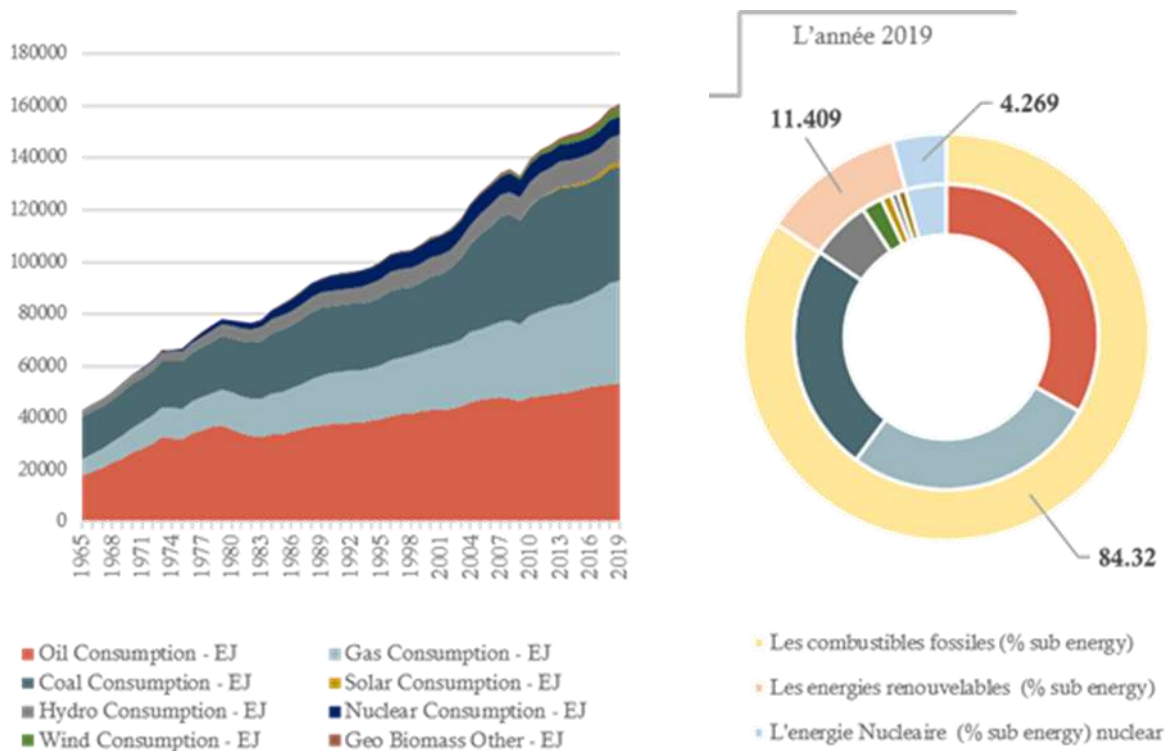


Figure 3 .Consommation énergétique mondiale par source.(Source : World Bank open data modifiée).

En vertu de cet accord, les pays signataires se sont engagé à focaliser leurs efforts et leurs investissements afin d'assurer un avenir résilient et durable.

A peine entrée en vigueur, cette négociation a impulsé l'utilisation des énergies propres à faibles émissions. Malgré cela, la consommation d'énergie finale est restée sur une trajectoire ascendante et rapide, principalement en raison de la baisse des prix des combustibles fossiles et de l'affaiblissement des efforts en matière d'efficacité énergétique (Renewable Now /REN 21, 2018) . En 2018, la consommation a atteint le pic avec un taux d'augmentation égale à 2.3%, soit le taux d'augmentation le plus important durant la dernière décennie. Il représente près du double du taux de la croissance moyenne depuis 2010.

Dans l'année qui suit, nous enregistrons une décélération de la demande mondiale d'énergie, de la moitié du taux de la croissance en 2018, et sensiblement au-dessus du taux moyen depuis 2010. Ceci est principalement dû aux gains d'efficacité énergétique, ainsi qu'à l'expansion dans l'utilisation des sources d'énergie renouvelable dans le monde conformément aux engagements des pays membres (IEA, 2018, 2020).

Au cours de l'année 2020, la pandémie mondiale de la COVID-19 a entraîné la pire crise économique que le monde depuis la seconde guerre mondiale. Le confinement a imposé plusieurs contraintes en termes d'activités économiques, ce qui a eu des implications majeures sur les systèmes énergétiques du monde entier. En effet, la demande mondiale d'énergie a diminué de 3,8% au premier trimestre 2020. Les émissions de CO₂ ont contribué à réduire la demande d'énergie de 5,8 %, soit près de 2 Gt de CO₂. Il s'agit de la baisse la plus importante jamais enregistrée puisqu'elle est presque cinq fois supérieure à celle de 2009, qui a suivi la crise financière mondiale. (IEA, 2020a).

Cependant, il faut signaler que cette baisse ne pousse en aucun cas à se réjouir. Car, les prévisions de l'agence internationale de l'énergie affirment que la production économique mondiale devrait rebondir de 6 % en 2021 compensant ainsi la contraction de 4 % en 2020 (IEA, 2020a). Près de 70 % de l'augmentation prévue de la demande mondiale d'énergie concerne les marchés émergents et les économies en développement, où la demande devrait atteindre 3,4 % au-dessus des niveaux de 2019. Cette augmentation souligne le risque que les émissions de CO₂ liées à l'énergie se dirigent vers leur deuxième augmentation annuelle, soit la plus importante de celles déjà enregistrées. La demande pour tous les combustibles fossiles devrait augmenter de manière significative à forte intensité de carbone et les émissions mondiales en 2021 pourraient atteindre 400 Mt de CO₂ (IEA, 2021b) .

Jusqu'à présent, rien ne permet de manière concluante comment cette crise influera sur long terme. Éviter un scénario similaire à celui ayant provoqué la crise de 2010 nécessite la mise en œuvre de changements de type structurel

rapidement, et ce dans la façon dont l'énergie est utilisée et produite plutôt que par la réduction de l'activité économique.

En somme, la demande d'énergie et des émissions dépendront des actions que les gouvernements mettront en faveur d'une transition énergétique propre, qui traduira les efforts déployés pour stimuler les économies du monde dans les années à venir. A cet égard, pour éviter les rebondissements rapides, l'intégration d'une plus grande part des énergies renouvelables serait nécessaire pour assurer la sécurité climatique et énergétique.

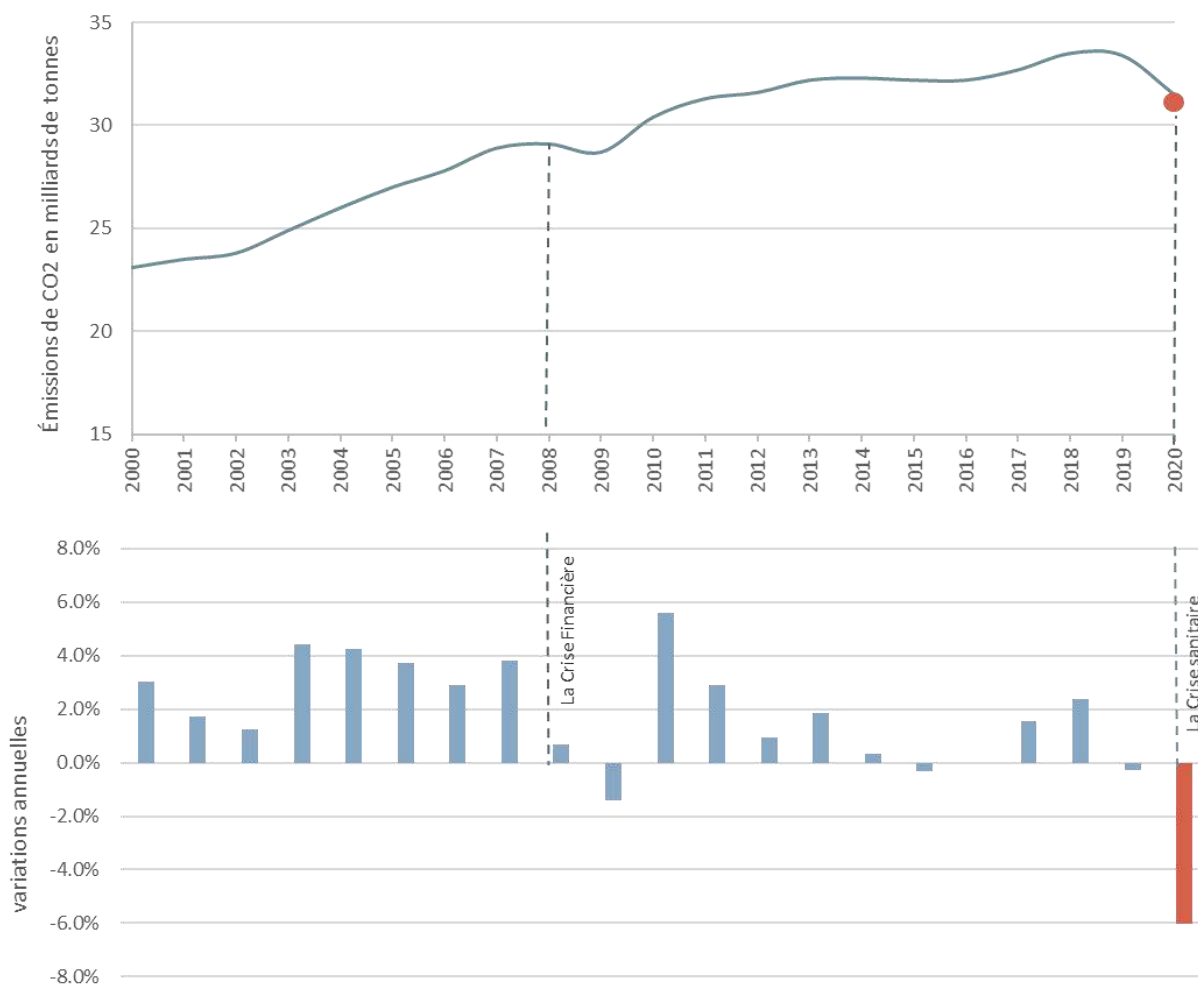


Figure 4. variations annuelles des émissions CO2 liée à l'énergie 1900-2020 .

Source (IEA, 2020a)

1.2. De la nécessité d'une relance durable pour les systèmes énergétiques : Quel avenir Post-COVID ?

1.2.1. Les orientations du *Recovery Plan*

En effet, la crise sanitaire engendrée par la COVID-19 a offert une opportunité inattendue pour calibrer soigneusement les plans de relance et de récupération économiques et environnementaux. Au-delà de l'an 2021, ce qu'il adviendra de la demande d'énergie et des émissions dépendra des efforts fournis par les gouvernements pour stimuler les transitions énergétiques propres.

Fondé sur une analyse rigoureuse menée en collaboration entre l'agence internationale de l'énergie et le Fond Monétaire International (FMI), un plan de relance durable a été établi dans le but d'atteindre trois objectifs principaux : stimuler la croissance économique, créer de l'emploi et mettre en place des systèmes énergétiques résilients et durables. Le rapport fournit aux décideurs des gouvernements du monde les données, les analyses et les options politiques les plus solides possibles afin de les aider à choisir la meilleure voie à suivre et agir sur la base de ces conclusions (IEA, 2020b).

Le plan prévoit des politiques et des investissements ciblés pour chaque secteur clé, notamment : (1) le déploiement de sources d'électricité à faible émission de carbone, comme les nouvelles énergies éolienne et solaire, ainsi que l'expansion et la modernisation des réseaux électriques ; (2) la diffusion des véhicules électriques; (3) l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et des appareils ; (4) l'augmentation de l'efficacité des équipements industriels ; (5) l'encouragement à la production et l'utilisation des carburants plus durables ; et (6) l'innovation dans des domaines technologiques essentiels tels que l'hydrogène, les batteries, le captage, l'utilisation et le stockage du carbone .

Ces objectifs adoptés améliorent la sécurité et la résilience de plusieurs manières. L'investissement dans les réseaux électriques et le stockage d'énergie, réduit les risques de rupture d'approvisionnement et contribue à moderniser les réseaux, en renforçant ainsi la capacité de résistance. De plus, un accès abordable aux services

énergétiques aide à intégrer des parts croissantes d'électricité renouvelable et améliore la fiabilité du système (IEA, 2021b). Une fois l'économie mondiale pourra recommencer à croître, ce plan de relance durable, si respecté, permettrait d'éviter un rebond des émissions tout en les faisant baisser structurellement de manière à générer de la croissance économique et à créer des emplois. Les émissions de pollution atmosphérique diminueraient également de 5 % grâce à ce plan, ce qui réduirait les risques sanitaires dans le monde entier.

Selon ce plan, l'an 2019 représente le pic définitif des émissions mondiales, les mettant sur la voie de la réalisation des objectifs climatiques à long terme, y compris l'accord de Paris (IEA, 2021b).

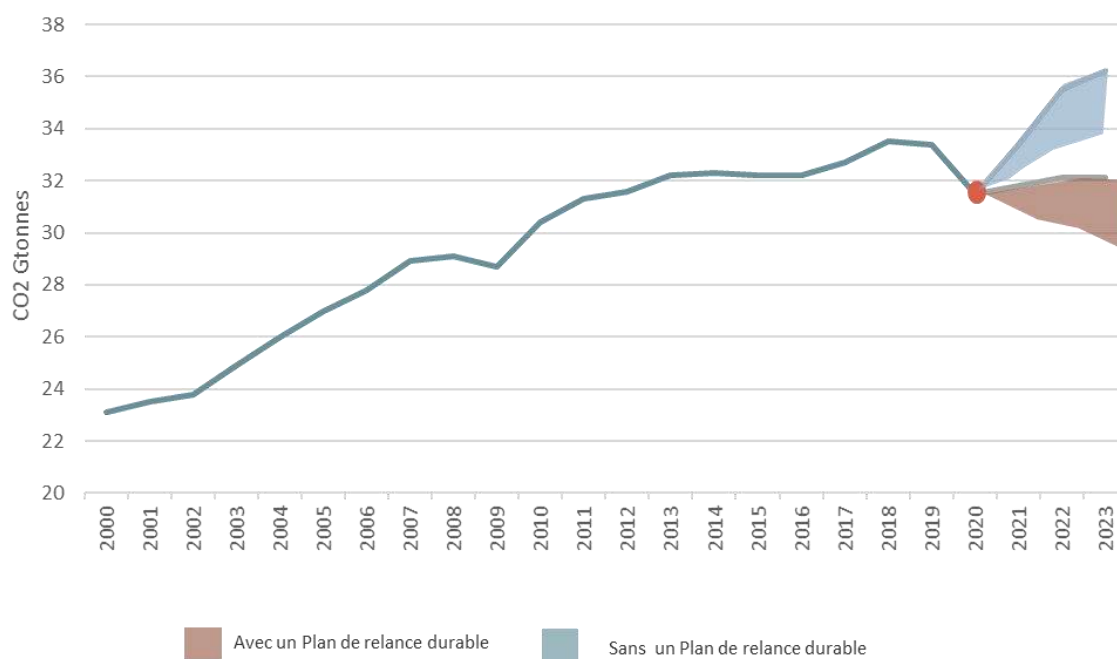


Figure 5. Emissions totale de CO2 avec et sans un plan de relance durable.

Source: IEA 2021

Les mesures d'efficacité énergétique proposées permettraient donc d'obtenir les réductions d'émissions globales les plus importantes dans le cadre du plan, accompagnées d'une augmentation importante de la production d'électricité à faible émissions. Ainsi, les émissions provenant des activités pétrolières et gazières diminueraient et environ un tiers des réductions des émissions de gaz à effet de serre

résulteraient de mesures qui permettraient également aux consommateurs et aux industries de réaliser des économies. Le processus de réforme des subventions inefficaces accordées aux combustibles fossiles s'accélérerait également, en profitant de la faiblesse des prix du pétrole et du gaz afin d'éviter de pénaliser les consommateurs.

1.2.2. L'objectif Net-Zéro Emissions d'ici 2050

L'agence internationale de l'énergie a lancé une étude complète sur la manière de passer à un système énergétique à net zéro émission d'ici 2050 tout en garantissant un approvisionnement énergétique stable, abordable, accessible et permettant une croissance économique robuste. Le rapport définit une voie rentable et économiquement productive basée sur sept (7) piliers de de-carbonisation : l'efficacité énergétique, le changement des comportements, l'électrification, le développement des énergies renouvelables, l'exploitation de l'hydrogène et la bioénergie et, enfin, l'investissement dans les technologies de stockage et les capteurs carbone (IEA, 2021c). Les technologies des énergies renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne constituent une étape clé. Le solaire photovoltaïque et l'éolien représentent ensemble près de 70 % de la consommation finale. Les mesures d'efficacité énergétiques se traduisent également par de nombreuses solutions dans les bâtiments, les véhicules, les appareils ménagers et l'industrie.

En effet, le zéro net d'ici 2050 repose sur une poussée technologique sans précédent. Le scénario propose un déploiement massif de toutes les technologies énergétiques propres et efficaces disponibles. Partant du postulat que toutes les technologies nécessaires pour réaliser les réductions importantes des émissions mondiales existent déjà, et les politiques qui peuvent conduire à leur déploiement ont déjà fait leurs preuves, d'ici 2030, la plupart des actions proposées pour la réduction mondiale des émissions CO₂ pourront être achevés. Au cours de la période 2030 - 2050, des efforts d'innovation doivent être déployés concernant les batteries avancées, les électrolyseurs à hydrogène et la capture et le stockage directs de l'air. La plupart de ces technologies sont actuellement déjà en phase de démonstration ou de prototype (IEA, 2021c) .

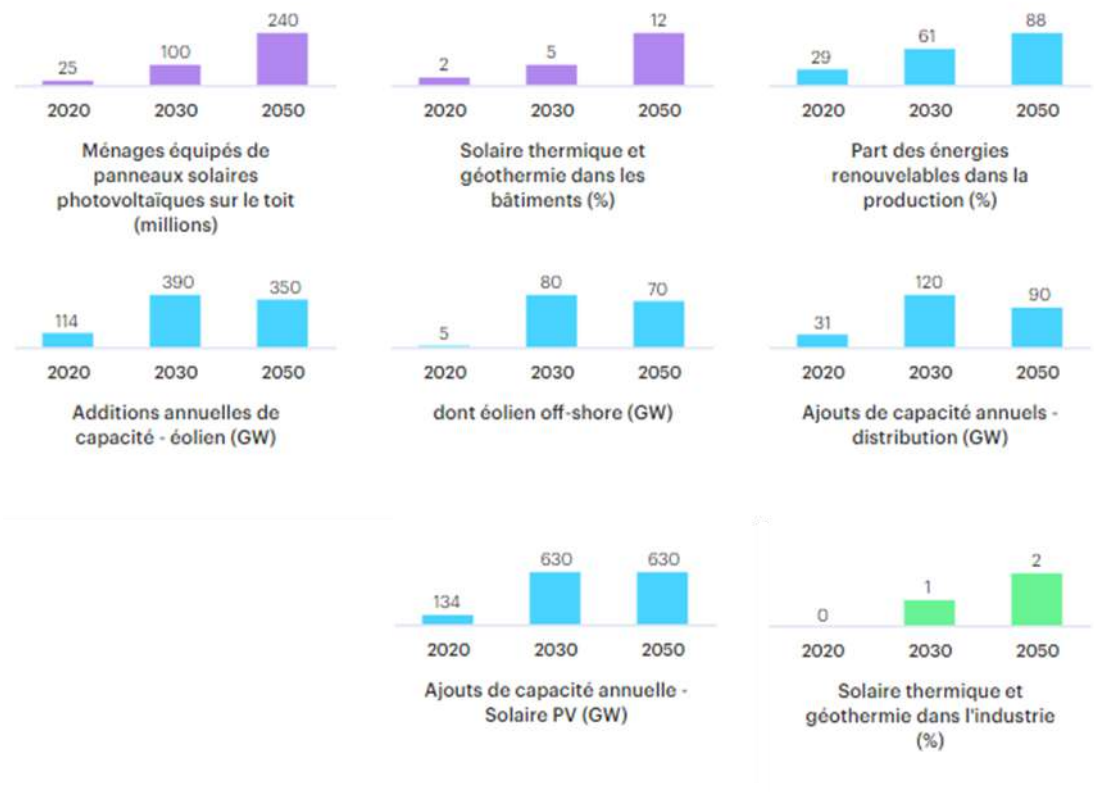


Figure 6. L'intégration des énergies renouvelables dans la consommation finale dans le scénario Net-Zéro émissions

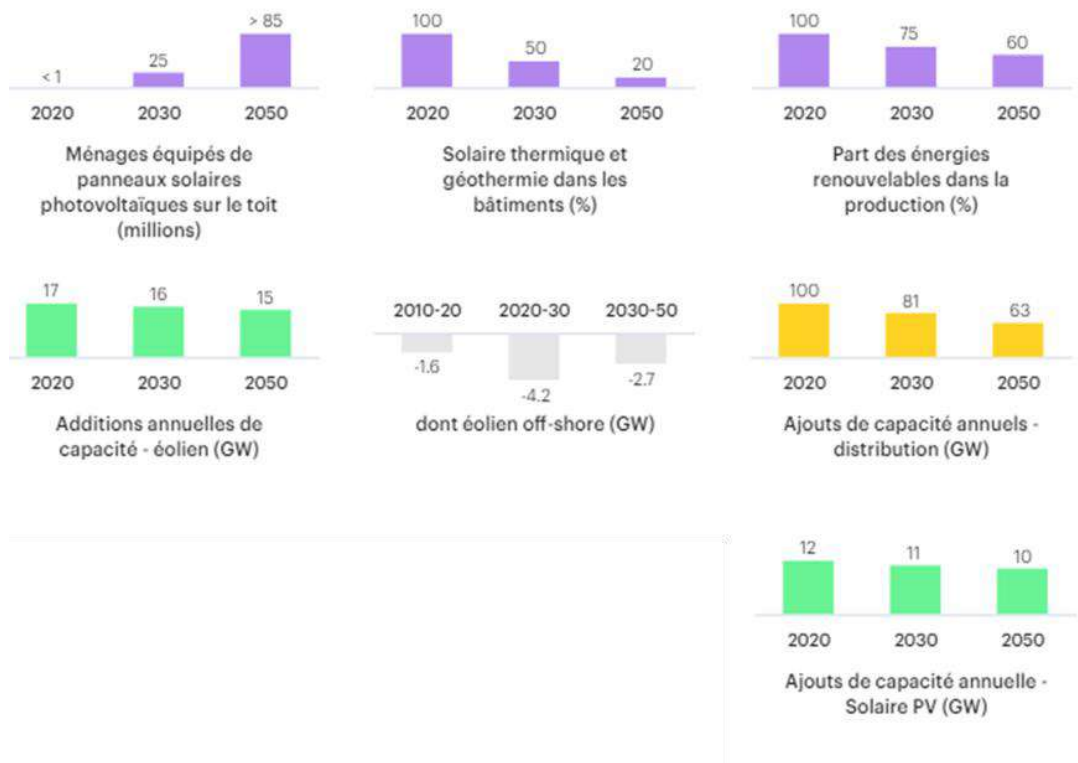


Figure 7. L'adoption des mesures d'efficacité énergétique dans le scénario Net-Zéro émissions
Source : (IEA, 2021c).

La trajectoire de zéro émission nette présentée sur la figure 8 montre que la demande mondiale d'énergie en 2050 est d'environ 8 % inférieure à celle d'aujourd'hui, mais elle sert une économie deux fois plus grande avec une population de 2 milliards de personnes de plus. C'est dire que l'utilisation plus efficace de l'énergie et l'efficacité des ressources combinées avec les changements de comportement permettent de compenser l'augmentation de la demande des services énergétiques à mesure que l'économie mondiale se développe et que l'accès à l'énergie s'étend à tous. (IEA, 2021c).

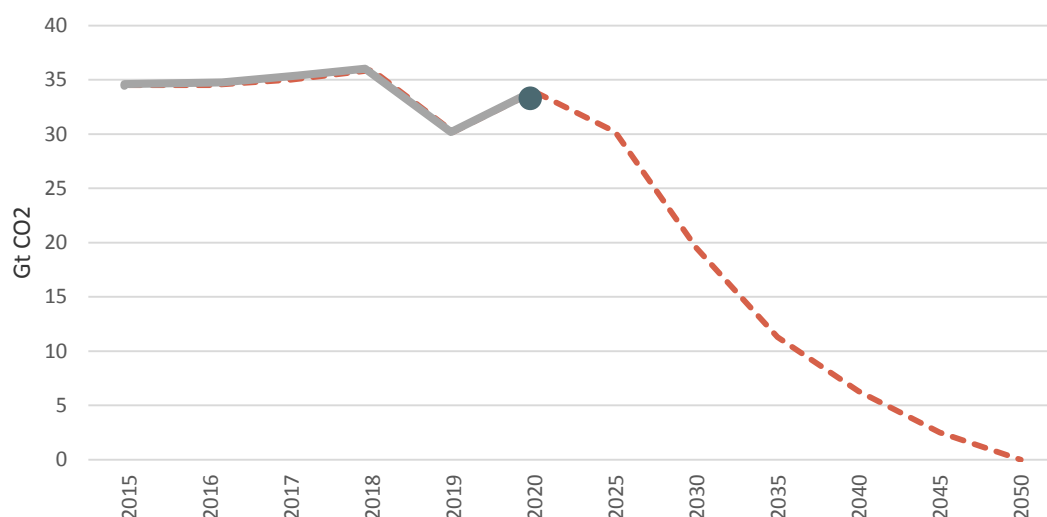


Figure 8. La trajectoire des émissions CO2 dans le scénario net zéro 2050.

Source : (IEA ,2021 c)

2. La ville au cœur de la transition énergétique

Considérée comme responsable de 70 % des émissions de CO2, les villes constituent des acteurs majeurs du changement climatique. On estime que 70 % de toutes les villes sont déjà confrontées aux effets du changement climatique. (C40 Cities, 2017).³

³ Le C40 Cities Climate Leadership Groupe est Créé et dirigé par 97 villes qui représente un 1/12 de la population mondiale et 1/4 de l'économie mondiale. Son activité se concentre sur la lutte contre les effets du changement climatique

Dans ce qui suit nous discutons l'impact de l'urbanisation sur le changement climatique mais également leur rôle dans le processus de transition.

1.1. L'urbanisation et le changement climatique

Les villes, par leur structure, densités et infrastructures, concentrent une énorme partie des échanges énergétiques et de la consommation finale. Selon les chiffres de l'IEA, deux tiers et un peu plus de la consommation énergétique mondiale s'est effectuée en zone urbaine et produirait 75 % des émissions CO₂ de la planète. L'urbanisation continuant à prendre du terrain, la part des villes dans la consommation énergétique mondiale devrait continuer à croître. En 2013, les prévisions pour la croissance urbaine entre 1990 et 2025 étaient de 150 %, avec une probable multiplication par 4 de la consommation énergétique et des émissions de CO₂ associées (Salat, Bourdic & Labbe, 2013). Selon la densité de la population et les conditions climatiques, une croissance urbaine de 1 % a conduit en moyenne à une croissance de 2,2 % de la consommation énergétique.

Dans ce contexte, la sécurité énergétique et l'utilisation efficace des ressources énergétiques, les objectifs climatiques mondiaux demeurent impératif, il est essentiel que les villes jouent un rôle de premier plan dans la transition énergétique. Les experts considèrent que les villes offrent des opportunités pour optimiser la durabilité du système énergétique. Les villes constituent ainsi des cibles et l'un des moteurs clé de la transition énergétique (Rutherford & Coutard, 2014), le développement des énergies à faibles émissions et enfin la maîtrise de la demande en énergie (Keirstead & Shah, 2013). En effet, les bâtiments et les transports sont considérées responsables de la majorité de la consommation en énergie finale des villes. Les bâtiments, tout particulièrement, consomment, à eux seuls, à peu près 30 % de l'énergie finale et plus de 55% de la consommation mondiale en électricité. Cette consommation s'est amplifiée continuellement depuis l'an 2000, à un taux de croissance de 1,1 % par an (IEA, 2019) .

Plusieurs facteurs ont contribué à cette augmentation, notamment celui de l'étalement urbain et la demande croissante en énergie pour les équipements de chauffage et de climatisation ainsi que ceux liés à d'autres services énergivores,

particulièrement les appareils électroménagers et les appareils connectés. Par ailleurs, les événements météorologiques dans de nombreuses régions du monde sont aussi responsables d'une partie de la croissance de la demande d'électricité en 2019.⁴ En effet, les hautes températures prolongées ont entraîné une augmentation de la demande de climatisation. Au total, 29 pays de l'hémisphère nord situés, en particulier, en Europe occidentale ont battu des records de tous les temps des journées la plus chaude pendant les mois d'été.⁵

Après s'être stabilisées entre 2013 et 2016, les émissions de CO₂ provenant des bâtiments ont également augmenté. En effet, depuis 2016, la demande accrue de services énergétiques pour les bâtiments a dépassé les efforts d'efficacité énergétique et de dé-carbonisation, entraînant ainsi une flambée des émissions liées à l'énergie dans les bâtiments. Les émissions directes et indirectes de l'électricité et du chauffage utilisés dans les bâtiments ont atteint 10 GtCO₂ en 2019, le nouveau record jamais enregistré auparavant (Figure n10).⁶

Malgré la contribution significative des villes au changement climatique, elles sont particulièrement vulnérables aux impacts de ce dernier.

L'épuisement des eaux souterraines, les incendies, les pénuries alimentaires, l'élévation du niveau de la mer, les pics de consommation d'énergie dus aux températures extrêmes, et la fréquence accrue des phénomènes météorologiques extrêmes telles que les inondations, les sécheresses et les tempêtes touchent de plus en plus les infrastructures urbaines et les habitants. En 2017, deux tiers des villes du réseau C40 ont déclaré avoir subi des effets négatifs liés au changement climatique, plus de 1200 juridictions et gouvernements locaux de 23 pays, représentant plus de

⁴ Il s'agit de la deuxième année la plus chaude jamais enregistrée après 2016 lorsqu'un fort phénomène El-Niño combiné au changement climatique ont augmenté les températures à travers le monde.

⁵ National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA), National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Annual Report 2019, published online January 2020, retrieved on July 29, 2021 from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201913>.

⁶ IEA (2020), Tracking Buildings 2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2020>

280 millions d'habitants, avaient déclaré un état d'urgence climatique (C40 Cities, 2017).

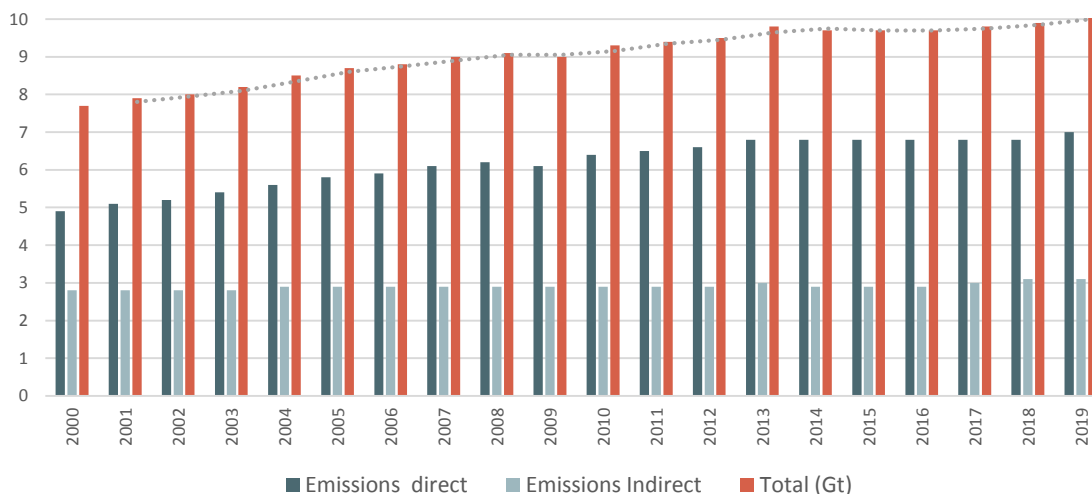


Figure 9. Émissions de CO2 liées à l'énergie du secteur des bâtiments .

Source: IEA (2020), Tracking Buildings 2020

Afin d'atténuer ces effets, les villes ont commencé à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre en intégrant les énergies renouvelables dans leurs activités. Chicago (Illinois, États-Unis), par exemple, a présenté sa feuille de route pour la résilience urbaine, qui prévoit notamment une transition vers une énergie 100 % renouvelable (Tampakis, Arabatzis, Tsantopoulos & Rerras, 2017). Berlin (Allemagne), quant à elle, motivée principalement par la protection du climat, a adopté son plan directeur Solarcity Berlin, dont l'objectif est de produire 25 % d'électricité solaire d'ici à 2050 (International Renewable Energy Agency - IRENA, 2019b). Les énergies renouvelables sont également intégrées pour les besoins de chauffage, de climatisation et de transports dans les stratégies climatiques. Le site relatif à la feuille de route climatique d'Helsinki (Finlande) inclut la dé-carbonisation du réseau municipal de chauffage et de refroidissement urbain d'ici 2050, notamment en développant les technologies géothermiques et solaires (Renewable Now - REN 21, 2018).

La transition énergétique des villes constitue désormais un objectif majeur pour les institutions, lesquelles la traduisent en politiques et actions publiques à travers des engagements qui visent à soutenir directement le développement d'énergies

renouvelables (IRENA, 2015). A titre d'exemple, en 2020, environ 830 villes de 72 pays avaient fixé de nouveaux objectifs ou adopté de nouvelles politiques afin de lutter contre le changement climatique. Ce chiffre inclut plus de 600 villes ayant agit dans le but d'atteindre 100 % d'énergies renouvelables (REN 21, 2021).

Les scénarios du futurs abordés précédemment prévoient que plus d'un milliard de personnes, soit 25 % de la population urbaine mondiale, vivront dans une ville ayant un objectif et/ou une politique en matière d'énergies renouvelables pour un total de plus de 1 300 villes (IRENA, 2019b). La réalisation des objectifs en matière d'énergie renouvelable en milieu urbain dépend non seulement de l'engagement politique et des investissements publics dans les énergies renouvelables, mais aussi de la capacité à favoriser l'adoption des énergies renouvelables, à l'échelle de la ville, par d'autres acteurs. Contrairement à la lenteur observée au niveau national, on assiste à des politiques implémentées à l'échelle municipale qui, comme le montre la table n2, vont au-delà du secteur de l'électricité pour soutenir les énergies renouvelables dans le chauffage et la climatisation, le secteur des transports.

Table 2 . Le rôle des villes dans le développement des énergies renouvelables à diverses échelles de gouvernance. Source : (IRENA, 2015).

	Municipal	Métropolitain	Régional	National
Définir les Objectif	+++	+++	++	+
Consommateurs	+++	++	++	
Producteurs	+++	++	++	+
Gestionnaire d'infrastructure	+++	+++	++	+
Décideurs	+++	+++	++	++
Financement	+++	+++	++	+
Planification urbaine	+++	+++	++	

2.1. Efficacité énergétique ou développement des énergies renouvelables : Un duo dynamique au service de la transition énergétique

Le débat sur la transition énergétique dans la ville repose sur deux volets, l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables. En termes de définition, l'efficacité énergétique est souvent désignée comme « *le premier carburant* » parce qu'elle constitue une ressource abondante que tous les pays peuvent procurer afin d'atteindre les objectifs clés liés à la réduction des effets du changement climatique et de la pollution atmosphérique tout en assurant une sécurité énergétique.

Pour mesurer l'efficacité énergétique, les statistiques internationales se basent sur l'indicateur de *l'intensité énergétique* pour estimer l'énergie utilisée par l'économie globale.⁷ L'intensité énergétique représente le rapport entre l'offre totale d'énergie et le produit intérieur brut (PIB) annuel créé. En se basant sur cette mesure de l'intensité énergétique, il est possible d'observer la manière dont la consommation d'énergie augmente ou diminue tout en recherchant les facteurs qui influent son développement. L'intensité énergétique, quant à elle, diminue à mesure que l'efficacité énergétique s'améliore (IEA, 2019a).

Plusieurs éléments interviennent dans la définition du degré d'intensité, notamment la structure de l'économie (ou la part des grandes industries consommatrices d'énergie), les caractéristiques géographiques (telle que les distances plus longues impliquant une demande plus élevée pour le secteur des transports) et les conditions météorologiques (changements de la demande de chauffage ou de refroidissement) (IEA, 2019a). Par conséquent, il faut mentionner qu'une intensité énergétique relativement faible d'un pays ne signifie pas nécessairement une efficacité énergétique élevée.

Les Nations unies dans leur objectif du développement durable recommandent un taux d'amélioration annuel de l'intensité énergétique de 2,6 % par an. Mais comme

⁷ Principalement parce qu'au niveau agrégé, il s'agit d'une mesure indirecte de l'énergie nécessaire pour satisfaire les services énergétiques demandés, et parce que cet indicateur est relativement disponible pour évaluer et comparer entre les pays. En d'autres termes, elle renvoie à la quantité d'énergie consommée par un pays pour produire de l'énergie.

les progrès mondiaux ont été plus lents que nécessaires au cours de ces dernières années, le taux d'amélioration annuel moyen désormais requis pour atteindre la cible 7.3 des objectifs du développement durable d'ici 2030 est de 3 %. En effet, l'intensité énergétique primaire mondiale a connu une tendance de ralentissement depuis 2015, des chiffres récents montrent que l'intensité énergétique primaire mondiale s'est améliorée de 1,1 % en 2018 (Figure n.11). Il s'agit du taux d'amélioration le plus faible depuis 2010 (IEA, 2019a).

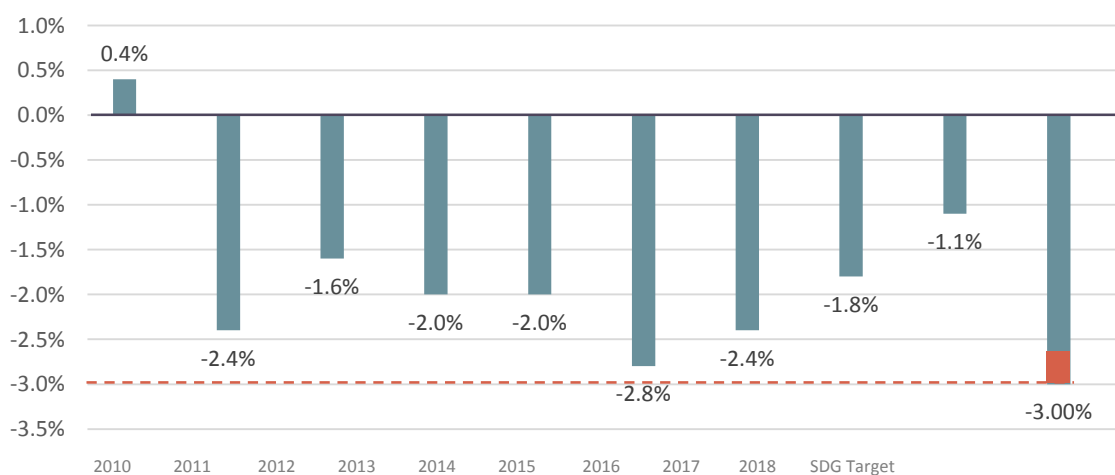


Figure 10. Les variations annuelles de l'intensité énergétique comparant aux objectifs SDG.

Source : (IEA, 2019a).

En effet, l'intensité énergétique est une approximation imparfaite de l'efficacité énergétique (IEA, 2019a). Comme expliqué précédemment, elle peut être affectée par un certain nombre de facteurs qui ne sont pas nécessairement liés à l'énergie. Pour avoir une meilleure évaluation de la demande d'énergie et d'efficacité, il y a lieu d'analyser en détail l'utilisation finale de l'énergie par secteur d'activité.⁸

Le secteur des transports représente la part la plus élevée de la consommation finale (35 %), suivi par celui de l'industrie (24 %) et ensuite le secteur du bâtiment en dernière position (20 %) (voir figure n.11). Les efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique continuent d'attirer l'attention car, en tant que ressource clé pour le

⁸ L'étude s'est basée sur les membres signataire avec l'Agence Internationale de l'Energie.

développement économique et social, cette dernière joue un rôle vital dans le processus de transition énergétique. En effet, elle offre des avantages significatifs pour le climat et les consommateurs d'énergie. Par exemple, les gains liés à l'efficacité énergétique durant la dernière décennie ont permis d'éviter environ 20 % de consommation d'énergie supplémentaire en 2018. Le secteur du bâtiment représente, à lui seul, 38 % de ces économies. (IEA, 2019a).

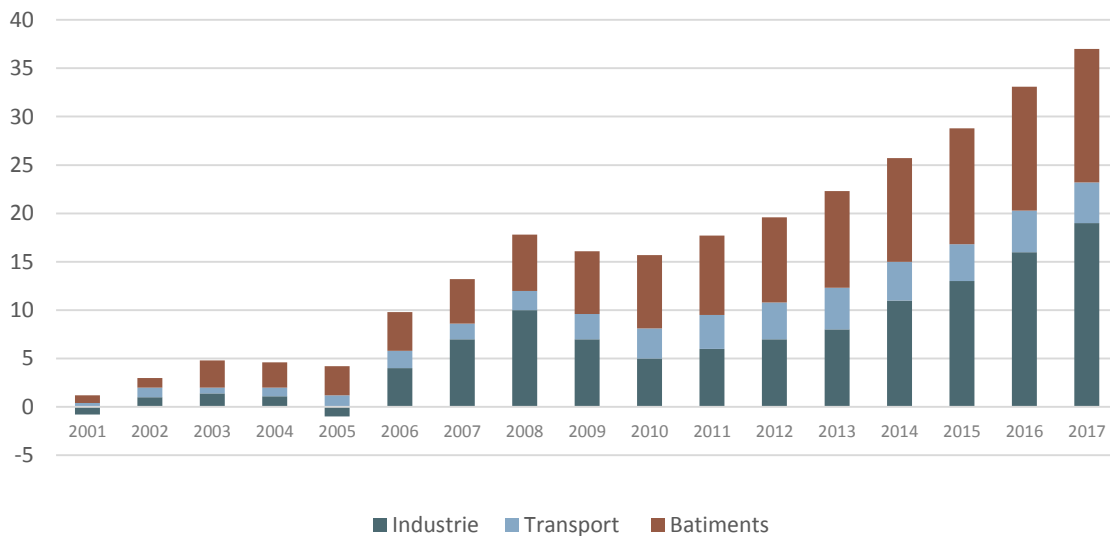


Figure 11. L'utilisation finale de l'énergie par secteur d'activité.

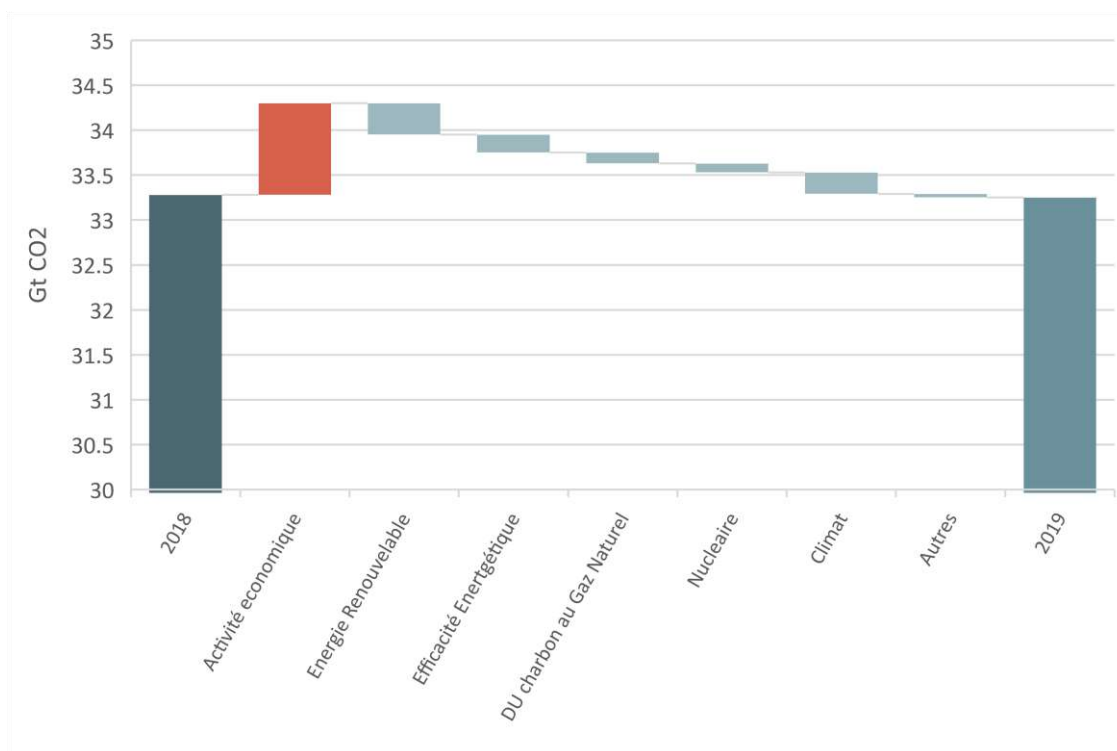
Source: (IEA,2018)

Toutefois, bien que l'efficacité énergétique se soit améliorée dans tous les secteurs au cours de la période 2010-2018, le taux varie selon le secteur, notamment dans le secteur du bâtiment. Malgré les gains significatifs en matière d'économie d'énergie, le rythme de rénovation de bâtiment est resté très long, ce qui constitue un problème important face à l'urgence climatique et la croissance continue de la consommation énergétique. En effet, la demande en énergie des bâtiments a continué d'augmenter sous l'effet d'une économie mondiale robuste et des besoins de chauffage et de refroidissement plus élevés dans certaines parties du monde.

Le paysage énergétique mondial est en train de subir un changement fondamental, entraîné par une croissance rapide de l'utilisation des énergies renouvelables grâce à une baisse spectaculaire des technologies et des coûts des systèmes, en particulier pour le solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne. Parmi les principaux facteurs,

citons la numérisation, l'augmentation des ressources énergétiques décentralisées et l'électrification des secteurs d'utilisation finale (IEA, 2019b). Le secteur de l'électricité est parmi les premiers à se décarbonner. En effet, les systèmes électriques subissent des changements importants, entraînés notamment par le déploiement de ressources énergétiques distribuées, les progrès de la numérisation et les technologies renouvelables (IEA, 2019d).

Tous ces éléments remodelent la façon dont l'énergie est produite, transportée, distribuée et consommée. Selon certaines études, au cours de la prochaine décennie, des réductions de coûts se poursuivront car toutes les technologies de production d'énergie renouvelable actuellement disponibles sur le marché seront compétitives avec les combustibles conventionnels (IRENA, 2018). Ce constat est très important pour les villes et donne une forte impulsion au déploiement des énergies renouvelables. Les villes peuvent ainsi atténuer leurs émissions de CO₂ liées à l'énergie, qui proviennent principalement des bâtiments, des transports et de l'industrie et bénéficieront énormément d'autres impacts positifs sur le PIB et l'emploi.



3. Le rôle des énergies renouvelables : dé-carboniser en répondant à la demande croissante

Comme discuté précédemment, le développement des énergies renouvelables joue un rôle important dans l'accélération de la transition énergétique.

3.1. Une solution clé pour répondre à la demande croissante dans le contexte de changement climatique

Au cours de la période 2013-2018, les énergies renouvelables ont augmenté près de trois fois plus vite que les consommation d'énergie finales, représentant ainsi 29 % de l'augmentation totale de la demande énergétique (Cambini, Congiu, Jamasb, Llorca & Soroush, 2020). Toutefois, cela signifie que les autres sources d'énergie, principalement les combustibles fossiles, dont le taux de croissance annuel est de 1,3 % ont représenté 71 % de l'augmentation totale de la demande d'énergie. Cela met en évidence le défi que les énergies renouvelables ont dû relever pour répondre à une plus grande part de la demande en énergie (IEA, 2021b).

Quel que soit la vitesse avec laquelle la demande globale d'énergie augmente, la consommation d'électricité croît plus vite que la consommation totale d'énergie. En effet, en raison d'une électrification croissante, le secteur de l'électricité se trouve ainsi à l'avant-garde du changement dans le secteur de l'énergie. Cependant, le secteur de l'électricité a pu effectuer des gains grâce à une production d'électricité basée sur les énergies renouvelables. La demande d'électricité se dirige vers sa croissance la plus rapide depuis plus de 10 ans. Durant l'année en cours, elle devrait augmenter de 4,5 %, soit plus de 1 000 TWh. C'est près de cinq fois plus que la baisse de 2020, qui a maintenu la part de l'électricité de la demande finale d'énergie au-dessus de 20 %. Près de 80 % de l'augmentation prévue de la demande en 2021 concerne les marchés émergents et les économies en développement (IEA, 2021b).

En 2020, les énergies renouvelables couvraient près de 45 % de la croissance mondiale de la production d'électricité, représentant ainsi plus de 25 % de la production mondiale puissance de sortie (IEA, 2021b). Les énergies renouvelables constituaient l'unique source qui a affiché une demande en croissance, tirée par une

plus grande capacité installée et une distribution prioritaire. Les sources d'énergie renouvelables ont jusqu'à présent fait preuve de résilience face à la crise de la COVID-19 (IEA, 2020a). La part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement mondial en électricité a atteint près de 28% au premier trimestre 2020, contre 26% au cours de la même période en 2019 (IEA, 2021b). La demande d'électricité a baissé considérablement grâce aux mesures de confinement. La demande d'électricité a diminué de 20 % ou plus pendant les périodes de confinement total dans plusieurs pays, car les hausses de la demande résidentielle sont largement compensées par les réductions des opérations commerciales et industrielles. La réduction de la demande énergétique a permis l'augmentation la part des énergies renouvelables dont l'approvisionnement en électricité a constitué une croissance de près de 7 %, car leur production n'est en grande partie pas affectée par la demande (IEA, 2020b).

Bien qu'il existe différentes possibilités, les énergies renouvelables est considérée le meilleur chemin pour réussir à réduire les émissions à la vitesse requise. Au cours des dix dernières années, l'essor des énergies renouvelables dans le secteur de l'électricité a eu un impact croissant sur les émissions de ce secteur. Les émissions de carbone évitées augmentent, en moyenne, de 10 % chaque année (IEA, 2020a). Malgré le choc de la pandémie, les énergies renouvelables ont accéléré leur expansion en 2020, avec une augmentation de 50 % de leur contribution à la baisse des émissions du secteur électrique par rapport à 2019. Les émissions de CO₂ ont diminué de 3,3 % (ou 450 Mt) en 2020, la plus forte baisse relative et absolue jamais enregistrée (IEA, 2020a).

Alors que la pandémie a réduit la demande d'électricité l'année dernière, l'accélération de l'expansion de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables a été le principal contributeur à la baisse des émissions du secteur. A l'échelle mondiale, le pourcentage des énergies renouvelables dans la production d'électricité est passée de 27 % en 2019 à 29 % en 2020, ce qui constitue un record en termes d'augmentation annuelle (IEA, 2021b). La production d'électricité renouvelable, quant à elle, devrait augmenter, en 2021, de plus de 8 % afin d'atteindre 8300 TWh. Ainsi, elle représenterait la croissance annuelle la plus rapide

depuis les années 1970 et devrait fournir plus de la moitié de l'augmentation de l'approvisionnement mondial en électricité (IRENA, 2019b). Pour leur part, le solaire photovoltaïque et l'éolien devraient contribuer à deux tiers de la croissance des énergies renouvelables. C'est dire que la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité devrait atteindre près de 30 % en 2021 contre moins de 27 % en 2019, soit la part la plus élevée depuis le début de la révolution industrielle (IEA, 2019c). L'éolien est en passe d'enregistrer la plus forte augmentation de la production d'énergie renouvelable, en croissance de 275 TWh, soit environ 17 %, à partir de 2020. La production d'électricité solaire photovoltaïque devrait augmenter de 145 TWh, soit près de 18 %, et approcher les 1 000 TWh en 2021 (REN 21, 2021).

L'importance croissante des énergies renouvelables constitue l'un des moteurs les plus importants de la transformation du système électrique à l'échelle mondiale. Leurs propriétés interagissent avec le système électrique au sens large, donnant lieu à un certain nombre de défis d'intégration de système pertinents.

3.2. Une opportunité pour créer des systèmes énergétiques urbains intégrés et intelligents

Les villes peuvent accélérer l'adoption des énergies renouvelables dans trois domaines prioritaires :

- L'énergie renouvelable dans les bâtiments ;
- Les options durables dans les transports ;
- Les systèmes énergétiques urbains intégrés et intelligents.

Les bâtiments et les transports sont les deux plus gros consommateurs d'énergie dans les villes, et ce qui se passe dans ces secteurs déterminera la durabilité de l'utilisation de l'énergie. Les autorités publiques peuvent ainsi jouer un rôle central en mettant en œuvre des politiques de soutien, en faisant la démonstration de technologies innovantes et en fournissant les infrastructures adéquates pour ces secteurs. L'offre et la demande d'énergie étant de plus en plus interconnectées, la planification systémique et intégrée, à long terme, des systèmes énergétiques urbains gagne de plus en plus de l'importance (IRENA, 2016).

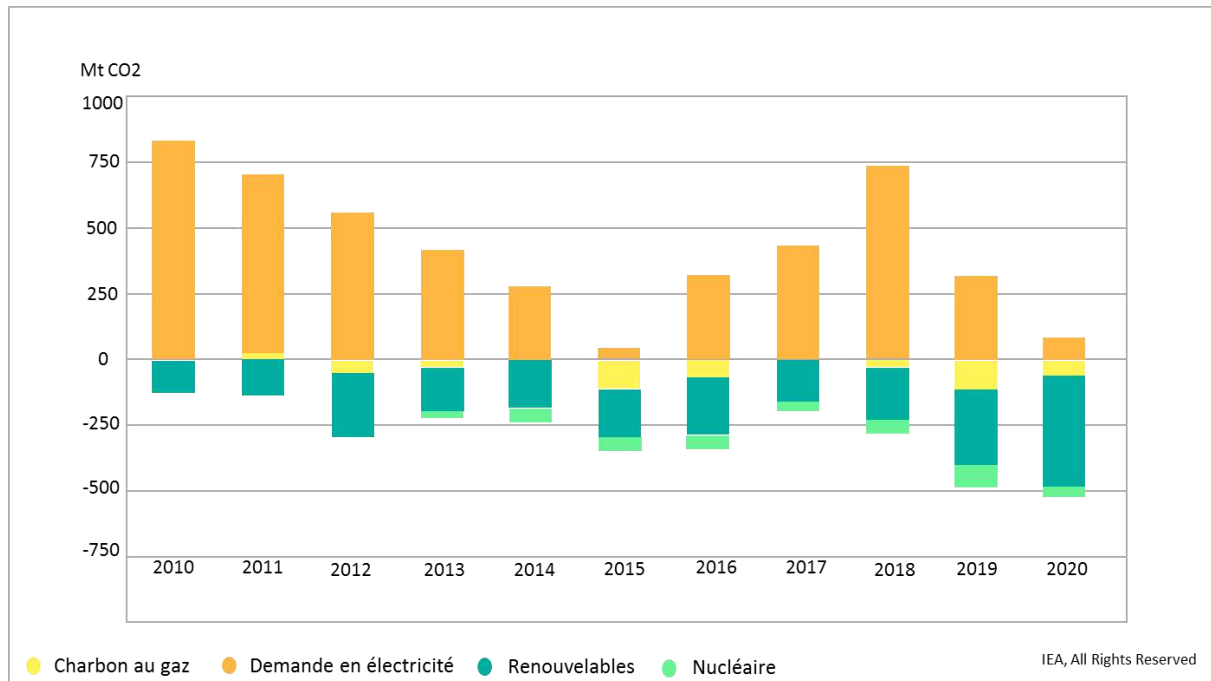


Figure 13. La variation entre les CO2 émissions provenant des énergies renouvelables par rapports aux autres secteurs d'électricité .

(Source IEA2021)

La majeure partie de la consommation d'énergie d'une ville a lieu dans ses bâtiments résidentiels, commerciaux et publics, particulièrement pour le chauffage, la climatisation et l'alimentation des appareils. Les villes peuvent utiliser un large éventail de sources renouvelables pour fournir de l'énergie à consommer dans les bâtiments et répondre aux besoins énergétiques des bâtiments commerciaux et résidentiels (CLER, 2016). Les options vont de la production décentralisée d'énergie renouvelable, qui fournit de l'énergie à proximité directe des bâtiments, à la production centralisée d'énergie renouvelable, dans laquelle l'énergie est produite ailleurs puis distribuée aux bâtiments via des réseaux énergétiques. Ça comprend les capteurs solaires thermiques, les panneaux solaires PV, les chaudières à biomasse et les fourneaux modernes utilisant la bioénergie (principalement dans les pays dits en voie de développement).

Comme on le verra ultérieurement dans le deuxième chapitre de cette thèse, les pouvoirs publics peuvent ainsi dire promouvoir la production d'énergie renouvelable dans les bâtiments par le biais d'une série de politiques et de réglementations, tels

que les codes de construction, les permis, les règlements de zonage et les évaluations de performance des bâtiments (WWI, 2016). Parmi plusieurs exemples spécifiques, il y a lieu de citer l'incitation à l'installation de panneaux solaires photovoltaïques sur les toits et le chauffage solaire de l'eau (*Solar Water Heater*, SWH).

Il existe plus de 600 codes et normes de construction dans le monde, dont l'étendue et la rigueur d'application varient considérablement (WWI, 2016). Les normes de construction fournissent des directives techniques et des exigences minimales pour la performance d'un bâtiment. La plupart des codes sont juridiquement contraignants, bien que leur application ait tendance à être tardive (AIE, 2013), tandis que certains codes existent purement en tant que systèmes de certification verte volontaires (Heinsdorf, 2015 ; C40 et ARUP, 2015).

Historiquement, les villes ont joué un rôle important dans la promotion de l'utilisation des systèmes d'énergie solaire thermique et photovoltaïques, en particulier pour le chauffage de l'eau. De grandes quantités de chaleur sont perdues chaque année à cause de la production d'électricité et des processus industriels. La cogénération est l'un des moyens les plus efficaces de réutiliser cette chaleur, mais elle représente moins de 10 % de la production mondiale d'électricité, et son utilisation est en baisse (AIE, 2016). Les réseaux de chauffage et de refroidissement urbains sont un autre moyen de fournir une énergie plus rentable (PNUE, 2015a ; OCDE, 2013). Les systèmes énergétiques de quartier sont constitués d'un réseau de tuyaux souterrains et isolés qui pompent de l'eau chaude ou froide vers plusieurs bâtiments dans un district, un quartier ou une ville. Certains systèmes ne relient que quelques bâtiments, tandis que d'autres relient des milliers de bâtiments et de foyers à travers une ville.

Cependant, malgré ses avantages, l'utilisation de l'énergie de quartier est assez limitée, ne représentant qu'un dixième de la demande de chaleur dans les secteurs commercial et résidentiel (AIE, 2016). Cela crée d'importantes possibilités d'accroître encore l'utilisation des énergies renouvelables pour produire de la chaleur afin de la distribuer, par la suite, par le biais de systèmes de chauffage urbain. Le potentiel varie, cependant, d'une ville à l'autre, non seulement en raison de la

différence de disponibilité des ressources renouvelables, mais aussi parce que, généralement, un niveau minimum de densité de chauffage est requis pour que le chauffage et le refroidissement urbain soit viable.

La prospérité des pays à contexte climatique chaud s'accompagne d'une augmentation rapide de leur demande de refroidissement. La quasi-totalité du refroidissement est actuellement assurée par des systèmes de climatisation utilisant l'électricité. Si une plus grande partie de cette électricité peut être produite par des énergies renouvelables, le refroidissement peut également être assuré par des options renouvelables intégrées à l'infrastructure du bâtiment. Cela inclut les systèmes de refroidissement solaire, tels que les refroidisseurs à absorption ou à adsorption et les systèmes de refroidissement par dessiccation ou déshydratation. Les refroidisseurs à absorption utilisent un réfrigérant pour refroidir l'environnement et représentent plus de 70 % des systèmes installés aujourd'hui (IRENA et IEA-ETSAP, 2015).

Certains ménages connectent leur système de climatisation à un panneau solaire monté sur le toit. Cette solution est de plus en plus populaire dans les villes, notamment en raison de la baisse du prix des batteries de stockage. Le marché mondial de la climatisation à base d'énergie renouvelable n'en est toutefois qu'à ses débuts et les villes pourraient faire davantage pour en promouvoir l'adoption. Le refroidissement urbain à partir d'énergies renouvelables est également une option, qui utilise l'eau froide des rivières, des lacs ou de la mer, la chaleur résiduelle des refroidisseurs à absorption et l'énergie solaire (IRENA, 2016b). Aujourd'hui, les énergies renouvelables représentent 5 % de la production mondiale d'électricité. Les données statistiques montrent que, d'ici 2030, ce chiffre atteindra 20 % avec REmap, et de nombreux pays, notamment en Europe, verront les EnR dépasser un tiers (IRENA, 2016b). Avec ces parts croissantes, il est nécessaire de synchroniser l'offre et la demande, car la production de ces ressources ne peut pas être entièrement déterminée à l'avance. Afin d'équilibrer l'offre et la demande, les réseaux doivent, dès lors, devenir plus intelligents et plus flexibles.

La production d'énergie étant répartie dans l'industrie, et les bâtiments et le stockage de l'énergie étant de plus en plus répandus dans tous les secteurs, la gestion de la

demande devient un domaine d'intérêt majeur. Dans ce contexte, Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont de plus en plus essentielles pour synchroniser l'offre et la demande.

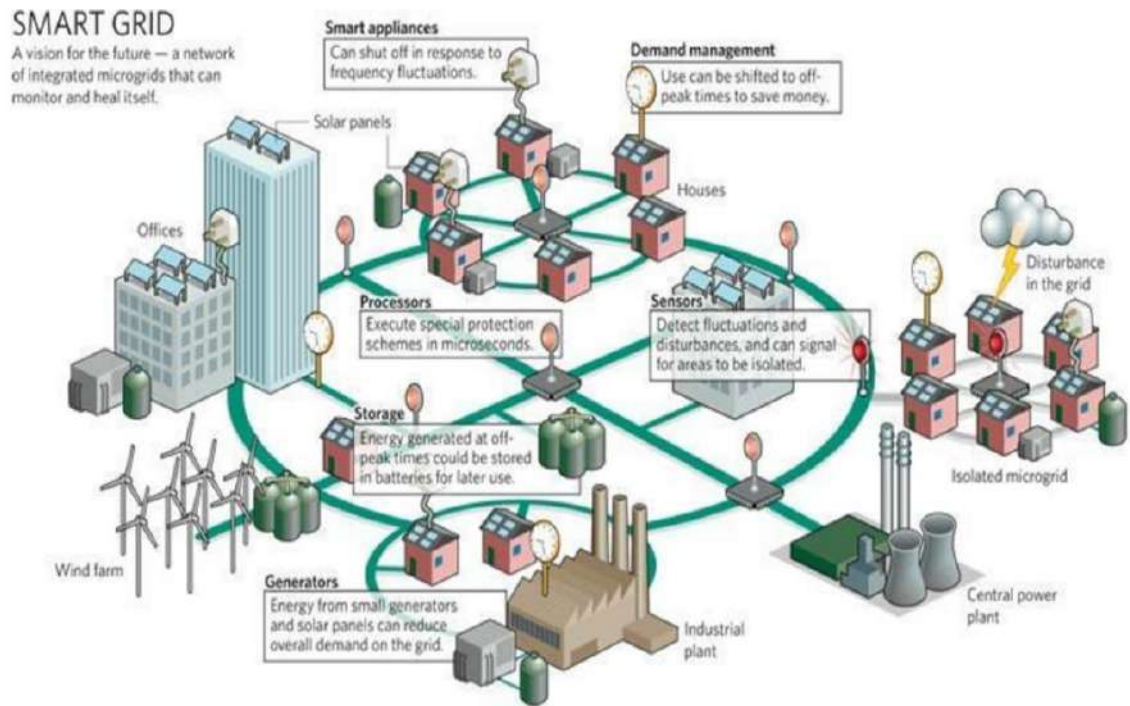


Figure 14. Schema d'un Système énergétique intégrée l'échelle de la ville.
Source : (Jerome.B et al ;2016)

3.3. Quelle technologie des énergies renouvelables en milieu urbains ? :

L'intégration des technologies d'énergie renouvelable dans les villes est confrontée à divers défis, notamment sur le plan législatif politiques, réglementaires, de financement, de capacité humaine, de maintenance et des obstacles d'ordre esthétique, conceptuel et urbanistique. Plusieurs mesures politiques ont été prises dans certains pays afin de relever ces défis, comme le montre une série d'études de cas compilés dans le rapport « *Scaling up des énergies renouvelables dans les villes : Opportunities for municipal municipales* », publié par IRENA en collaboration avec ICLEI et l'Agence Allemande pour la Coopération Internationale, GIZ (IRENA et al., 2018). Dans une certaine mesure, ces obstacles résultent également d'une méconnaissance des possibilités et des avantages liés à l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables disponibles localement, comme le renforcement de la

sécurité énergétique et la création d'emplois locaux. Ils résultent aussi de l'ignorance des applications des énergies renouvelables dans les villes, et, dans certains cas, d'un manque d'acceptation par le public des centrales électriques dans les villes ou à proximité. Pourtant les connaissances essentielles sur ces aspects ont été documentées et rendues accessibles au public dans plusieurs pays du monde.

Avant de les énumérer, il y a lieu de signaler que la capacité mondiale de l'énergie solaire photovoltaïque installée a augmenté rapidement au cours de la dernière décennie, passant d'environ 40 GW en 2010 à 580 GW en 2019 (IRENA, 2020c). La plupart desdites installations sont des centrales solaires à l'échelle industrielle, bien que dans certains pays, comme l'Allemagne, des systèmes solaires photovoltaïques distribués à plus petite échelle ont été installés dans et autour des villes. Dans les villes, les systèmes photovoltaïques sont généralement installés sur, ou intégrés aux toits et aux façades des bâtiments. Ces systèmes sont généralement de plus petite taille que les systèmes au sol situés à la périphérie des villes. La taille médiane des systèmes photovoltaïques résidentiels installés en 2018 était d'environ 6,4 kilowatts (kW), ce qui était 8 % plus grande qu'en 2014, principalement en raison de la baisse des coûts (Assouline, Mohajeri & Scartezzini, 2018).

Pour revenir aux avantages des systèmes résidentiels, le principal atout est probablement technique puisqu'il est lié à leur proximité avec la charge, ce qui permet d'éviter les pertes d'énergie et les frais de transport associés à la transmission sur de longues distances . Cependant, les villes reconnaissent de plus en plus les nombreux autres avantages sociaux et environnementaux que ces systèmes apportent, notamment ceux liés à une plus grande résilience aux événements climatiques extrêmes et aux impacts du changement climatique comme le note l'IEA dans son rapport publié en 2019 (IEA, 2019d).

Malgré les nombreux avantages que les systèmes photovoltaïques apportent aux villes, il existe d'autres défis qui se révèlent uniques qu'il y a lieu de relever pour développer les applications photovoltaïques. Le premier est sans aucun doute celui de la contrainte foncière. Dans la plupart des cas, soit les villes ne disposent pas des terrains disponibles adaptés pour des centrales photovoltaïques au sol en raison

d'utilisations concurrentes, telles que l'agriculture ou les réserves écologiques, ou bien le coût de l'installation dans des zones urbaines est élevé. C'est pourquoi l'intégration de systèmes photovoltaïques dans des bâtiments urbains existants ou prévus ou dans d'autres infrastructures existantes ou planifiées restera la pratique privilégiée. Pourtant, une solution s'est esquissée puisqu'il existe des exemples de centrales solaires avec des installations de PV solaires photovoltaïques qui sont installées à la périphérie des villes. Ces dernières ont été introduites dans le cadre de mesures visant à réaliser des engagements politiques, par exemple en coopération avec des communautés rurales (Energy Cities, 2018). Deuxièmement, la plupart des villes sont préoccupées par l'impact de l'intégration des sources renouvelables, telles que le photovoltaïque sur le fonctionnement du réseau, car cela peut poser des problèmes aux opérateurs dans la gestion du système électrique urbain et peut perturber la stabilité du réseau. Lorsque la part du solaire PV augmente jusqu'à un certain niveau pour un système de distribution d'électricité donné, l'impact sur la stabilité du réseau se fait sentir. Cependant, il demeure possible d'utiliser des outils de simulation informatique afin d'examiner les incohérences (Schiefelbein et al., 2019). Les résultats peuvent permettre de mieux comprendre les implications des différents scénarios d'installation photovoltaïque pour les réseaux, et des mesures disponibles pour les adversités en améliorant l'efficacité du réseau adversités en améliorant la flexibilité du réseau.

En outre, des projets pilotes sont disponibles dans le monde entier, montrant que les solutions qui combinent des innovations dans diverses dimensions peuvent contribuer à intégrer les ressources distribuées au réseau. Par exemple, des centrales solaires photovoltaïques agrégées couplées à des batteries pourraient aider les opérateurs de système en fournissant des services pour équilibrer le système, pour autant que les technologies habilitantes et les cadres de soutien nécessaires sont en place (Whitaker, Townsend, Razon, Hudson & Vallvé, 2011).

Troisièmement, les responsables politiques et les décideurs locaux doivent mieux comprendre les implications économiques des systèmes solaires photovoltaïques pour les fournisseurs d'électricité locaux et services publics locaux. Des modèles commerciaux innovants doivent être créés dans le but de réconcilier les intérêts des

opérateurs historiques avec ceux des acteurs émergents. Ces nouveaux venus comprennent les promoteurs qui non seulement consomment, mais aussi produisent l'électricité, soit pour l'autoconsommation, soit pour la revendre au réseau d'électricité, ou encore pour l'autoconsommation ou bien pour la revente au réseau. Ainsi, les nouveaux acteurs du système électrique participent aux activités du marché afin de maximiser le rendement économique de l'investissement dans les installations de production d'énergie distribuée (IRENA,2019a ; IRENA, 2017).

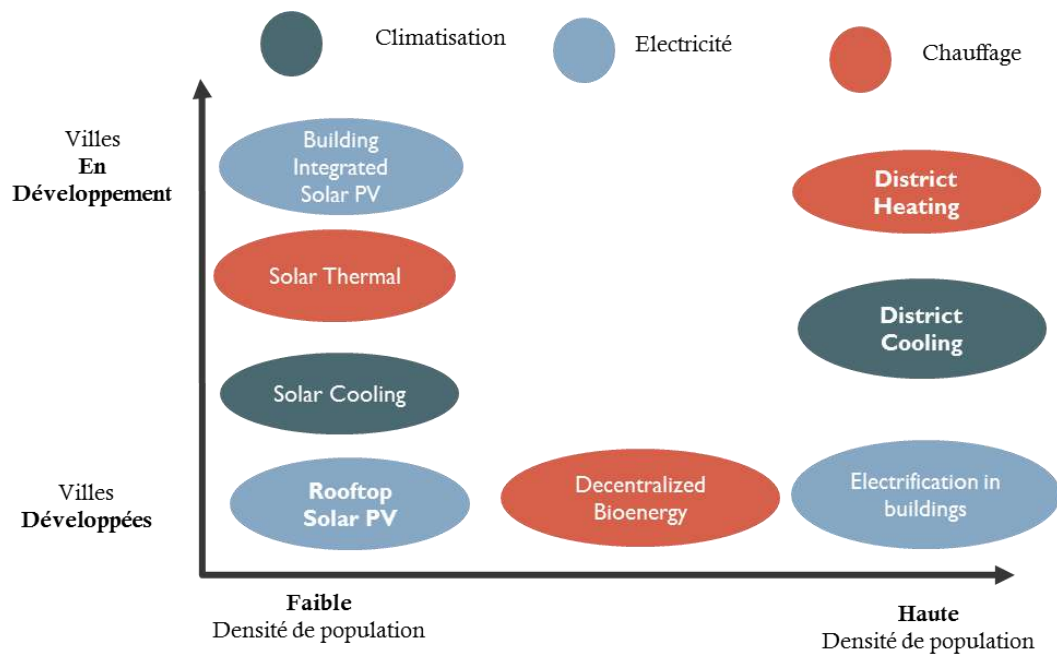


Figure 15. Les options technologiques selon le type et les besoins des villes .

(Source : IRENA, 2018)

Conclusion

Les villes concentrent désormais les échanges et la consommation d'énergie. Elles constituent à la fois une cible et un moteur de développement de la transition énergétique. Ainsi, il est primordial que la problématique de l'énergie en ville ne soit pas réduite à la question de la maîtrise de la consommation, mais au contraire de répondre à la demande croissante en matière d'énergies renouvelables.

Ce chapitre a examiné les circonstances clés, moteurs et motivations qui déterminent la manière dont les villes peuvent agir pour promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables en milieu urbain. Il offre également un aperçu des différentes initiatives et des mesures prises pour atteindre les objectifs de transition énergétique, en s'appuyant sur des données statistiques mondiales. Ainsi, il a permis de mettre en lumière plusieurs points.

D'abord, l'échelle d'intervention la plus appropriée pour soutenir le développement des énergies renouvelables est celle de la commune voire de la ville. En effet, comme nous le verrons dans le détail dans le prochain chapitre, les pouvoirs publics au niveau des villes disposent d'un large éventail de technologies parmi lesquelles choisir afin d'adopter une approche plus intégrée d'une multiplicité d'activités et de services. De plus, pour se développer rapidement et substantiellement, la plupart des villes tendent à intégrer davantage les énergies renouvelables, particulièrement, dans les secteurs du bâtiment et celui des transports.

Dans le secteur qui nous concerne, c'est-à-dire celui du bâtiment, l'énergie solaire photovoltaïque sur les toits se présente comme la technologie la plus facile à installer puisque c'est celle qui, parmi les autres technologies électivement efficaces pouvant être facilement intégrées dans les bâtiments neufs et existants, offre des gains économiques significatifs.

Cependant, comment procéder de manière effective et efficiente à l'évaluation du potentiel solaire ? La réponse à cette question constitue précisément l'objet du deuxième chapitre. En effet, dans le chapitre suivant, nous analysons l'ensemble du

processus de planification des énergies renouvelables, tout particulièrement l'étape relative à l'évaluation du potentiel solaire.

Politiques, potentiel et outils d'évaluation de l'énergie solaire.

Introduction

Poussées par la volonté d'intégrer les énergies renouvelables des villes, de nombreuses études cherchent à identifier les points sur lesquels il est intéressant d'agir. Le solaire, particulièrement, grâce à la réduction des coûts de la technologie et la facilité de son installation, a suscité beaucoup d'attention.

L'objectif de ce chapitre vise à présenter le contexte de recherche et discuter l'état de l'art. Il consiste à mettre en évidence les politiques et les principaux leviers d'actions soutenus par la communauté scientifique afin de soutenir les décisions politiques en matière d'énergie solaire dans l'urbain existant afin de mieux organiser toute planification urbaine future. L'accent est mis sur les approches, les méthodes et les outils d'évaluation qui donnent des informations visuelles et des techniques liées directement aux aspects solaires dans la planification spatiale de la ville.

1. La planification de l'énergie solaire

Depuis l'apparition de l'urbanisme en tant que discipline scientifique,⁹ l'accès au soleil s'est introduit en architecture et en urbanisme comme une question cruciale corrélée avec les besoins de santé, notamment suite aux maladies épidémiques successives qui se sont produites en Europe durant le 19^{ème} siècle jusqu'au début du 20^{ème} siècle. L'un des courants les plus emblématiques de cette approche est sans aucun doute celui qui a été mené par le groupe dit des hygiénistes¹⁰.

⁹ Attribué à Idelfonso Cerda, l'auteur du plan d'extension de Barcelone (1859) examine les réseaux et les services urbains.

¹⁰ Le mouvement hygiéniste en architecture est apparu au début du 20^{ème} siècle. Basé sur l'investigation de solutions architecturales à partir des données en provenance du domaine de la santé.

Les recommandations proclamées par ces derniers portent sur les formes urbaines permettant l'accès du soleil en toute saison. Par exemple, dans l'ouvrage « La Science des plans de villes », Rey Agustin a instauré la théorie héliothermique qui se base sur une valeur produite à partir de la durée d'ensoleillement en un point donné par la température moyenne de l'air pendant cette durée. L'objectif vise à parvenir à l'optimisation solaire du tracé urbain indiquant l'orientation optimale des bâtiments et des voies ainsi que d'autres exigences rationnelles des éléments urbains (Febvre, 1929).

Dès lors, la planification en fonction des incidences solaires sur l'environnement urbain est devenue un élément essentiel soutenu par la réglementation. Dans une étude récente sur les perspectives de l'énergie solaire dans la planification urbaine, une collection de cas internationaux a démontré comment la réglementation en combinaison avec des incitations financières peut ouvrir la voie à la mise en œuvre de l'énergie solaire. Par ailleurs, les projets de recherche ont contribué également, à travers un processus interdisciplinaires, à parvenir à une amélioration de l'efficacité énergétique et de la production d'énergie (Lobaccaro et al., 2019).

Une variété d'approches et de méthodes ont été utilisées afin de planifier un équilibre entre les besoins énergétiques et l'utilisation de ressources renouvelables. L'agence internationale pour les énergies renouvelables souligne que les mesures de déploiement des énergies renouvelables globalement, et du solaire particulièrement sont souvent élaborées dans le cadres des politiques nationales. Cependant, l'utilisation finale comme dans le secteur du bâtiment doivent être prises au niveau local (IRENA 2016, 2017b ; IRENA 2018). En effet, les villes peuvent jouer un rôle primordial à travers des mesures et des initiatives qui complètent la politique à un niveau national.

Dans ce sens, l'orientation vers des actions à l'échelle locale est nécessaire pour cerner des solutions d'intégration convenable à leurs circonstances et leurs besoins particuliers afin de les intégrer par la suite dans le processus de planification.

L'élaboration des politiques énergétiques est un processus complexe qui requiert l'implication diverses parties prenantes : de la communauté locale au secteur privé.

Par conséquent, son développement ne nécessite pas seulement la formulation de plans, mais aussi les ressources et les capacités institutionnelles nécessaires à sa mise en œuvre (C40 Cities, 2018). Une bonne mise en œuvre demande l'élaboration d'une vision, une cohérence politique et une coordination pragmatique entre les différents niveaux et strates de la gouvernance à l'échelle municipale.

Les villes ont de multiples rôles et responsabilités comme des acteurs importants dans plusieurs dimensions. Elles peuvent agir en tant que planificateur, régulateur, propriétaire d'infrastructure municipale, acheteurs et distributeur d'énergie, agrégateur de la demande et financeurs de projets d'énergie renouvelables (IRENA, 2016). Dans un rapport intitulé « *Planning for Solar Energy* », il a été identifié cinq points stratégiques d'intervention qui peuvent être utilisés dans le processus de planification pour soutenir l'énergie solaire (Morley & Ross, 2014) :

- 1- Fixer une vision et des objectifs ;
- 2- La définition des besoins et des capacités par des plans du potentiel, c'est-à-dire la préparation des documents de planification mentionnant et soutenant l'énergie solaire ;
- 3- Les réglementations et les incitations, y compris toutes les activités réglementaires de soutien, comme par exemple les réglementations sur l'accès à l'énergie solaire ;
- 4- Le soutien aux développeurs de projets solaire, y compris l'aide à l'obtention de permis, ainsi que les partenariats public-privé dans ce domaine ;
- 5- Les investissements publics.

Nous nous concentrerons ici sur les trois premiers points concernant les objectifs en matière d'énergie solaire, l'élaboration des outils réglementaires qui sont impliqués dans la pratique de la planification. Il s'agit des principales actions qui sont soutenues par les méthodes d'évaluation conformément aux objectifs de la présente thèse. D'autres outils réglementaires non spécifiques à la planification, tels que les incitations financières, ne seront pas discutés car ils sont en dehors de l'objet de notre recherche.

1.1. Fixer des objectifs

En raison du large éventail de types d'objectifs, il peut être difficile de définir exactement ce qui constitue un objectif en matière d'énergies renouvelables. Il existe seulement quelques études qui traitent en profondeur ces objectifs, parce qu'elles sont pour la plupart des cas spécifiques à une juridiction ou à une politique nationale. Le Worldwide Status Report (GSR) de REN21, publié en 2014, renvoie à l'une des tentatives approfondies de rassembler et de publier des données sur la croissance mondiale des objectifs en matière d'énergies renouvelables. Le GSR qualifie ces objectifs comme *" Un engagement, un plan ou un objectif officiel établi par un gouvernement (au niveau municipal, étatique, national ou régional) pour atteindre une quantité spécifique d'énergie renouvelable à une date future ", selon le GSR 2014. Certains objectifs sont établis par la loi, tandis que d'autres sont déterminés par des organismes de réglementation ou des ministères.*" (REN 21, 2014)

Généralement, les objectifs en matière d'énergies renouvelables font partie des stratégies nationales de développement exprimées dans des plans quinquennaux ou simplement intégrés dans des plans sectoriels, tels que les plans de ressources intégrées ou les plans directeurs du secteur de l'énergie, ou les plans d'actions nationaux pour les énergies renouvelables. Ils peuvent également prendre la forme d'obligations juridiquement accompagné de procédures de conformité spécifiques et de critères explicites et quantifiables (Kieffer.Gh, 2015).

Selon leur degré de spécificité, ils sont représentés sur un spectre afin de voir où ils se situent les uns par rapport aux autres (Voir figure 16) . L'objectif de ce spectre est d'expliquer plus correctement les nombreuses formes et réalités que la simple expression "objectif en matière d'énergies renouvelables" peut revêtir, allant des déclarations d'aspiration aux stratégies énergétiques et aux plans d'actions, en passant par des objectifs pleinement articulés, accompagnés d'instruments politiques clairs et quantifiables et soutenus par des obligations juridiquement contraignantes (Kieffer.Gh, 2015).

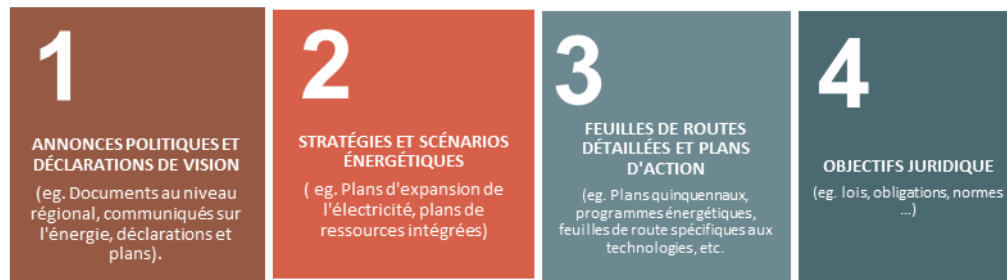


Figure 16. Spectre des objectifs des énergies renouvelables.
Source(Kieffer.Gh, 2015).

Les objectifs en matière d'énergies renouvelables sont souvent inclus dans des objectifs climatiques plus larges à l'échelle nationale. Or, au fur et à mesure de leur expansion, les pays se focalisent de plus en plus sur la consommation finale d'énergie au lieu de la consommation primaire pour formuler des objectifs globaux qui couvrent l'ensemble du mix énergétique (IRENA, 2019a). La municipalité, étant l'institution concerné par l'approvisionnement énergétique adéquat, instaure des objectifs spécifiques à appliquer aux opérations municipales ou à la consommation d'énergie de l'ensemble de la ville. Les objectifs seront donc plus adaptés à la consommation des villes et exprimés en proportion des CEF, car ils se concentrent sur la consommation réelle d'énergie plutôt que l'énergie primaire (IRENA, 2019a).

Ainsi, les objectifs sont de plus en plus diversifiés, tant en termes de sources d'énergie/technologies qu'ils couvrent que de la complexité avec laquelle ils sont conçus et appliqués. Ils peuvent être appliqués aux secteurs de l'électricité, du chauffage et refroidissement ou du transport ou l'ensemble du secteur énergétique. Cette tendance indique que les décideurs politiques utilisent de plus en plus les objectifs en matière d'énergies renouvelables pour entraîner des changements structurels dans l'ensemble du mix énergétique, plutôt que dans un seul secteur ,par exemple, l'électricité ou le transport (Kieffer.Gh, 2015).

En effet, les objectifs dans les secteurs du chauffage/refroidissement et des transports ont connu une croissance importante au cours de la dernière décennie. Un nombre croissant de villes ont commencé à dépasser la stratégie sectorielle axée principalement sur l'électricité pour appliquer leurs objectifs à l'ensemble du mix

énergétique. Pour ce qui concerne le secteur du chauffage/refroidissement, l'objectif a augmenté de façon spectaculaire, passant de deux en 2005 à 47 à la mi-2015 (IRENA, 2019a).

Tout au long du processus de planification, fixer des objectifs peut servir à diverses fins. Ils jouent un rôle essentiel d'orientation et communiquent l'engagement politique ce qui peut inciter les parties prenantes à agir tout au long de la phase de mise en œuvre des politiques. Ils donnent aux citoyens, aux entreprises et aux investisseurs une vision claire et stratégique sur long terme quant aux intentions et aux priorités de la ville pour mobiliser les parties les financements en fonction du besoin (Kieffer.Gh, 2015). En outre, ils peuvent jouer un rôle important dans l'aménagement de la ville, en influençant la planification urbaine par des considérations liées aux choix de la technologie et le type d'infrastructure à construire, la distribution, ainsi que la quantité d'énergies à produire sur le long terme. En fournissent une référence de mesure, Les objectifs peuvent aider les collectivités à évaluer l'efficacité de diverses initiatives de manière tangible tout au long de la phase de suivi et d'évaluation, ainsi que donner une chance de révision, d'adaptation et de développement continu (Morley & Ross, 2014).

Dans cette perspective, le seul problème réside dans l'absence de données sur l'utilisation et la production d'énergie en milieu urbain, notamment à l'échelle de la ville. C'est pourquoi, de nombreuses villes s'engagent à évaluer leurs données de base et leur potentiel pour élaborer une stratégie globale en matière d'énergies renouvelables et de dé-carbonisation. Par exemple, les autorités municipales de Sydney en Australie ont créé un nombre de scénarios basés sur les besoins de la ville en matière d'électricité, de chauffage et de refroidissement, en incluant les cartes complètes des principaux quartiers, des types de bâtiments et de la consommation d'énergie. Ces données sont par la suite mise en relation avec les potentiels locaux d'énergie renouvelable, notamment les installations de traitement des déchets et des eaux usées (Sydney, 2013).

En pratique, et pour résumer les explications précédentes, les objectifs en matière d'énergies renouvelables à l'échelle locale varient en fonction de :

- **La portée** : basé sur une activité spécifique par exemple, ou englobe d'autres tel que le transport public, les bâtiments ou les services publics municipaux. En revanche, il faut mentionner que les objectifs à une large échelle exigent éventuellement une action de la part d'un plus grand nombre de parties prenantes sont plus difficiles à atteindre.
- **Le secteur** : les objectifs sont sectoriels dans les secteurs de l'électricité, le chauffage et la climatisation, ou les transports. Bien que les objectifs axés sur le secteur de l'électricité soient les plus répandus, un nombre croissant de juridictions ont adopté des objectifs dans d'autres secteurs. Les villes sont moins nombreuses à avoir adopté des objectifs portant sur l'ensemble de la consommation d'énergie de la ville.
- **Consommation d'énergie renouvelable** : Généralement, ces objectifs sont présentés en pourcentage (%) de la consommation d'énergie et/ou d'électricité des de la ville.
- **Production d'énergie renouvelable** : Les objectifs peuvent être conçus pour augmenter la capacité d'électricité renouvelable d'une ville (en MW) ou sa production totale d'énergie renouvelable (en MWh). Ceci peut référer à une part de la demande énergétique ou un montant fixés en pourcentage (%) de la consommation finale d'énergie/électricité ou en tant que quantité fixe fournie (souvent en GWh). Comme ça peut indiquer une technologie spécifique ou technologie neutre, par exemple, 500 MW d'énergie solaire photovoltaïque d'ici 2025, ou neutres sur le plan technologique (500 MW de capacité d'électricité renouvelable d'ici 2020).
- **Contraignants ou ambitieux** : Les objectifs diffère en fonction de leur caractère. Par exemple, aux États-Unis et au Canada, des pénalités s'appliquent en cas de non-respect des objectifs renouvelables et prévoient des sanctions financières importantes. Mais de manière générale, la plupart des objectifs adoptés par les villes sont de nature aspirationnelle et ne sont pas sujette à des amendes ou d'autre sanctions. Lorsque les objectifs ne sont pas soutenus par une législation

ou d'autres règlements contraignants, ils peuvent plus facilement être annulés ou dilués par les maires ou les conseils municipaux suivants.

- **Simplicité ou échelonnement** : les objectifs généraux sont décomposés souvent en objectifs intermédiaires, à plus court terme, afin de faciliter le suivi (par exemple, 50 % d'ici à 2025, 70 % d'ici à 2030, 95 % d'ici 2035). En revanche, les objectifs simples (par exemple, 80 % d'électricité renouvelable d'ici 2050) peuvent être plus difficiles à atteindre, car les collectivités locales ne sont pas forcément tenues de rendre compte des progrès réalisés aussi fréquemment (IRENA, 2019b).
- **Génériques ou spécifiques** : Plutôt que d'adopter des objectifs génériques qui ne spécifient pas la manière dont les objectifs seront atteints (par exemple, 75 % d'électricité renouvelable d'ici à 2030). Pour atteindre ses objectifs, il est préférable de détailler les mesures à adopter. La contribution de chaque mesure peut être quantifiée et intégrée à la stratégie de la ville. En ciblant des actions spécifiques, ils peuvent mieux identifier les responsabilités locales pour les réaliser. Il faut mentionner que ces objectifs peuvent évoluer au fil du temps, en les étendant à d'autres secteurs et en augmentant leur niveau d'ambition.

Revenons à l'exemple de Sydney, après avoir adopté en 2016 un objectif de 50 % d'électricité en énergie renouvelable jusqu'à 2030, la ville a doublé cet objectif et l'a avancé d'une décennie, en s'engageant en 2019 à satisfaire 100 % de ses besoins en électricité à partir de sources renouvelables à partir de janvier 2020 (City of Sydney, 2017). Cet objectif a été effectivement atteint tel qu'initialement planifié.

Dans le monde entier, un nombre important de municipalités a adopté des objectifs en matière d'énergies renouvelables. Bien que les données mondiales sur les objectifs énergétiques et climatiques spécifiques à chaque ville ne soient pas accessibles, plusieurs engagements clés peuvent être mis en évidence. Dans un rapport collaboratif produit par REN21, ISEP et ICLEI-Local, un consensus a été établi entre près de 10 000 villes engagées à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre par le biais du Pacte Mondial des Maires pour le Climat et l'Énergie.

Dans le cadre de leur engagement, plus de 6 300 villes avaient soumis des plans d'action municipaux et 5 000 spécifiaient la production et l'utilisation d'électricité renouvelable au niveau local (IRENA, 2019a). À la fin de 2018, sur 650 villes déclarant au CDP, 11 plus de 190 avaient adopté des objectifs de consommation d'énergie renouvelable en part des opérations municipales ou de la consommation à l'échelle de la ville, avec des années cibles allant de 2020 à 2050 (CDP, 2018). Par ailleurs, sur les plus de 1 000 villes qui communiquent des informations à l'ICLEI,¹² et qui dispose d'un réseau total de plus de 1 700 villes, plus de 350 d'entre elles avaient adopté des objectifs en matière d'énergie renouvelable à la mi-2019 (Carbon Climate Registry, 2010). C'est dire que le mouvement vers une énergie 100 % renouvelable a réellement gagné une popularité. Au milieu de l'année 2019, plusieurs villes du monde avaient adopté un objectif de 100 % d'énergies renouvelables, que ce soit pour la production d'électricité ou pour les services publics, soit pour les opérations municipales, soit à l'échelle de la ville.

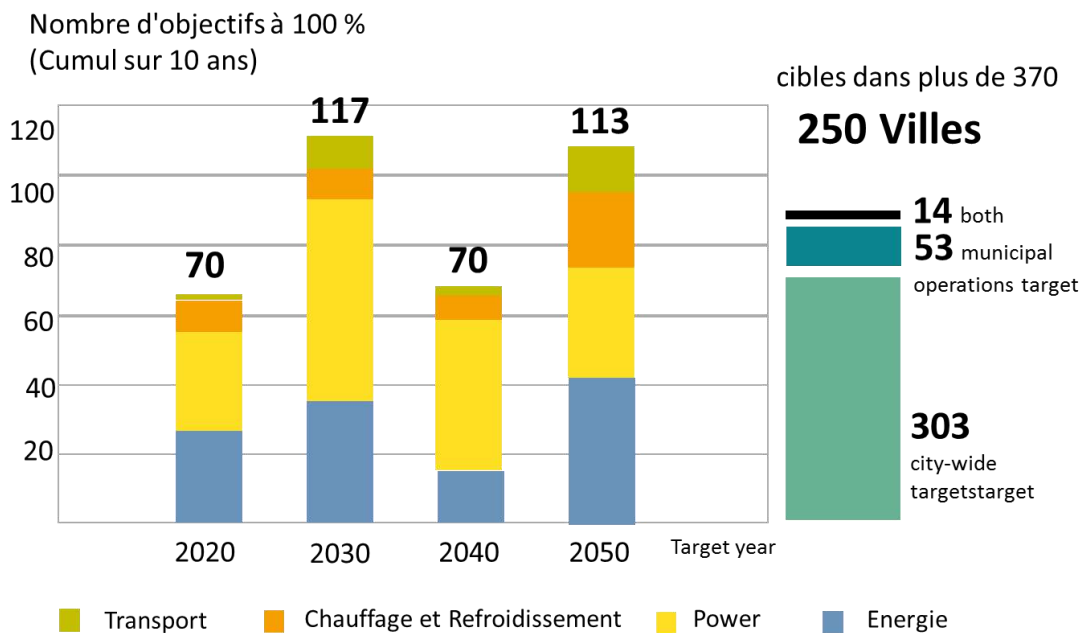


Figure 17. Les objectifs de 100 % énergies renouvelables dans les villes en 2019.
Source : (REN;2020)

¹¹ Nommée Carbon Disclosure Project, il s'agit d'une organisation à but non lucratif dont l'objectif est d'étudier les implications du changement climatique pour les principales sociétés.

1.2. Définir les besoins et renforcer les capacités

Selon les pays, les villes ont le pouvoir d'établir des mesures politiques et réglementaires directement et par elles-mêmes, alors que d'autres ne peuvent agir que sous les ordres des autorités au niveau nationale (REN21, 2018). Les besoins et capacités municipales pour adopter de l'énergie solaire dépend de plusieurs facteurs climatique, structurel et institutionnelle :

- **Zone climatique** : Les options énergétiques des villes sont conditionnées par la zone climatique, qui peut influencer sur les profils énergétiques en terme de climatisation ou chauffage.
- **La tendance démographique** : les villes dont la population augmente sont beaucoup plus confrontés à des défis, notamment dans le cas de présence de l'habitat informel ou de la pauvreté énergétique. Les villes ayant des objectifs en matière d'énergies renouvelables se situent le plus souvent dans une fourchette de population comprise entre 100 000 et 500 000 habitants (EnergyCities, 2018). La majorité des grandes et mégapoles qui ont fixé des objectifs en matière d'énergies renouvelables n'ont poursuivi qu'une part modeste d'énergies renouvelables dans leur mix énergétique.
- **Densité et mixité** : l'Age et les caractéristique et l'état du parc immobilier sont d'une grande importance pour la consommation énergétique.
- **Structure économique et richesse** : Les profils de consommation d'énergie des villes sont fondamentalement dépendant des structures économiques. La demande énergétique dans villes, avec des activités industrielles, ou celles qui fonctionnent comme d'importants nœuds commercial ne sont pas similaire aux villes qui est basé sur le secteur tertiaire (EnergyCities, 2018).
- **Autorité juridique et budgétaire** : Le pouvoir de décision sur les questions qui affectent les zones urbaines varie d'une ville à l'autre, influençant le degré auquel les villes sont en mesure d'exercer un contrôle sur la production d'énergie, qui ne relève pas entièrement des autorités municipales et dépend

des services publics nationaux de l'énergie et les autorités réglementaires nationales (Burke & Stephens, 2018).

- **Capacité institutionnelle et expertise** : La capacité d'action des villes est façonnée et limitée par la mesure de mettre en œuvre de ressources budgétaires et l'accès à l'expertise technique et technique et professionnelle (C40 Cities, 2017).

En fonction de ces facteurs, les villes peuvent jouer un rôle clé dans la promotion du photovoltaïque en toiture dans les espaces urbains. Le solaire photovoltaïque en toiture est une technologie dynamique et de plus en plus rentable (IRENA, 2017b), dont l'adoption peut être stimulée de manière significative grâce à des exigences réglementaires, en particulier les codes du bâtiment ou par des incitations aux propriétaires.

Par ailleurs, le déploiement systématique peut être important, car les bâtiments sont identifiés parmi les plus grands consommateurs d'énergie et contribuent considérablement aux émissions de gaz à effet de serre (PNUE 2018). Pour les villes, encourager le déploiement des applications solaires sur les toits par le biais de mesures réglementaires peut être une politique gagnant-gagnant qui s'intègre bien aux efforts nationaux pour accroître l'efficacité énergétique.

1.3. Politique et instruments réglementaires :

Il est essentiel d'avoir des politiques de soutien qui permettent d'accélérer le rythme de l'énergie solaire, particulièrement au niveau des villes. Les objectifs sont traduits en actions par l'adoption et la mise en œuvre de politiques et de réglementations. Plusieurs facteurs déterminent les options politiques et réglementaires disponibles pour les gouvernements municipaux. Il s'agit notamment de savoir si la ville est propriétaire du service public municipal (électricité, énergie de quartier, de transport en commun ou autre) ou si les clients sont autorisés à raccorder le bâtiment au réseau l'électricité qu'ils produisent sur place au réseau et à exporter le surplus ou alors si des tiers, tels que des sociétés privées de location de matériel solaire, peuvent

posséder ou louer la production sur site des clients, comme les projets photovoltaïques (REN21, 2021).

Il est possible de distinguer plusieurs politiques ciblant l'utilisation de l'énergie à l'échelle de la ville. Dans le but d'encourager l'investissement privé et accroître l'adoption des du solaire à l'échelle de la ville, les administrations municipales font recours à des outils tels que des mandats et des obligations, par exemple, des ordonnances sur le solaire photovoltaïque ou le solaire thermique, ainsi que des mécanismes fiscaux et financiers. La figure indique la répartition et les types de politiques appliqué dans les ville.

1107 Politiques appliquées à 799 Villes dans le monde

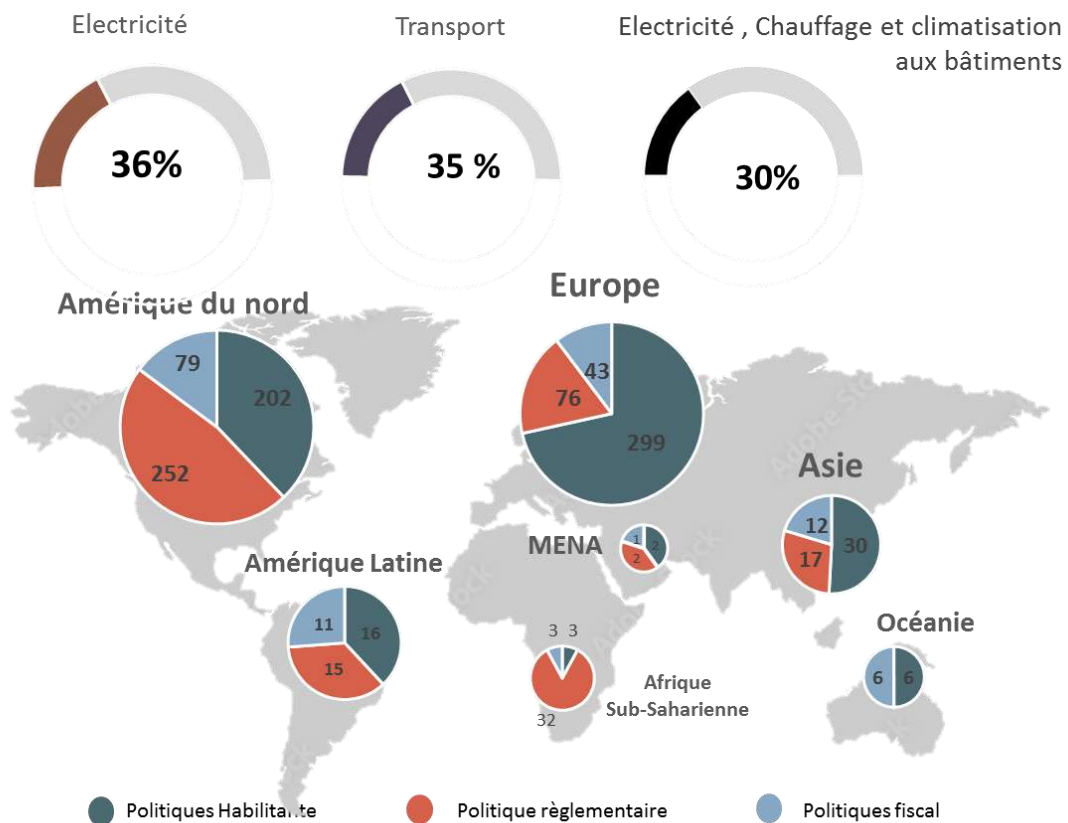


Figure 18. Politiques mondiales appliquées en faveur de l'intégration des énergies renouvelables en milieu urbain .(Source:REN21,2020)

Dans ce qui suit, nous examinons les mesures réglementaires qui peuvent être utilisées par les planificateurs et les autorités pour encourager le déploiement des énergies renouvelable et plus particulièrement l'énergie solaire dans les zones urbaines, à la fois comme instruments juridiques et comme techniques de planification communes.

1.3.1. Le zonage

Le zonage, est également apparu dans la planification des énergies renouvelables. En effet, les règlements de zonage, qui étaient initialement destinés à séparer les utilisations du sol, dictent désormais fréquemment des exigences de conception et obligent même les commissions de construction à évaluer la pertinence des choix de conception. Dans son guide « *Zoning for Solar Energy* », Kehoe Brian recommande plusieurs classifications de zones selon des règlements particuliers pour minimiser les nuisances et les conflits avec d'autres opérations. Des zones plus particulières avec des critères spécifiques, comme l'accès au soleil et l'esthétique, peuvent être ajoutées avec des lois de zonage plus complètes (Kehoe, 2015). Certaines communautés ont également adopté des normes spécifiques à l'utilisation, qui encouragent différents types de développements solaires tout en évitant les conflits entre les utilisations. Selon l'évolution des courbes de la demande d'énergie dans cette région particulière, les règles pourraient également être utilisées pour soutenir des dispositions de conception spécifiques, à titre d'exemple l'optimisation de la production de l'après-midi contre la maximisation de la production de toute la journée ou par exemple, résidentiel contre industriel (Kehoe, 2015)

1.3.2. Les règles d'accès à l'énergie solaire

De manière générale, les réglementations, une fois établies et exécutées, possèdent le pouvoir de soutenir l'énergie solaire, en définissant leur emplacement et en atténuant les éventuels obstacles. Par le biais des restrictions de planification, le concept « Ready for NZE », qui vise l'optimisation de l'exposition solaire dans les nouvelles constructions et stimulent des constructions prêtes pour l'énergie solaire, traduit les réglementations les plus fréquentes citées ci-dessous :

1.3.2.1. La servitude pour l'énergie solaire

La servitude solaire est la moins sujette aux controverses, elle repose sur un accord mutuel entre voisins. Elle est, généralement, définie comme : "*un accord juridique négocié entre des parties concernées qui protège le droit d'un propriétaire foncier d'installer un système photovoltaïque et d'accéder à la lumière du soleil*" (DVRPC, 2015). Le même rapport qui a rendu cette définition globalement acquise considère que les municipalités devraient encourager les maîtres d'ouvrage à obtenir des servitudes auprès des propriétaires fonciers adjacents, car elles ne peuvent pas les faire respecter par le biais du zonage ou du processus d'autorisation. Inclure des servitudes d'accès à l'énergie solaire dans les réaménagements de zones de faible hauteur à grande échelle permet de fournir un droit légal de recevoir les irradiations solaires.

1.3.2.2. Le permis pour l'énergie solaire

Contrairement aux servitudes solaires, un permis solaire est un type officiel de protection solaire accordé par un organisme gouvernemental. Il est donc considéré comme une protection plus importante que les servitudes solaires. Selon Morley, "*Un propriétaire donne la preuve de l'existence d'un système d'énergie solaire aux autorités locales et reçoit un permis offrant une protection contre l'ombrage induit par le développement futur ou la croissance des arbres sur les propriétés adjacentes*" (Morley & Ross, 2014).

2. Le potentiel de production solaire photovoltaïque dans la littérature : Approches et échelles d'évaluation

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la définition des besoins et des capacités à travers l'élaboration des plans du potentiel soutenant l'énergie solaire est une phase importante du processus d'intégration de l'énergie solaire. Autrement-dit, le déploiement réussi du système PV distribué nécessite un engagement plus important par le biais d'outils d'évaluation qui aident à améliorer la connaissance de leur planification et de leurs applications dans les zones urbaines.

En effet, l'identification du potentiel solaire dans les zones urbaines occupe une valeur importante pour la promotion de politiques énergétiques adaptées, de

programmes de financement et pour faire progresser les villes vers une transition énergétique à faible émission de carbone (Saretta et al., 2019).

Au cours des deux dernières décennies, l'estimation et l'amélioration du potentiel solaire en milieu urbain ont été appliquées selon de multiples échelles d'étude variant de l'échelle continentale (Defaix et al., 2012 ; Huld, 2017 ; Šúri et al., 2005, 2007), à l'échelle de la ville (Assouline et al., 2018 ; Eicker et al., 2014 ; Romero Rodríguez et al., 2017 ; Singh & Banerjee, 2015 ; Strzalka et al., 2012)(Byrne et al., 2015) puis à l'échelle du bloc urbain (Calcabrini et al., 2019 ; Chatzipoulka et al., 2016, 2018 ; Kanters & Horvat, 2012 ; Mohajeri et al., 2016 ; Montavon et al., 2004 ; Poon et al., 2020 ; Suomalainen et al., 2017). L'examen des différentes approches méthodologiques indique que l'échelle et les données disponibles sont d'une importance capitale (Izquierdo et al., 2008 ; Schallenberg-Rodríguez, 2013 ; Theodoridou et al., 2012). Ainsi, en fonction de l'objectif final, différentes technologies et outils ont été employés selon des méthodes de constante solaire variant d'une simple carte de visualisation en 2D à une modélisation 3D plus sophistiquée jusqu'à la modélisation solaire en ligne (Freitas et al., 2015). Il existe deux échelles d'évaluation solaire, celle du quartier et celle de la ville.

2.1. A l'échelle du quartier

L'échelle du quartier et des formes urbaines a été fréquemment utilisée pour l'évaluation solaire. D'une part, certains chercheurs ont examiné l'exposition solaire et l'éclairage naturel pour mettre en évidence les gains passifs et les performances du bâtiment (Dogan & Reinhart, 2017 ; Eicker et al., 2014 ; Hachem et al., 2013). D'autres part, certains chercheurs se sont concentrés sur les gains solaires actifs en étudiant l'impact des paramètres de la forme urbaine sur la disponibilité de l'irradiation solaire et, par conséquent, l'énergie générée par le PV ou le solaire thermique (ST) (Chatzipoulka et al., 2016 ; Compagnon, 2004 ; Sarralde et al., 2015).

Plus récemment, le concept d'énergie nette zéro a fortement influencé le dialogue académique sur l'évaluation solaire à l'échelle urbaine. De nombreux chercheurs évaluent le potentiel d'électricité solaire photovoltaïque par rapport aux profils de consommation, ce qui permet d'équilibrer l'offre et la demande et de créer une

énergie quasi nulle (NZE) (Amado et al., 2017 ; Li et al., 2013 ; Tsalikis & Martinopoulos, 2015).

Plusieurs études se sont concentrées sur l'investigation de la distribution du rayonnement solaire sur différentes surfaces dans un environnement construit (Lee, Lee, & Lee, 2016; Vermeulen, Knopf-Lenoir, Villon, & Beckers, 2015; Zhang et al., 2019), ainsi que la disponibilité de l'énergie solaire et son optimisation, à l'échelle urbaine. Compagnon propose une méthodologie pour estimer la quantité d'énergie solaire disponible pour n'importe quelle forme de bâtiment en tenant compte des obstructions dues au paysage environnant et des réflexions associées (Compagnon, 2004). Rylatt et al, pour leur part, ont calculé l'irradiation dans des environnements urbains complexes à l'aide de programme de traçage de rayons (Rylatt, Gadsden, & Lomas, 2001). Six formes urbaines simplifiées ont été choisies et ont fait l'objet de leur recherche. Ce choix est devenu par la suite très populaires et intensivement adopté dans des études génériques.

Quelques années plus tard, Kampf et al.(Kämpf & Robinson, 2010) ont développé une méthodologie pour minimiser la demande énergétique des bâtiments dans une zone à l'aide d'un algorithme évolutionnaire multi-objectif, en maximisant l'irradiation solaire incidente tout en tenant compte des pertes thermiques. Au total, trois formes urbaines différentes sont optimisées. Il s'agit des toits plats en terrasse, les toits en pente et les bâtiments à cours.

En ce qui concerne la géométrie urbaine, la corrélation négative entre la densité bâtie et la disponibilité de la lumière solaire et de la lumière du jour a été largement rapportée (Sanaieian et al., 2014) avec des implications sur la performance énergétique des bâtiments (Steemers, 2003 ; Strømman-Andersen et Sattrup, 2011), le microclimat urbain et le confort thermique extérieur (Alix et al., 2005)(Ali-Toudert et Mayer, 2006 ; Emmanuel et al. et al., 2007).

Néanmoins, pour les climats tempérés et froids, où la disponibilité solaire est cruciale pour le microclimat, la contrebalance de l'impact négatif entre la densité et la disponibilité solaire et été peu recherché (Kristl et Krainer, 2001 ; Lu et Du, 2012). De même pour les climats chauds, où l'amélioration de la disponibilité solaire est

essentielle pour l'énergie photovoltaïque, mais peut au même temps avoir un impact négatif sur le microclimat, d'où l'importance de chercher un équilibre entre le potentiel solaire et la qualité environnementale. Par exemple, même à densité égale, varier les combinaisons d'emprise au sol et d'hauteur des bâtiments influence l'intensité des irradiations solaires (Lee et al., 2016), la diminution de l'emprise au sol s'avérant souvent bénéfique pour la demande énergétique. Or, elle réduit de manière significative le potentiel solaire, car réduire la surface au sol du bâtiment signifie moins de surface de toit (Cheng et al., 2006a, 2006b). En revanche, lorsque le potentiel photovoltaïque est sur l'ensemble de l'enveloppe des bâtiments, l'impact de l'emprise au sol est carrément inversé (Li et al., 2015).

Il convient de souligner que, jusqu'à récemment, la plupart des études examinant les relations entre les variables de géométrie urbaine et les paramètres solaires étaient basées sur des enquêtes paramétriques s'appuyant sur des modèles génériques de canyons urbains, ou sur des configurations simples de volumes de bâtiments rectangulaires. Il est donc important que les résultats de ces recherches soient testés dans des formes urbaines réelles.

Pour quantifier le potentiel solaire, plusieurs auteurs ont présenté une méthode de calcul relative à l'apport de l'enveloppe extérieure des bâtiments pour le chauffage actif et passif, la production d'électricité photovoltaïque et l'éclairage naturel (Chatzipoulka, Compagnon, Kaempf, & Nikolopoulou, 2018). L'étude a également présenté la mise en place de valeurs seuils. Ces seuils ont été déterminés sur la base des limitations des technologies actuelles et de considérations économiques. En termes de potentiel pour les systèmes solaires thermiques (ST) et photovoltaïques (PV), les seuils indiquent la quantité minimale de rayonnement solaire sur une surface qui serait adaptée à l'installation d'un système d'énergie solaire (Table n.3). Cette méthode permet une analyse précoce durant la phase de conception qui peut déterminer le potentiel solaire d'un bâtiment pour l'installation d'un système d'énergie solaire (Compagnon, 2004).

Cependant, comme indiqué par Kanters (Kanters & Horvat, 2012), les seuils de Compagnon sont basés sur un emplacement spécifique et dans d'autres régions

d'Europe, ils seraient probablement différents. Kanters & Wall (Kanters, Wall, & Dubois, 2014) ont introduit des seuils applicables dans un contexte suédois, sur la base des catégories utilisées dans la carte solaire de Lund, et ils ont introduit la notion de seuil qui représente la valeur seuil du rayonnement solaire en kWh/m². Celui-ci peut être mesuré pour n'importe quelle région au monde .

Table 3. Les seuils relatifs à la technologie photovoltaïque (Source : Compagnon 2004)

Technique solaire	Seuils pour les façades	Seuil pour les toits
Photovoltaïque	800kWh/m ²	1 000kwh/m ²

Table 4. Index pour la classification des surfaces adéquates pour l'exploitation du solaire (source : Kanters & Wall, 2014)

	Non -adéquat	Adéquat		
		Raisonnable	Bon	Très bon
Façades kwh/m ²	0-650	651-899	900-1020	Supérieur à 1020
Toits kwh/m ²	Inférieur à 800	800-899	900-1020	Supérieur à 1020

Par ailleurs, les auteurs, Van Esch et al. ont réalisé une étude sur les effets des paramètres de conception de l'urbanisme et des bâtiments sur l'accès au soleil et le rayonnement solaire passif sur la canopée urbaine (Looman & Van Esch, 2010). Les paramètres urbains étudiés comprenaient quatre largeurs de rue et deux orientations de rue et de bâtiment. Quant aux paramètres de conception des bâtiments, trois types de toit et deux types de conception de façade ont été choisis. Les résultats de l'étude ont montré que la largeur des rues avait une influence significative sur le rendement total du rayonnement solaire global du canyon urbain, cependant, l'orientation des rues n'a pas influencé le rendement du rayonnement mais elle a fait une différence dans la distribution du rayonnement sur les surfaces séparées de la forme du toit s'est avérée avoir une influence significative sur le rayonnement direct sur la surface de la

rue et, comme pour la façade, l'augmentation du nombre de fenêtres entraîne souvent une surchauffe en été .

Malgré l'intérêt porté à l'effet du développement urbain sur l'énergie solaire, et les diverses recherches menées pour optimiser cette dernière, plusieurs aspects ne sont pas suffisamment abordés, tels que l'interaction entre le potentiel solaire et la qualité environnementale dans les climats chauds. C'est la raison pour laquelle, il a été jugé impératif de contribuer, dans la présente thèse, à explorer le **processus de mise en œuvre d'un urbanisme à fort potentiel solaire mais au même temps qui respecte les conditions climatiques, en particulier dans les climats chauds**. La pertinence scientifique et l'originalité résident dans le fait que la présente recherche aspire à **trouver un équilibre optimal entre les approches relatives à la qualité environnementale et celles liées à l'évaluation du potentiel solaire**. Les progrès récents dans les outils d'évaluation numériques de la performance urbaine offrent la possibilité de tester simultanément plusieurs indicateurs clés de performance à l'aide d'outils validés. Nous abordons, dans la section 3 de ce chapitre, les outils les plus fiables.

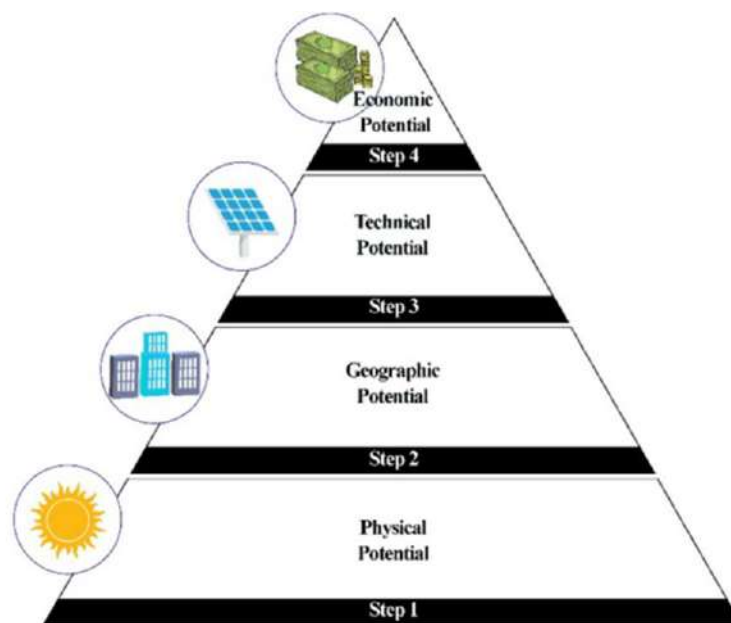
Mais avant de les discuter, notre problématique de recherche requiert l'examen d'une vision globale, celle qui renvoie à l'échelle de la ville. Il s'agit, en effet, d'évaluer le potentiel solaire actuel en prenant en considération les spécificités urbaines et climatiques du contexte local. Il y a lieu donc d'explorer également l'état de l'art relatif à la recherche du potentiel solaire à l'échelle de la ville.

2.2.A l'échelle de de la ville

À l'échelle de la ville, les études s'intéressent de plus en plus à la prédiction du rayonnement solaire car cette dernière contribue à informer les acteurs de la ville du potentiel technique de production (Wiginton et al., 2010). À cet égard, Izquierdo et al. (2008) ont considérablement influencé les recherches sur l'évaluation des ressources renouvelables dans les villes, en introduisant une approche hiérarchique à trois niveaux :

- Le potentiel physique, qui se réfère à la quantité totale de rayonnement solaire reçu ;
- Le potentiel géographique, qui englobe les zones spatiales du bâtiment où l'énergie solaire peut atteindre ;
- Le potentiel technique, qui concerne la quantité totale d'électricité qui est générée en fonction des caractéristiques techniques du système PV (c'est-à-dire l'efficacité du module).

Figure 19. Les ni



Différentes études soulignent que la complexité majeure de l'évaluation solaire à cette échelle se réfère à la détermination de la surface du toit. Dans ce sens, trois approches méthodologiques majeures peuvent être décrites. Il s'agit des méthodes de sélection manuelles, des systèmes d'information géographique (SIG) et des méthodes statistiques (Byrne et al., 2015 ; Melius et al., 2013).

Tout d'abord, les méthodes manuelles consistent à inspecter l'adéquation de la surface des toits pour l'installation de panneaux photovoltaïques par le biais d'enquêtes empiriques et de photographies aériennes. Ces études sont très précises, mais elles prennent beaucoup de temps car elles nécessitent la collecte d'une quantité importante de données (Ordóñez et al., 2010). Nous retrouvons dans la littérature

plusieurs exemples qui utilisent une approche similaire (Pearce 2012, 2013 ; Nguyen et Pearce 2012, 2013). Ces études sélectionnent les toits à partir de l'imagerie aérienne dont les caractéristiques semblent convenir au photovoltaïque sur toiture comme les toits plats et orientés vers le sud, et qui ne semblent pas être ombragés par des éléments de construction ou des arbres et des bâtiments voisins.

Prenons l'exemple de La *Community Development Agency*, en Californie, qui a mené des analyses pour évaluer l'adéquation des toits. Les toits ont été identifiés manuellement à partir d'images aériennes en fonction de leur ressource solaire, de l'utilisation du sol, et de leur emplacement loin des grandes unités CVC ou d'autres objets qui pourraient créer des ombres importantes. Les empreintes de ces bâtiments étaient par la suite numérisées et les surfaces de leurs toits sont calculées. La surface totale est réduite de 25 % pour tenir compte de la perte de performance PV due à l'espacement des panneaux et à d'autres pertes potentielles. Les analystes concluent que 0.7 millions de mètres carrés de toitures commerciales, 0.16 millions de mètres carrés de toitures d'installations institutionnelles et 3,4 millions de pieds carrés d'aires de stationnement le long de l'autoroute 101 à travers le comté pourraient être utilisés pour le photovoltaïque et pourraient fournir jusqu'à 30 mégawatts de puissance (MW) de potentiel de production d'électricité. Aussi, les analyses de la superficie des toits disponibles montrent que le PV varie de 1,31 % à 11,6 % de la surface totale des toits.

L'analyse de Portland (Bright et Burman 2010) tient compte des toits, des auvents, des abris de voiture et des garages de stationnement pour l'installation de chauffe-eau solaires et de systèmes photovoltaïques. Dans cette étude, les zones appropriées doivent englober plus de 10 m² et avoir un accès solaire annuel de 97 % ou plus. La superficie totale des toits appropriés est réduite de 10 % pour tenir compte des obstructions imprévues. Cinq régions de Portland sont considérées. Dans chaque région, un petit échantillon de bâtiments est mesuré dans Google Earth et le pourcentage de surface de toiture appropriée est appliqué à l'ensemble de la région. Les mesures sont vérifiées en personne pour un petit nombre de bâtiments à l'aide du système dit « Fish-eye », qui estime la couverture d'ombre annuelle. L'étude conclue qu'environ 3 % de la surface totale du quartier - et non pas

seulement la surface des toits - peut être ombragée—et constitue une surface utilisable pour la technologie solaire.

Par ailleurs, Google Earth est également utilisé, avec les données de construction locales, dans une analyse pour l'Andalousie, Espagne (Ordonez et al. 2010). Cette analyse s'appuie sur des méthodes d'échantillonnage et une identification manuelle des toits pour estimer la disponibilité de l'espace sur les toits résidentiels pour le photovoltaïque. Les analystes échantillonnent les bâtiments par type, y compris les maisons individuelles/semi-détachées, les maisons en rangée et les immeubles de grande hauteur. L'empreinte de chaque bâtiment échantillonné est numérisée manuellement à partir de Google Earth, et un modèle 3D est créé sur AutoCAD. En utilisant le modèle 3D, les zones obstruées par les équipements CVC, antennes, cheminées et autres objets sont exclues de la surface totale du toit. Les toits sont dès lors classés en toits plats et en toits en pente, et un périmètre d'un mètre est supposé nécessaire autour de toutes les installations pour tenir compte des travaux de maintenance. Les bâtiments échantillonnés suggèrent que 51% à 55% de la surface des toits plats et 16 à 21 % de la surface des toits en pente pourraient être utilisés pour le photovoltaïque. La table 5 dessus résume les résultats des études sur la sélection manuelle qui incluent au moins certains paramètres trouvés dans la littérature.

En revanche, la méthodologie basée sur les SIG est associée à la technologie de télédétection, comme le Lidar (Brito et al., 2012 ; Hofierka & Kaňuk, 2009 ; Thebault et al., 2020) et la photogrammétrie (Hong et al., 2017 ; Khan et al., 2016), ont propulsé la recherche plus loin puisqu'ils offrent un calcul automatique des toits. La principale distinction entre ces méthodes et la méthode précédemment discutée est que les décisions concernant l'adéquation des toits ne sont pas prises à l'aide de sélection manuelle. Au lieu de cela, les valeurs idéales pour les caractéristiques des toits sont entrées dans un modèle informatique, SIG, et le logiciel détermine les zones les plus appropriées

Table 4. Récapitulatif des résultats de la méthode manuelle appliquée dans la littérature

Cas d'étude	Pourcentage d'utilisation des toits pour PV	Capacité totale
Phoenix	1.31%–11.6%	10 MW
Portland	30 % of total district area (not only rooftop area)	18 MW
Andalusia	51%–55%(flat) 16%–21% (pitched)	30 MW

Il en résulte souvent un processus plus rapide, plus objectif et plus précis pour identifier la disponibilité des toits. Les méthodes basées sur les SIG utilisent parfois des modèles 3D pour déterminer les effets d'ombre sur les bâtiments. Les modèles 3-D sont le plus souvent générés à partir d'ortho-photographies ou de détection et de télémétrie par ondes lumineuses (*LiDAR*) et sont combinés avec des données sur la pente, l'orientation et la structure du bâtiment pour estimer le potentiel total de production d'énergie solaire (Brito et al., 2012 ; Kushwaha et al., 2019).

A cet égard, une étude à Lisbonne, au Portugal (Santos et al. 2011), utilise des données LiDAR pour créer un DSM.¹³ Celui-ci est ensuite utilisé comme entrée dans l'outil *ArcGIS Area Solar Radiation* afin de créer une carte de rayonnement solaire pour chaque mois de l'année. La moyenne des 12 valeurs de chaque pixel est calculée pour déterminer une valeur finale de rayonnement solaire. Les toits sont considérés comme adaptés au photovoltaïque si au moins 10 mètres carrés contigus ont plus de 1,68 mégawattheure par mètre carré (MWh/m²) de rayonnement solaire et ont une pente de moins de 45 degrés. Les chercheurs ont déterminé que 49% des bâtiments dans la zone d'étude d'environ 6 kilomètres carrés à Lisbonne ont des toits qui conviennent au photovoltaïque.

Les données LiDAR étant devenues plus largement disponibles à des résolutions plus élevées ces dernières années, cette méthode est devenue beaucoup plus souhaitable pour l'estimation de la surface des toits. L'estimation de la surface des toits. Cependant, elle nécessite des équipements à coût élevé, qui ne sont souvent pas disponibles pour les autorités publiques locales.

¹³ Digital surface model

Le tableau ci-dessus résume les résultats des études basées sur les SIG qui incluent au moins certains des paramètres trouvés dans la littérature.

Table 5. Tableau récapitulatif des résultats des méthodes SIG pour l'évaluation du potentiel solaire

Cas d'étude	Pourcentage d'utilisation des toits pour PV	Potentiel consommation /
Bardejov	35% (résidentiel) 59% (total)	45%
Fribourg	6.5% –21%	30%
San Diego County	12.6%	18%
Lisbon	49%	28%

Enfin, Wiginton et al. (2010) suggère qu'il est nécessaire d'identifier le ratio de surface de toiture par habitant à partir de données constantes, issues de normes nationales, de valeurs normatives ou de bases bibliographiques (Cerezo Davila et al., 2016 ; Corgnati et al., 2013 ; Shimoda et al., 2004 ; Yamaguchi et Shimoda, 2010).

Cependant, cette méthodologie n'analyse pas simultanément plusieurs caractéristiques des bâtiments. Elle intègre plutôt des indices de qualité pour évaluer la meilleure stratégie de délimitation des groupes de bâtiments. En effet, en examinant une zone d'échantillon ciblée, les techniques avancées d'exploration de données et les statistiques permettent une analyse complète des caractéristiques des bâtiments (Ghiassi & Mahdavi, 2017 ; Schaefer & Ghisi, 2016 ; Tardioli et al., 2018).

Les méthodes d'estimation de la disponibilité des toits en valeur constante sont populaires en raison de leur facilité d'utilisation. Elles ne demandent pas beaucoup de temps ou de ressources et fournissent un point de départ utile pour la production potentielle d'énergie solaire sur les toits d'une région. De nombreuses méthodes d'estimation de la surface des toits à valeur constante de toitures considèrent des configurations de toitures typiques et estiment un multiplicateur qui peut être appliqué à une région entière. La plupart de ces études se basent sur des hypothèses

générales concernant la proportion de toits en pente par rapport aux toits plats, le nombre de bâtiments dont l'orientation du toit est souhaitable et la quantité d'espace obstrué par les composants du bâtiment tels que les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) et les ombres. Une variante de la méthode de la valeur constante consiste à l'estimation de l'espace disponible sur les toits en fonction de la densité de population d'une région. Nous résumons, ci-dessous, les résultats de la méthode de la valeur constante pour les études qui incluent au moins certains des paramètres trouvés dans la littérature.

Une série de rapports du National Renewable Energy Laboratory (NREL) utilise les données de surface au sol fournies pour extrapoler la surface totale des toits à partir de la surface totale des planchers (Paidipati et al. 2008, Denholm et Margolis 2008, Frantzis et al. 2007, Chaudhari et al. 2004). Les données des stations météorologiques de l'année météorologiques (TMY2 ou TMY3) sont également utilisées pour estimer la ressource solaire dans l'ensemble des États-Unis. Des hypothèses majeures sont faites sur la composition de l'ensemble des bâtiments, en estimant que 8 % de tous les toits résidentiels américains sont plats et que 63 % de tous les toits commerciaux sont plats. La surface des toits commerciaux est réduite pour tenir compte des effets d'ombrage, et la surface des toits résidentiels est réduite pour tenir compte de l'ombrage, de la pente et de l'orientation. Ces études concluent que 60 % à 65 % de la surface des toits commerciaux et 22 % à 27 % de la surface des toits résidentiels conviennent au photovoltaïque, selon que le climat soit chaud ou frais. De nombreuses autres études font également des hypothèses générales concernant la proportion de toits en pente et de toits plats et estiment la surface totale disponible sur les toits en fonction de ces caractéristiques.

D'autres recherches utilisent une approche d'estimation encore plus générale, en appliquant une valeur constante à l'ensemble du parc immobilier, indépendamment de la pente ou de l'orientation. Ladner-Garcia et O'Neill-Carrillo (2009) appliquent une valeur constante à la surface totale des bâtiments pour estimer le potentiel d'énergie photovoltaïque de Porto Rico. Le nombre total de bâtiments est récupéré à partir du recensement et la surface des toits est calculée en supposant une superficie typique pour tous les bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels. La moitié

de la surface des toits est considérée comme adaptée au photovoltaïque pour tenir compte des ombres et des incertitudes liées à la disposition des toits. On suppose que la surface des toits est répartie sur tout le territoire de Porto Rico en proportion de la population. En utilisant les données sur les ressources solaires de Porto Rico, les données sur la température et la météo de Porto Rico, et les spécifications des panneaux photovoltaïques, les chercheurs estiment que tous les besoins énergétiques résidentiels de la région pourraient être satisfaits en utilisant 25 % de la surface totale des toits résidentiels disponibles, et que tous les besoins énergétiques commerciaux et industriels pourraient être satisfaits avec toute la surface l'espace disponible sur les toits commerciaux et industriels.

Pour conclure, les variations dans les résultats trouvés dans chaque méthode suggèrent que la littérature ne peut pas être utilisée seule pour valider les estimations de la disponibilité du photovoltaïque sur les toits pour des zones spécifiques. Des méthodes de validation spécifiques aux zones et aux projets sont plutôt nécessaires. Nous récapitulons à partir de la revue de littérature des trois principales méthodes, examinées ci-dessus dans la table 7 , les avantages et les inconvénients de chacune.

Enfin, pour arriver une compréhension détaillée, nous avons établi un schéma de synthèse à la fin de cette large étude bibliographique qui relève toutes les tendances et les méthodes d'évaluation du potentiel solaire (Voir figure 19)

Table 6. Synthèse des avantages et des inconvénients de chaque méthode.

METHODE	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Manuelle	Ces méthodes sont spécifiques aux détails et permettent de formuler des hypothèses fondées sur une connaissance spécifique des régions et des bâtiments.	Les méthodes de sélection manuelles demandent beaucoup de temps et ne sont pas facilement reproductibles dans plusieurs régions.
SIG	Ces méthodes sont spécifiques aux détails et reproductibles dans plusieurs régions. Elles peuvent être automatisées pour réduire le nombre d'informatique.	Les méthodes basées sur les SIG demandent beaucoup de temps et nécessitent des ressources informatiques importantes.
Valeurs Constantes	Cette méthode est rapide et la surface du toit est facile à calculer.	Les caractéristiques locales des toits. Les résultats sont difficiles à valider.

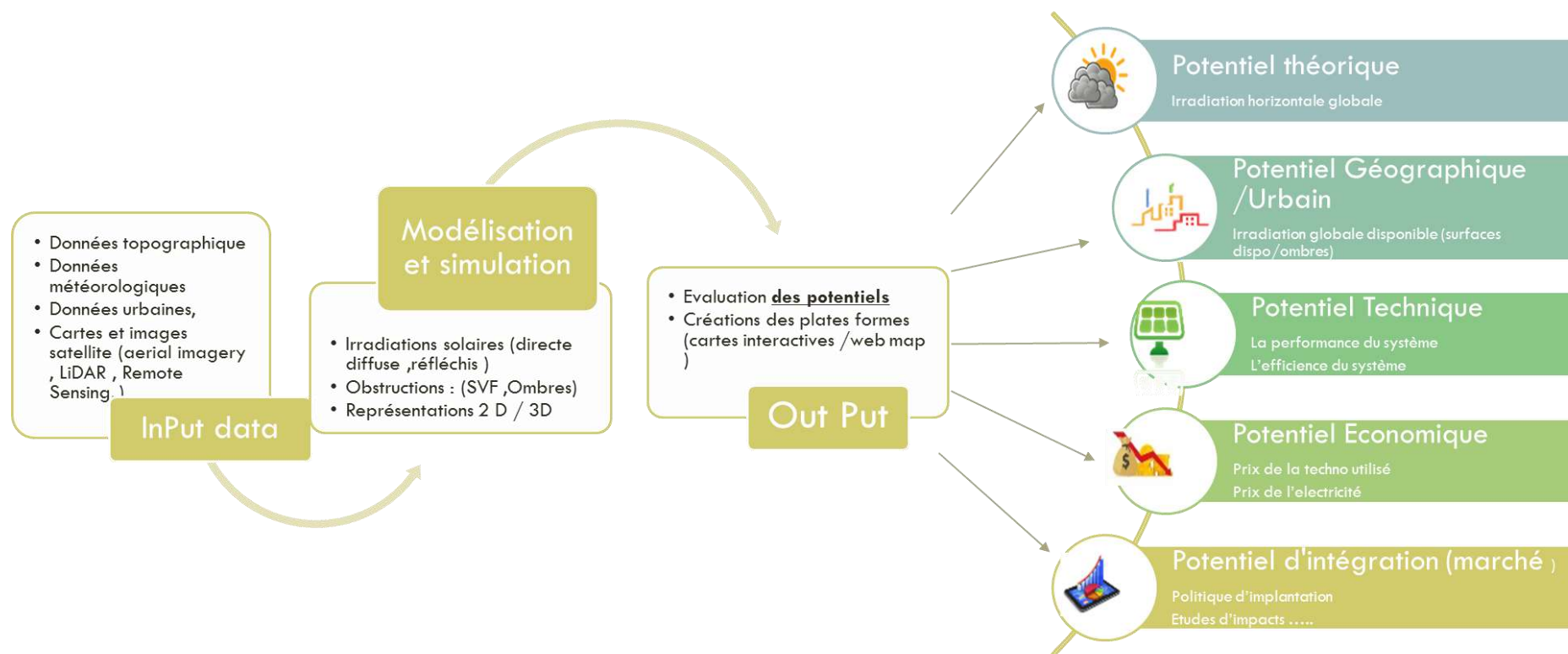


Figure 20. synthèse des méthodes pour l'évaluation du potentiel solaire à l'échelle de la ville

3. Les Outils d'évaluation

Pour les topographies réelles, le calcul du rayonnement solaire basées sur les équations physiques ne peut pas, à lui seul, calculer le rayonnement avec les obstructions à la lumière du soleil. Une telle analyse, pour une large échelle spatiale et temporelle, ne peut être réalisée qu'avec une modélisation informatique du contexte physique.

3.1. Concepts et méthodes numériques

Il existe une variété de modèles numériques pour l'évaluation des irradiances solaires. Certains modèles présentent des concepts qui sont plus adaptés aux études non urbaines ou aux évaluations moins détaillées, en raison de leur incapacité à modéliser les topographies des villes, tandis que d'autres peuvent gérer une représentation 3D complexe.

Dans ce qui suit, nous allons présenter la plupart des concepts et des méthodes numériques trouvées dans la littérature, les caractéristiques les plus pertinentes des modèles solaires numériques disponibles, ainsi que leurs avantages et leurs limites.

3.1.1. Facteur de vue du ciel (SVF)

Le facteur de vue du ciel (SVF) a été introduit pour classer les obstructions résultant soit de l'auto-ombrage, soit du terrain adjacent (Dubayah & Rich, 1995). Une procédure de calcul du SVF est proposée dans Tregenza, où l'hémisphère du ciel est divisé en petits segments ou en zones de ciel est proposée. A partir de ce travail, la Commission Internationale de l'Illumination (CIE) a recommandé l'utilisation d'un hémisphère uniformément réparti en 145 sources lumineuses virtuelles.¹⁴ Le SVF représente l'angle solide de l'hémisphère céleste visible normalisé par l'angle solide de l'hémisphère céleste total, c'est-à-dire qu'il ne prend en compte que l'aspect géométrique du rayonnement du ciel disponible.

¹⁴ C'est la subdivision recommandée cependant de nombreuses autres stratégies de subdivision du ciel peuvent être appliquées

Certains chercheurs tels que Littlefair et al. passent en revue une série d'outils pour prédire l'accès au soleil dans des situations obstruées, y compris des critères angulaires simples, des diagrammes de course du soleil, les indicateurs de gain solaire et les enveloppes solaires, entre autres (Littlefair, 1998). Rakovec et Zakšek, pour leur part, explorent différents raisonnements pour l'estimation du rayonnement diffus sur une surface inclinée, proposant un facteur d'inclinaison diffuse qui implique l'intégration de deux Radiances différentes (Rakovec & Zakšek, 2012) .

L'intégration de deux Radiances différentes sur les deux proportions appropriées de l'angle solide a également été effectuée. Le DTF dépend du rapport entre sol/ciel, ce qui signifie que, par exemple, si l'inclinaison de la surface est élevée et que le ciel est plus lumineux que le sol, une plus grande quantité de rayonnement diffus atteindra la surface. Les surfaces verticales, en revanche, nécessitent une approche particulière. Redweik et al. déterminent le SVF le long des façades verticales en supposant que chaque point de la façade peut voir l'hémisphère entier du ciel et qu'elle est représentée par un grand nombre de sources lumineuses dispersées dans tout l'hémisphère ((Redweik, Catita, & Brito, 2013) .

La distribution de ces sources lumineuses est approximativement la troisième disposition montrée simulant en moyenne la contribution du rayonnement solaire. La SVF d'un point particulier est obtenue en connaissant le nombre de fois que ce point a été éclairé et le nombre total de fois qu'il aurait pu l'être. Dans le cas d'un point de façade verticale, on s'attend à ce que le SVF inférieur à 0,5, puisque généralement, seule la moitié de l'hémisphère céleste peut être vue depuis une façade verticale.

3.1.2. Radiance

En appliquant le modèle de rayonnement diffus (Erdélyi, Wang, Guo, Hanna, & Colantuono, 2014) et en considérant les réflexions diffuses et spéculaires des obstructions urbaines, ce logiciel utilise un algorithme sophistiqué de traçage de rayons à rebours basé sur le algorithme sophistiqué de traçage de rayons vers l'arrière, basé sur le comportement physique de la lumière dans un modèle 3D volumétrique, y compris les géométries courbes complexes (Ward, 1994). Il s'agit

d'un logiciel gratuit puissant, largement validé et utilisé avec succès dans des applications liées à l'estimation du potentiel solaire dans les bâtiments, applications liées à l'estimation du potentiel solaire des toits et des façades de bâtiments pour la production d'électricité et l'analyse de l'éclairage naturel (Compagnon, 2004).

Les travaux de Robinson et al. constituent un autre exemple d'application de Radiance (Kämpf & Robinson, 2010; Robinson & Stone, 2005). Ils utilisent les capacités uniques de Radiance pour modéliser le rayonnement réfléchi et un ciel anisotrope pour montrer qu'il n'y a pas de relation linéaire entre le SVF et l'irradiation car elle dépend des différents matériaux, de la géométrie des canyons etc. Le logiciel de simulation peut être intégré en tant que plug-in dans plusieurs interfaces de conception telles que Autodesk Ecotect Analysis, DIVA for Rhino, etc.

3.1.3. L'approche par le ciel cumulé

Il s'agit d'une méthode introduite par Kämpf & Robinson (2010) pour produire des images d'irradiation annuelle à partir d'une seule simulation. Elle représente le langage C et est incluse dans Radiance sous la forme d'un module appelé *GenCumulativeSky*. Ce dernier consiste en un schéma basé sur Tregenza dans lequel chacun des 145 patches sous-tend un angle solide similaire. Le modèle tout temps de Perez (Perez, Seals, & Michalsky, 1993) est ensuite utilisé pour prédire l'irradiation globale au centre de ces patches. Ce modèle présente un équilibre efficace entre la précision et l'efficacité des calculs.

3.1.4. Le Daysim

Le Daysim est un logiciel validé d'analyse de l'éclairage naturel basé sur Radiance. Il utilise une méthode de coefficient d'éclairage naturel basée sur des calculs de traçage de rayons et le modèle de ciel génère un profil d'éclairement annuel en chaque point dans et autour des bâtiments et autour des bâtiments (Reinhart & Wienold, 2009). Les opérations de traçage de rayons sont réalisées en prenant un dôme de ciel composé de 145 segments de ciel diffus, 3 segments de sol et un segment de sol et d'un second lancer de rayons avec environ 65 positions solaires directes qui sont distribuées le long de la trajectoire solaire annuelle. En effectuant un traçage à

rebours à partir des points du capteur de simulation, chaque segment de ciel et chaque position solaire sont ensuite pondérés par rapport à leur contribution à chaque point de la scène.

Table 7. Récapitulatif des concepts et des outils numériques de simulation du potentiel solaire

Le concept/Outil	Objectif	Le potentiel étudié
Sky view Factor	Pourcentage du ciel visible pour le calcul du rayonnement diffus	Physique Géographique
Radiance	Algorithme de traçage de rayons à rebours pour le rayonnement direct et les réflexions diffuses et spéculaires. des obstructions urbaines dans un modèle 3D volumétrique	Physique Géographique
L'approche par le ciel cumulé	Rayonnement global au centre d'un ensemble de patches 145 patches sous-tendant un angle solide similaire	Physique Géographique
Daysim	Profil d'éclairement en chaque point à l'intérieur et autour des bâtiments à l'aide d'un coefficient de lumière du jour et d'un algorithme de traçage de rayons arrière basé sur Radiance.	Physique Géographique

3.2. Modèles basés sur le SIG

Les modèles les plus sophistiqués pour prédire le potentiel physique et urbain de la ressource solaire est abordés dans cette section. Nous présentons les modèles qui s'appuient sur le SIG pour représenter des algorithmes de rayonnement.

3.2.1. Le module r.sun

Implémenté dans le SIG GRASS, r.sun est basé sur la méthodologie existante des irradiances solaires utilisées dans le modèle topographique (Hofierka & Zlocha, 2012), avec une nouvelle procédure de calcul basée sur l'approche combinée vecteur-pixel pour traiter des données vectorielles 3D représentant des environnements urbains complexes (Abdul-Rahman & Pilouk, 2007).

Le modèle r.sun utilise des cartes matricielles pour le terrain, la latitude, la turbidité, le rayonnement et l'indice de ciel clair afin de produire des cartes matricielles d'irradiation et de rayonnement, de réflectance et d'ombre pour les surfaces horizontales ou inclinées. Il s'adapte aux conditions de ciel couvert et de ciel clair en définissant des fonctions de transmission diffuse et d'altitude (Freitas, Catita, Redweik, & Brito, 2015).

Ce modèle fonctionne en mode temps instantané ou en mode journalier, qui peuvent être utilisés séparément ou en combinaison pour fournir des estimations pour n'importe quel pas de temps ou intervalle souhaité. Cependant, ledit modèle est optimisé pour les conditions climatiques européennes. Sa contribution la plus pertinente et la plus importante réfère à la base de données en ligne PVGIS (Šúri, Huld, & Dunlop, 2005).

Les effets d'ombrage des objets environnants sont pris en compte à l'aide d'un algorithme d'ombrage unique qui prend en compte les effets des bâtiments voisins. Comme certaines façades ou toitures peuvent être partiellement ombragés, les polygones 3D originaux représentant ces surfaces doivent être segmentés en éléments plus petits afin d'obtenir une variation spatiale d'un certain attribut tel que le rayonnement solaire.

3.2.2. ArcGIS Solar Analyst

Dans le but d'étendre les fonctionnalités, la précision et la rapidité de calcul des modèles de rayonnement, le Solar Analyst (Tooke, Coops, Christen, Gurtuna, & Prévot, 2012) a été développé en tant qu'extension du SIG ArcView, en langage C# (ESRI). Une extension ArcView GIS, utilisant le langage C++ (ESRI). Les entrées les plus pertinentes pour ce modèle sont l'emplacement, l'élévation, l'orientation et la transmission atmosphérique.

La méthode de rayonnement consiste en une approche géométrique qui divise le ciel en différents secteurs définis par leurs coordonnées zénithales et azimutales. Ainsi, en considérant un ciel uniformément couvert avec le même rayonnement diffus entrant provenant de toutes les directions du ciel, soit un modèle diffus de type "

standard overcast (SOC), où le flux de rayonnement diffus varie en fonction de l'angle zénithal (Kodysh, Omitaomu, Bhaduri, & Neish, 2013), ce modèle de calcul présente un ensemble de cartes de rayonnement variées, une photographie équivalente au fisheye et une analyse du cône visuel similaire à celle de SolarFlux (Rich, P.M;Hetreick, 1996) et celle du modèle de Kumar et al (Kumar, Skidmore, & Knowles, 1997). Il s'agit également d'un modèle très flexible en termes de résolution temporelle et spatiale. De nombreuses études sur la ressource solaire et la disponibilité des toits pour l'installation photovoltaïque qui ont utilisé Solar Analyst et d'autres outils d'ArcGIS ont été rapportées dans la littérature.

3.3. Le ‘ Web-based’ model et les cadastres solaires

Nous ne pouvons pas parler des méthodes de calcul et de simulation numérique sans aborder les modèles basés sur le développement web. En effet, basée sur une interface Web, la carte ou le cadastre solaire consiste, généralement, en une représentation visuelle qui fournit des informations, telles que l'irradiation solaire, la taille estimée du système PV et la production d'électricité prévue, qui peuvent être interrogées et rassemblées. Les cartes solaires basées sur le modèle numérique servent à informer les utilisateurs sur les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque, les coûts associés et les économies correspondantes.

Un nombre croissant de villes et même de régions réalisent des cartes solaires en ligne qui peuvent donner aux propriétaires de bâtiments une indication de l'énergie solaire potentielle de leurs toits, et certaines villes incluent également le potentiel solaire des façades. Ces cartes solaires sont à la fois des outils de politique et d'évaluation (Thebault, Clivillé, Berrah, & Desthieux, 2020) .

Afin d'identifier les surfaces des bâtiments qui se prêtent à l'installation de systèmes d'énergie solaire, ces cartes solaires quantifient le potentiel solaire sur les toits ou les façades des bâtiments afin de prédire la production possible d'énergie solaire. La majorité des cartes solaires s'attachent à montrer le tissu urbain existant, mais plusieurs villes étudient la possibilité d'importer des bâtiments planifiés. Les cartes solaires sont produites à l'aide de nouvelles technologies telles que la photogrammétrie et les drones (Mainzer et al., 2014).

Alternativement, le potentiel solaire de chaque toit et de chaque façade peut être précisément à l'aide d'un modèle numérique qui combine les bâtiments voisins et le relief du terrain avec un logiciel de simulation solaire adapté. Les outils de simulation solaire intègrent des modèles de radiations qui tiennent compte de l'effet urbain et de la possibilité de réfections. Cependant, il est à noter qu'il y a une différence significative dans la quantité de données qui sont fournies par les cartes solaires. Certaines de ces cartes fournissent uniquement les niveaux d'irradiation sur les surfaces, d'autres fournissent la production estimée et peut-être même les délais de récupération (Kanters et al., 2014).

Dans une étude portant sur 19 cartes solaires, la catégorisation a été analysée. Les résultats de cette étude montrent que de nombreuses cartes solaires classent les radiations entrantes en quatre catégories (non approprié, raisonnable, bon et très bon) avec une certaine gamme d'irradiations. Plusieurs de ces nouvelles cartes solaires fournissent des aspects additionnels au-delà du solaire. De plus en plus d'outils superposent un ou plusieurs aspects liés à l'énergie, comme par exemple la conservation de l'énergie et les économies potentielles (Nouvel et al., 2015). Les exemples les plus pertinents et les plus récents sont brièvement décrits ci-dessous. Le tableau qui suivra la présentation des exemples regroupe une liste des cartes solaires accessibles en ligne.

3.3.1. PVGIS

La célèbre base de données PVGIS¹⁵ permet de visualiser les données de rayonnement solaire pour l'Europe, l'Afrique et l'Asie du Sud-Ouest, avec une résolution de 1 km. L'outil calcule le rayonnement solaire à l'aide du modèle r.sun, en utilisant des mesures au sol pour l'Europe (données 1981-1990) et l'Afrique (données 1985-2005) et en définissant des coefficients de ciel clair. Il inclut les pertes dues à l'ombrage du terrain (Huld, 2017).

L'interface, quant à elle, permet à l'utilisateur de saisir la puissance de crête nominale, les pertes estimées, l'orientation et l'inclinaison, le type de montage, la

¹⁵ Disponible en ligne sur ce lien : <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>

technologie utilisée, entre autres caractéristiques. Les résultats comprennent l'inclinaison optimale du panneau pour un emplacement donné, des cartes d'irradiation globale mensuelle et annuelle, profils d'irradiation quotidienne, paramètres climatiques et production PV potentielle, compte tenu de la température ambiante.

Cette carte solaire permet également à l'utilisateur de choisir entre la base de données solaires plus ancienne ou plus récente, basée sur des données satellitaires, à savoir les données d'irradiation solaire dérivées des satellites Meteosat. Bien que les zones de montagne puissent encore comporter un niveau significatif d'incertitude, la base de données plus récente présente une base de données plus récente à un écart de biais minimum de $\pm 2\%$, alors que la plus ancienne a un écart de $\pm 5\%$ (Šúri et al., 2005).

3.3.2. PVWATTS

L'outil de cartographie solaire PVWatts¹⁶ n'était initialement disponible que pour les États-Unis. En combinant les données du TMY2 avec un modèle topographique d'une résolution spatiale de 40 km², l'outil de calcul PVFORM et le modèle de l'outil de calcul PVFORM ainsi que le modèle anisotrope diffus de Perez sont utilisés pour estimer la production annuelle de PV et sa valeur en dollars (Marion, Anderberg, George, Gray-Hann, & Heimiller, 2001). Des versions plus récentes, étendant le modèle pour n'importe quel endroit dans le monde, permettent à l'utilisateur de rechercher une adresse, un code postal ou des coordonnées géographiques, et de définir des informations d'entrée telles que les coûts d'électricité locaux, l'inclinaison et l'azimut de la surface, le mode de suivi, le courant continu et un facteur de déclassement. Cet outil fait actuellement l'objet d'un développement plus poussé.

Un autre outil permettant d'accéder au potentiel photovoltaïque avec une interface basée sur une carte qui permet à l'utilisateur de spécifier une adresse ou de sélectionner manuellement. Un ensemble de données horaires dérivées de satellites avec une résolution spatiale de 10 km est utilisé pour calculer ressource solaire. À l'aide d'une version modifiée de PVWatts, des incitations et des taxes sur les énergies

¹⁶ Disponible en ligne sur : <https://pvwatts.nrel.gov/>

renouvelables, il estime l'électricité produite par un système PV sur une année, y compris la production horaire en courant alternatif, sa valeur, son amortissement et sa contribution au profil de charge. Il sera abandonné et incorporée dans une nouvelle version de PVWatts.

3.3.3. Les cartes des systèmes solaires Mapdwell

L'un des exemples de cartes solaires qui témoigne des avancées de la technologie est, sans aucun doute, la carte solaire Cambridge. Cette dernière a été créée dans le cadre du modèle de Jakubiec et Reinhart (Jakubiec & Reinhart, 2012). La même méthodologie est à l'origine de la carte du système solaire de Mapdwell¹⁷ à Washington, DC. Les deux cartes comprennent les toits et les structures des bâtiments, les infrastructures existantes et le feuillage des arbres.

L'utilisateur peut rechercher une adresse ou sélectionner manuellement le toit qui l'intéresse et/ou modifier sa taille. Les zones à faible potentiel solaire sont exclues. Pour un toit interrogé, les résultats comprennent des informations financières, techniques et environnementales telles que le coût pour le propriétaire, le revenu mensuel, la taille du système, le délai d'amortissement par an et la compensation carbone. Un code de couleur aide également à visualiser les toits définis comme "mauvais", "moyens", "bons" et "optimaux", ou encore comme des toits de qualité supérieure, "bon" et "optimal" ou pas du tout disponible. Une marge d'erreur de 73-5% est indiquée, qui est attribuée à des inexactitudes dues à l'obsolescence partielle de l'échantillon, à l'excès de végétation ou à des obstructions non modélisées, à des bases de données incomplètes, à des couches SIG incomplètes ou à des obstructions partielles indétectables selon la résolution de l'enquête.

Dans le tableau ci-dessous, nous avons collecté une liste des web-based cartes solaires les plus connues à l'échelle internationale.

Enfin, au terme de cette revue de la littérature, nous avons jugé utile d'élaborer un tableau récapitulatif qui regroupe toutes les tendances et les méthodes examinées.

¹⁷ Disponible en ligne sur : <https://mapdwell.com/en/solar>

Les travaux sélectionnés et analysés ont été décortiqués puis organisés dans ledit tableau synthétique, en indiquant les méthodes, outils et échelles d'études dans le but d'avoir un réel aperçu des différentes pistes méthodologiques adoptées par les chercheurs autour du monde pour l'évaluation du potentiel solaire. Une fois le travail de synthèse effectué, nous avons procédé à l'élaboration de notre feuille de route d'évaluation méthodologique pour le calcul du potentiel solaire dans notre cas d'étude.

Tableau 1. Exemples de cartes/ cadastre solaire disponible en ligne.

Cadastre solaire	Méthode utilisée
Cadastre solaire de la ville d'Anaheim	Esri Solar Analyst Composant de ArcGis
Cadastre solaire de la ville de Berkeley	Flat Roof Constant
Cadastre solaire de Boston	Esri Solar Analyst Composant de ArcGis
Cadastre solaire de Cambridge	Radiance/Daysim
Cadastre solaire de Los Angeles Country	Esri Solar Analyst Composant de ArcGis
Cadastre solaire de Washington DC	Radiance/Daysim
Cadastre solaire Lisbonne	Esri Solar Analyst Composant de ArcGis

Conclusion

Ce chapitre a posé les fondements théoriques et méthodologiques de la présente thèse. La consommation d'énergie varie considérablement entre les différentes villes, en fonction de leur densité de population, leur climat et leur taux de croissance. Alors que les politiques énergétiques sont souvent décidées au niveau national, les autorités municipales sont les mieux placées pour adapter les stratégies en matière d'énergies renouvelables aux circonstances locales spécifiques.

La revue de littérature sur l'intégration de l'énergie solaire en milieu urbain a mis en évidence un les différentes phases relatives au processus de planification de l'intégration de l'énergie solaire. Cinq principales phases se distinguent, notamment celle liée à l'estimation du potentiel solaire. Les méthodes d'évaluation ont été appliquées selon de multiples échelles d'étude variant de l'échelle continentale, à l'échelle de la ville l'échelle du bloc urbain. Cependant, l'examen des différentes approches méthodologiques appliquées indique que l'échelle et les données disponibles sont d'une importance capitale. Ainsi, en fonction de l'objectif final, différentes technologies et outils ont été employés, soit en s'appuyant sur des méthodes de constantes solaires avec de simples cartes de visualisation en 2D ou une modélisation 3D plus sophistiquée ou même le solaire en ligne.

Grâce au développement rapide des technologies de l'informatique, les modèles de cartographie solaire sont aujourd'hui beaucoup plus puissants, permettant ainsi l'analyse détaillée et la représentation des phénomènes de rayonnement, sortant ainsi des créneaux traditionnels de l'architecture et de l'ingénierie. Un examen des modèles empiriques les plus pertinents pour le rayonnement solaire et des outils logiciels et SIG qui ont été introduits pour répondre aux questions liées à la prédiction des ressources solaires a été effectué. Il a révélé la nécessité d'avoir recours au croisement de plusieurs outils.

Au vu de ces nombreux dispositifs réglementaires, et en tenant compte des différentes méthodes d'évaluations du potentiel solaire an milieu urbain, il devient possible de se positionner selon les besoins et les conditions relatives au cas d'étude

et construire une démarche méthodologique d'évaluation du potentiel solaire en milieu urbain. C'est précisément l'objet du prochain chapitre.

Positionnement Scientifique et démarche méthodologique

Introduction :

Après avoir élaboré le cadre théorique et le positionnement épistémologique de la recherche, le présent chapitre vise à construire le cadre méthodologique de la thèse. L'objectif consiste à présenter l'approche méthodologique relative à l'évaluation du potentiel solaire en tenant compte de deux échelles d'analyse, à savoir celle de la commune et celle des blocs résidentiels. La première permet de définir une estimation du potentiel solaire à l'échelle de la commune. La seconde contribue à apporter plus de précisions sur la manière la plus efficiente d'optimisation des formes des blocs résidentiels pour une future expansion de la ville. Les deux approches serviront à évaluer l'impact de la morphologie urbaine sur le potentiel solaire dans le but d'optimiser les typologies résidentielles existantes et donner des orientations à la planification future.

1. Positionnement Scientifique

Le positionnement épistémologique est essentiel à toute recherche afin d'argumenter le paradigme de la recherche, sa nature et la valeur des résultats. La revue de la littérature présentée dans le chapitre précédent a permis de distinguer plusieurs approches à l'évaluation du potentiel solaire en milieu urbain, sur différentes échelles et en utilisant divers outils. De plus, les méthodologies explorées dans le chapitre précédent varient en fonction des finalités recherchées.

La réponse à notre problématique et aux interrogations initiales relatives au processus d'intégration de l'énergie solaire dans le secteur résidentiel requiert un enchaînement d'évaluation ordonnée à partir de l'échelle globale à l'échelle locale. Toutefois, comme nous l'avons mentionné dans la littérature, l'évaluation du potentiel solaire nécessite des ressources importantes et des données précises. Notre positionnement ne peut être indépendant des ressources et des données existantes.

Dès lors, il est impératif de commencer, tout d'abord, par une approche globale, celle qui renvoie à l'échelle de la commune. Il s'agit, en effet, de mettre en relation les spécificités du contexte local, la disponibilité des données et des ressources nécessaires. Notre premier objectif est de déterminer le potentiel solaire physique, géographique et technique dans le secteur résidentiel. En raison du manque de données, cette étape s'appuie sur une méthode ascendante combinée. Les résultats feront l'objet de plusieurs interprétations dans le but d'informer les acteurs sur les améliorations à apporter dans le secteur existant afin d'aboutir à une économie d'énergie ou atteindre un équilibre énergétique.

Par la suite, il convient de s'interroger sur les possibilités d'optimisation des typologies résidentielles pour la planification future. Pour s'y faire, nous procédons à une analyse paramétrique à l'échelle morphologique pour étudier l'influence des différents paramètres urbains sur le potentiel solaire et proposer les solutions d'optimisation. L'objectif est de mesurer les éventuelles stratégies afin d'y rechercher l'émergence de modèles urbains alternatifs qui, partant d'une volonté de mise en œuvre d'une balance énergétique sur la base d'énergies renouvelables, viendraient remettre en cause les formes urbaines existantes.

2. Protocole de la recherche :

Avant de détailler la démarche méthodologique de notre objet d'étude, nous procédons à l'identification du périmètre d'étude et les sources mobilisées durant notre recherche.

2.1. Définition du périmètre d'étude :

Entre 1998-2008, le sud algérien a connu une urbanisation massive. Le rythme de croissance des agglomérations et de la population citadine était plus rapide comparant à celui du nord du pays (Kouzmine & Fontaine,2018). Cette croissance constitue le principal déclencheur d'un développement urbain peu maîtrisé, dupliquant les modèles architecturaux du nord, sans se soucier de l'inadéquation avec le milieu naturel.

A la base, la typologie des Ksour a été utilisée dans la région pendant de nombreux siècles. Elle est caractérisée par une adaptation aux conditions climatiques, reflétant le génie de la construction traditionnelle saharienne sur le plan environnemental. Cependant, les pressions démographiques et économiques ont induit à une construction de masse basée plutôt sur les aspects fonctionnels sans prise de considération des aspects environnementaux. Ce développement rapide a transformé les villes d'un tissu compact homogène vers une sorte de « patchwork » fracturé de diverses typologies urbaines.

Contrairement à la typologie traditionnelle, les mesures de l'efficacité énergétique passives ne sont pas prises en compte, ce qui influe sur les profils de consommation énergétiques. De plus, la production d'énergie renouvelable est extrêmement rare malgré son grand potentiel. Elle se limite à des stations photovoltaïques ou éoliennes situées en sites isolés, faisant partie de la stratégie nationale de l'énergie.

A travers le chapitre précédent, il a été confirmé que les objectifs spécifiques en matière d'énergie renouvelables appliqués à l'échelle des villes sont les mieux appropriés, car ils se concentrent sur la consommation réelle et finale de l'énergie. Par ailleurs, ils permettent de déployer des options technologiques propices à leur zone climatique, tendances démographies et structures économiques.

Sur la base des lacunes locales et les défis indiqués précédemment, le contexte du sud algérien, avec toutes ses difficultés et possibilités urbaines et climatiques, constitue le socle de notre approche analytique.

L'exploration des éventuels cas pour le choix d'un cas d'étude a été menée à travers deux principaux moyens. Il s'agit de :

- L'exploration des données de l'Agence nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) ;
- La consultation des activités du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) en terme d'installation de stations photovoltaïques primées sur les questions énergétiques et environnementales.

Au terme de ces recherches, Laghouat s'est distinguée parmi les autres villes du sud algérien. En effet, elle est considérée comme une province énergétique vitale, car elle contient un important gisement de gaz et l'une des principales stations de production d'électricité en Afrique. Laghouat abrite la plus grande centrale solaire photovoltaïque d'Algérie, d'une capacité totale de 60 mégawatts MW. Elle a enregistré le taux de croissance le plus fort parmi les wilayas du sud, du fait qu'il est égale à 35 % (Kouzmine & Fontaine, 2018). Selon le recensement local, qui a été effectué en 2012 dans la commune chef-lieu, elle abrite près de 180 000 habitants. Le parc immobilier a été estimé à 26.170 logements en 2013 avec un taux d'occupation de 6 personnes par habitation. La ville se caractérise par une urbanisation rapide puisque de nouveaux programmes de logements sont en cours de réalisation pour amortir le déficit alarmant. Une analyse plus profonde des spécificités de la ville est établi dans le chapitre 4 de la présente thèse.

2.2. Collecte et organisation des données

La collecte de données a été menée en deux étapes également. En premier lieu, une collection de toutes les publications, rapports, présentations et articles de presse concernant la commune de Laghouat a été constitué. Cette étape nous a, en particulier, permis de repérer une partie des données nécessaires. Nous avons également mené une revue des publications académiques mentionnant la commune d'une manière ou d'une autre et pouvant fournir des éléments empiriques. En revanche, cette recherche s'est avérée infructueuse pour certaines données urbaines. De ce fait, il a été nécessaire de procéder à la constitution une base de données géographique et soutenir le processus analytique de la recherche. La constitution de

cette base de données constitue une phase cruciale pour la poursuite de notre recherche. La construction d'une base de données sur le SIG permettra de regrouper toutes les informations spatiales, socioéconomiques et énergétiques de Laghouat. Notre objectif, à travers l'élaboration de cette base de données, vise à faciliter la prise de décision en vue d'une planification énergétique urbaine intelligente.

Il est globalement reconnu que les couches géographiques ainsi que les informations géo référencées constituent un outil puissant de suivi, de prise de décision et de communication pour toutes les questions liées à l'énergie dans la planification le fonctionnement d'une commune. Les défis à relever pour une conception robuste et intelligente d'une base de données énergétique à l'échelle urbaine sont les suivants :

- La détermination de l'information que cette base de données peut fournir à notre étude et à nos modèles de calcul ;
- La sélection des informations de sortie (cartes outputs) utiles que cette base de données doit fournir, c'est-à-dire celles qui répondent à notre problématique ;
- Le niveau d'agrégation, c'est-à-dire le niveau spatial qui fournit des informations statistique utiles à notre problématique.

Afin de mettre en œuvre un tel système, les informations collectées décrivant le fonctionnement de la commune (PDAU), les plans (POS), les recensements de la population et la demande d'énergie sont spatialisées et géo-référencées dans la base de données géographiques. La commune est ensuite divisée en un nombre d'entités urbaines en fonction de son étendue géographique, les caractéristiques morphologiques de ses quartiers et de l'applicabilité des données.

Notre base de données contient cinq domaines d'information de base :

1. Types et typologies de bâtiments
2. Surface et type des toits.
3. Nombre d'étages.
4. Nombre d'habitats /appartements
5. Population

Les résultats de base représenteront, de manière explicite, sous forme de cartes thématiques, la distribution spatiale de la demande et de la production d'énergie exprimée dans les différents quartiers de la commune. Il s'agit des éléments suivants :

- Nombre de bâtiments ou surface totale pour chaque typologie de bâtiment spécifiée.
- Demande totale d'énergie pour chaque typologie de bâtiment.
- Estimation de la capacité PV installée et de la production d'énergie par district.

3.3. Outils Numériques :

Une batterie de logiciel de simulation énergétique soutenue par la communauté scientifique a été sélectionnée. Pour ce choix, nous nous sommes basées sur quatre points essentiels. Il s'agit de :

- Validé : repose sur des moteurs de simulation validés tel que : Radiance et Energy Plus ;
- Open Source : les outils sélectionnés sont en grande partie gratuits et open source ;
- Intégré : qui s'exécute dans un logiciel de modélisation 3D et permet de transférer les données. Ainsi toute la création, simulation et visualisation pourrait se dérouler dans une seule interface.
- Flexible : basé sur des composants modulaires qui s'exécutent dans une interface d'algorithme visuel, permettant la flexibilité et l'automatisation des tâches.

Par ailleurs, d'autres logiciels ont été utilisés pour la visualisation et aident à la prise de décision. La figure n.20 récapitule tous les outils utilisés le long de notre recherche.

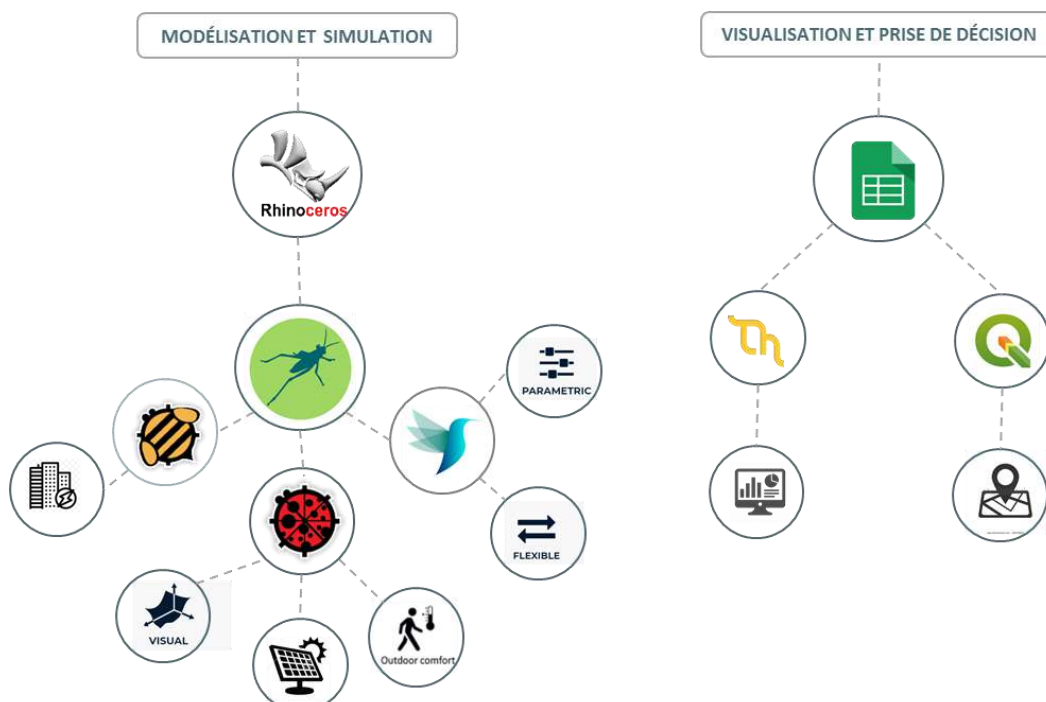


Figure 20 . Les outils numériques utilisés. (Source : fait par l'auteure)

3.3.1. La système d'information géographique SIG

QGIS (Quantum GIS) est une application de système d'information géographique de bureau multiplateforme, gratuite et ouverte, qui prend en charge la visualisation, l'édition et l'analyse de données géo spatiales.¹⁸ QGIS permet, en effet, la création de couches matricielles et vectorielles stockées sous forme de points, de lignes ou de polygones. Pour permettre l'utilisation de données provenant de sources externes, QGIS prend en charge les formats *dxf*, *MapInfo*, *PostGIS*, et également d'autres services Web, notamment *Web Map Service* et *Web Feature Service*. QGIS permet également l'intégration d'autres paquets (plugin open-source), notamment *PostGIS*, *GRASS GIS* et *MapServer*. Les plugins écrits en Python ou en C++ étendent les capacités de géocodage à l'aide de l'API, permettant d'exécuter des fonctions de géo traitement similaires à celles que l'on trouve dans ArcGIS, et de communiquer avec les bases de données *PostgreSQL/PostGIS*, *SpatiaLite* et *MySQL*

¹⁸ <https://www.qgis.org/fr/site/>

3.3.2. Logiciels de simulation

Notre choix s'est porté sur le logiciel *Rhinoceros* pour la modélisation et le logiciel *Grasshopper3D* comme une interface de développement des algorithmes visuels et plus particulièrement des plugins « *ladybug* » et « *Honeybee* ».

Ladybug bénéficie de la plate-forme modulaire et visuel de *Grasshopper* pour permettre d'explorer la relation directe entre les données architecturales et environnementales à travers des mailles graphiques qui sont bien intégrées au model 3D. Le plugin offre toute une gamme d'analyse environnementale. Il permet de créer des graphiques interactifs en 2D et 3D pour examiner l'impact des données climatiques tel que l'ensoleillement et les ombres sur la conception architecturale et urbaine en utilisant la méthode par ciel cumulé (Voir chapitre 2. Section 3). Il fournit également des composants spécialisé pour l'évaluation du potentiel solaire capté par les panneaux solaires.

Honeybee est utilisé dans la même interface visuelle de *Grasshopper*. Le plugin fournit une modélisation complète et des simulations de de l'éclairage naturel et de la thermodynamique (Therm/Windows) et des modèles énergétiques (EnergyPlus/Open Studio). La figure n 21 ci-dessous montre les composants de *Ladybug* et *Honeybee* dans la plateforme *Grasshopper*.

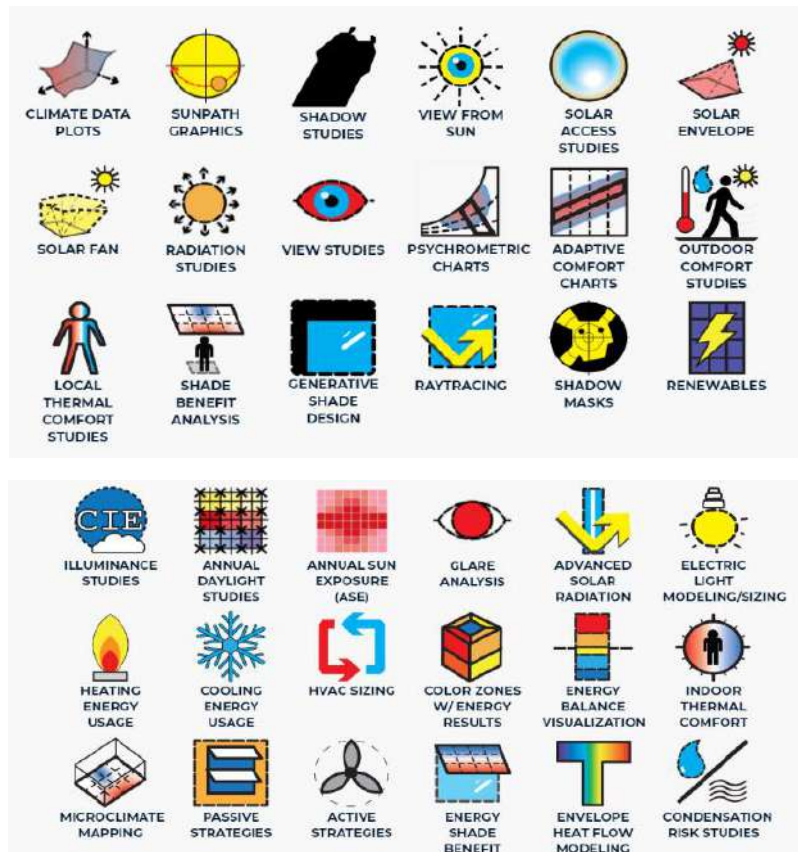


Figure 21.les composants du plugin *Ladybug* (en haut) et *honey bee* (en bas)

3.3.3. Colibri pour l'étude paramétrique

Ce plugin open source a été lancé récemment en 2016. Son objectif est simple. Il vise à faciliter l'analyse paramétrique pour générer des ensembles de données compatibles avec *Thread* dans *Grasshopper*. Il permet d'itérer les valeurs d'input avant la simulation, et d'enregistrer également leur résultats numériques dans un fichier `data.csv` (CORE Studio, 2019). Le flux de travail de Colibri est divisé en deux étapes, l'itération et l'agrégation. Le composant *Iterator* permet de spécifier le nombre de pas à faire le long de chaque liste de paramètres. Cela permet de contrôler des valeurs morphologiques et de les spécifier sélectivement le long de chaque donnée input dans l'espace de conception. Pendant que *l'Iterator* itère en amont, le composant *Aggregator* collecte toutes les données Output à partir de *Grasshopper*. Il rassemble

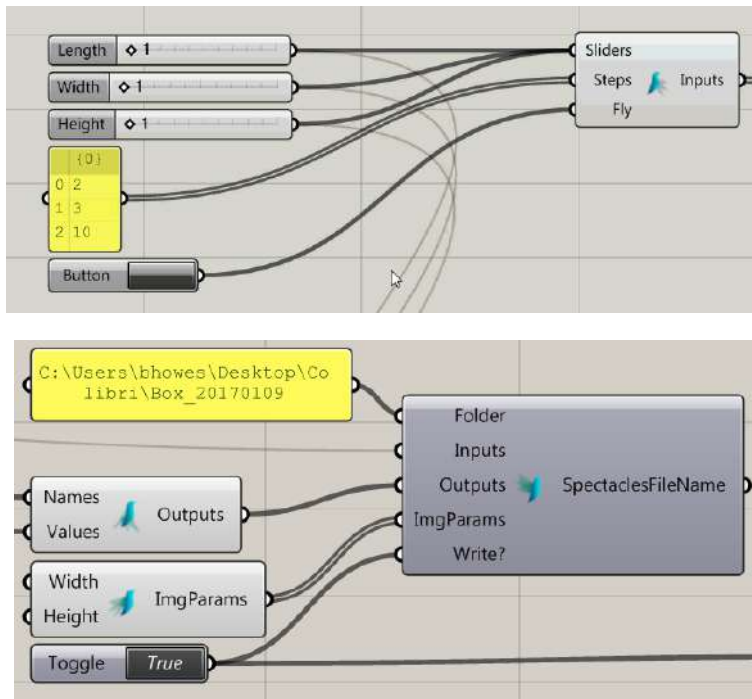


Figure 22. Les composants « *iterator* » et « *Agregator* » de Colibri

les données input de l'*Iterator*, les outputs (mesures de performance), et se charge de les générer dans un fichier data.csv. (Voir figure 22)

3.3.4. Thread

Thread, quant à lui, est un outil open source (Web-based), son interface permet de visualiser et de filtrer des groupes de données qui sont liées ou dispersés pour explorer les interrelations entre eux. ("Thread _ CORE studio). Dans sa nouvelle version, cet outil comprend une variété de graphiques interactifs, permettant de lire et comparer simultanément plusieurs indicateurs. Notre choix s'est porté sur cet outil pour créer un tableau de bord personnalisé et flexibles permettant d'examiner les interactions entre le potentiel solaire et la qualité environnementale des typologies choisies. Grâce à cette interaction, il est possible de proposer de multiples scénarios offrant un équilibre optimal.

3. Démarche méthodologique

Après la constitution de la base des données de la commune de Laghouat, la démarche méthodologique de cette thèse est répartie en trois (3) phases :

Étape 1 : Une approche combinée pour l'estimation du potentiel solaire de la commune.

Étape 2 : Un modèle d'agrégation statistique pour établir le bilan énergétique de la commune.

Étape 3 : Une approche paramétrique pour l'optimisation du potentiel solaire des typologies résidentielles.

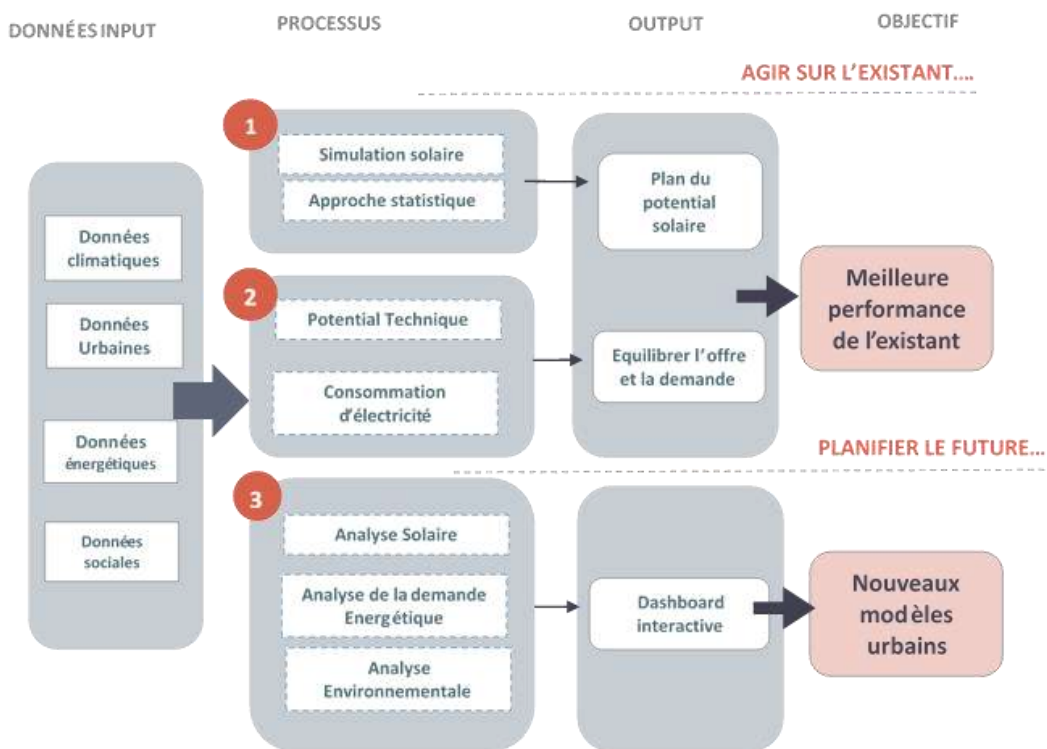


Figure 23. Le processus méthodologique adopte.

3.1. Etape 1 , une méthode combinée pour l'estimation du potentiel solaire

La méthodologie proposée est principalement basée sur deux parties majeures car elle combine des méthodes d'ingénierie et des méthodes statistiques. Tout d'abord, la méthode d'ingénierie fait référence à une simulation solaire réalisée pour des typologies résidentielles en 3D. Cette approche permet d'évaluer l'irradiation solaire, les pertes dues à l'ombrage et le taux de couverture du sol en fonction de la performance des panneaux PV sous différentes inclinaisons. L'étape suivante utilise la méthode statistique. Les résultats sont extrapolés à une l'échelle municipale pour la diffusion spatiale. La figure n.34 suivante illustre une vue d'ensemble de la méthodologie et chacune de ses étapes successives.

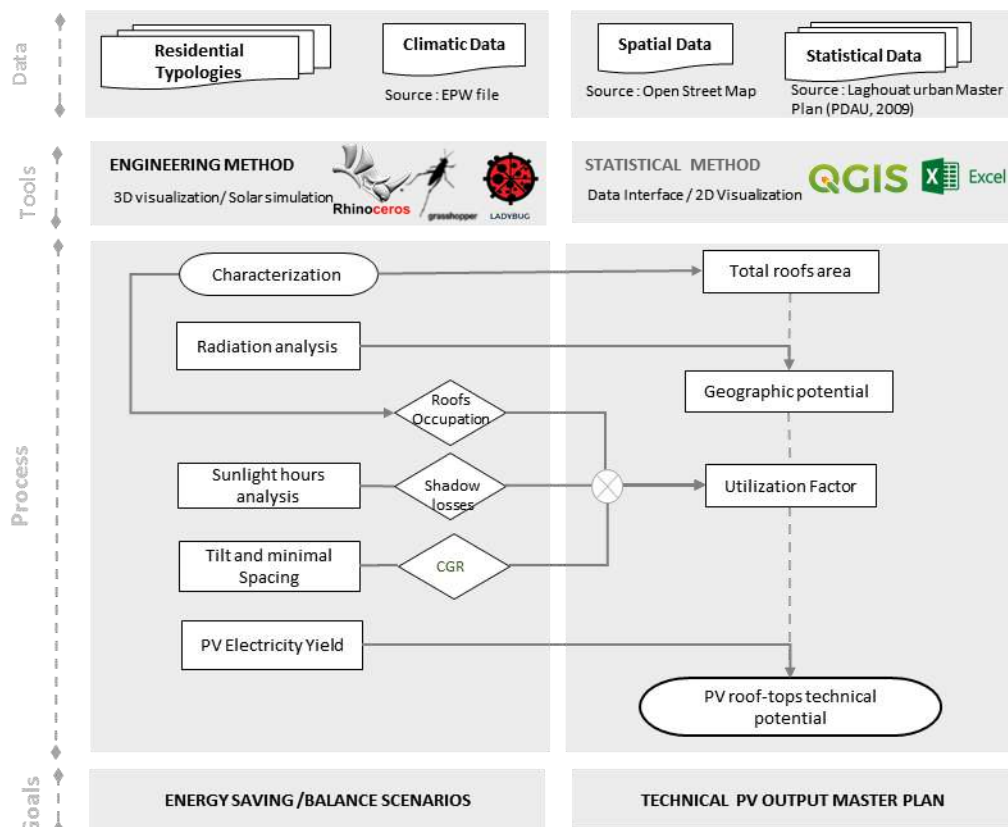


Figure 24. le workflow de la méthode combinée pour l'estimation du potentiel solaire.

. Source : fait par l'auteure

3.1.1. La méthode d'ingénierie

Cette partie est principalement basée sur une série de simulations effectuées sur les typologies résidentielles sélectionnées. Rhinoceros® est utilisé comme logiciel principal pour la modélisation 3D, qui est recommandé dans les domaines professionnels et académiques. Dans Rhinoceros®, le programme d'algorithme visuel Grasshopper offre une liste de plug-in et de caractéristiques environnementales, permettant d'effectuer les simulations solaires et photovoltaïques souhaitées. Parmi eux, le plugin *Ladybug* a été sélectionné. Comme expliqué précédemment, cet outil systématise le processus d'analyse, accélère les calculs et fournit des visualisations graphiques compréhensibles dans l'interface Rhino/Grasshopper. Les algorithmes employés par algorithmes employés sont expliqués et illustrés dans la figure n.36.

3.1.1.1. La caractérisation des typologies résidentielles

Une étape importante de cette étude consiste à tester l'adéquation du toit et sa capacité d'utilisation pour une installation photovoltaïque. Dans ce sens, les typologies résidentielles et leurs environnements urbains probables sont modélisés à l'aide de Rhinoceros. La caractérisation concerne une série de descripteurs, à savoir: la surface du toit, l'occupation du toit et le nombre d'étages. Des informations supplémentaires sur le taux d'occupation des ménages et la consommation électrique annuelle sont également requises. Dans le contexte résidentiel algérien, on distingue deux types résidentiels :

- Le logement collectif qui est principalement construits par des structures publiques (notamment l'Office de Promotion et de Gestion Immobilière (OPGI), selon différentes formules financées en partie par le gouvernement. A cet égard, leur construction est réglementée selon un cahier des charges prédéfini au niveau régional. Ainsi, les projets sont établis en fonction de prescriptions urbanistiques et architecturales liées à l'organisation spatiale et fonctionnelle et au système de construction.

- Les maisons individuelles font généralement référence à des auto-constructions et varient des bâtiments traditionnels aux bâtiments modernes. En raison de l'absence de données précises, notre étude retient uniquement les constructions individuelles réalisées dans le cadre d'opérations de lotissement, qui sont réglementées dans le cadre du plan directeur d'urbanisme. Ces documents établissent des orientations en termes de taille des parcelles, de leur couverture bâtie et de la hauteur autorisée.

3.1.1.2. L'analyse du rayonnement

L'analyse du rayonnement solaire est basée sur les données d'une année météorologique typique (TMY). Cet ensemble de données est disponible dans l'outil *ladybug* au format *EnergyPlus weather* (EPW). Le composant d'analyse solaire de *ladybug* utilise le moteur de Radiance pour générer une distribution des irradiances du cumulée du ciel basée sur le fichier métrologique de Laghouat. L'approche du ciel cumulé permet de calculer le rayonnement du ciel pour l'année entière et le représente par un patch coloré en forme de dôme coloré. Le rayonnement solaire annuel reçu sur les toits est exprimé en une valeur numérique par mètre carré en tant que kWh/m² et l'intensité pourrait même être perceptible à travers une maille colorée dans Rhino (Voir figure n.36).

3.1.1.3. L'analyse des heures d'ensoleillement

L'incorporation des pertes d'ombrage des éléments permanents de la toiture ou de l'environnement du quartier est nécessaire pour une évaluation précise du potentiel PV. Ce coefficient varie significativement en fonction du type de bâtiment et des contraintes sur les toits. Etant donné que la méthodologie utilisée dans cette étude est basée sur le modèle 3D, des modèles d'ombrage dans diverses combinaisons d'orientation des bâtiments avec des hauteurs aléatoires et uniformes a été exécuté.

Les résultats reflètent un pourcentage d'ombrage sur tous les toits des typologies résidentielles. En utilisant le composant d'analyse des heures d'ensoleillement de *Ladybug*, une trajectoire du soleil en 3D est créée. La trajectoire du soleil fournit une gamme de vecteurs solaires relatifs aux données horaires et journalières souhaitées.

L'analyse est effectuée sur la base des vecteurs du solstice d'hiver (21 décembre) afin de réaliser l'évaluation dans les pires conditions d'ombres et calculer le nombre d'heures d'ensoleillement direct reçues par les toits. Ces vecteurs sont enregistrés dans le composant et permettent de générer des courbes de contour représentant les ombres sur la surface de la toiture (Voir figure n.36).

3.1.1.4. Le rapport de couverture au sol

Sur les toits plats, des ombres peuvent également se produire entre les panneaux. La latitude et le climat sont des facteurs cruciaux pour choisir les dispositions appropriées permettant de minimiser l'auto-ombrage des panneaux. Le taux de couverture au sol (CGR) correspond à la surface des panneaux PV divisée par la surface du toit après prise en compte de la marge de recul (SBR). Le SBR, quant à lui, représente l'écart horizontal entre les panneaux photovoltaïques divisé par la hauteur verticale des panneaux PV, qui est lié à l'angle d'inclinaison et à l'ombre qui en résulte. Par conséquent, pour un emplacement donné, le CGR dépend, notamment, de ces principales variables : les dimensions des panneaux PV, l'espacement minimal des panneaux, l'angle d'inclinaison et l'azimut (Voir figure n.36)

Sur la base du fichier climatique de Laghouat, la composante " The Tilt and Orientation Factor " (TOF) de *Ladybug* est utilisée pour indiquer l'inclinaison optimale qui reçoit la plus grande quantité de rayonnement solaire avec l'espacement minimal entre les panneaux, évitant ainsi l'auto-ombrage.

Enfin, le CGR et le SBR sont ensuite calculés selon les équations ci-dessous :

$$\text{SBR} = d / h$$

$$\text{GCR} = 1 / (\cos \beta + \text{SBR} * \text{Sin } \beta) \quad (1)$$

où d est l'espacement entre les panneaux et h est la hauteur verticale en fonction de l'angle d'inclinaison ; β est l'angle d'inclinaison (voir figure 35).

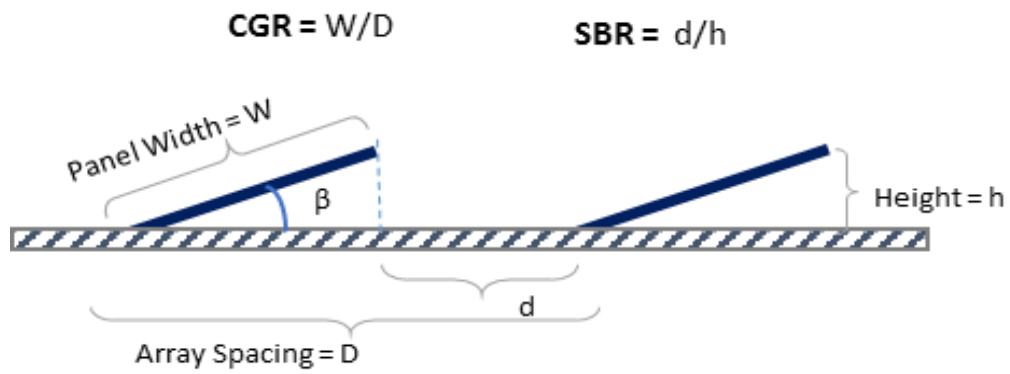


Figure 25. schema démonstratif du CGR et SBR

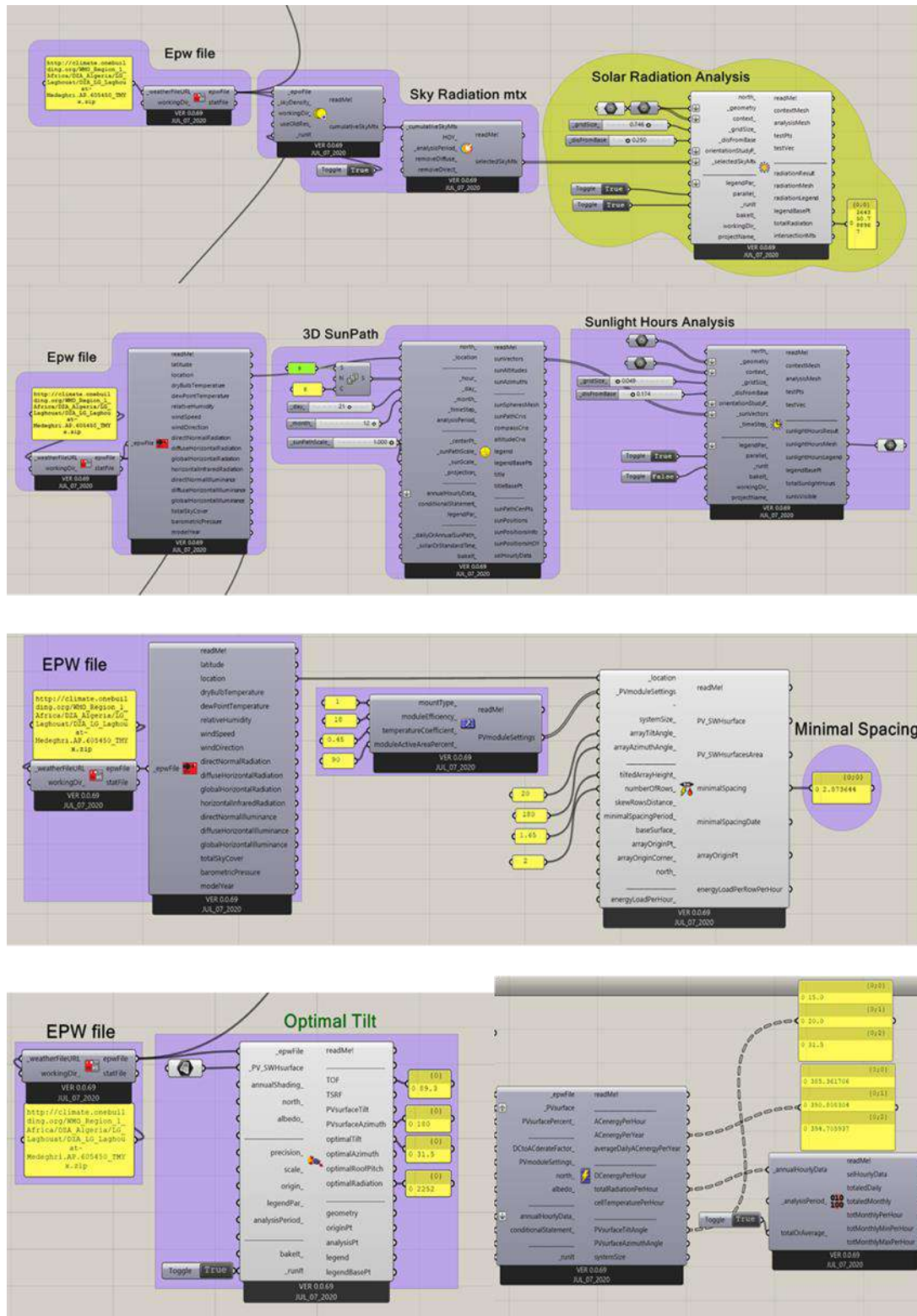


Figure 26. Les algorithmes visuels pour la simulation solaire

3.1.2. La méthode statistique du SIG

L'objectif de cette étape est de fournir les données scientifiques nécessaires pour aider les acteurs dans la planification de l'énergie solaire. Toutes les simulations envisagées doivent être extensibles et disponibles pour l'ensemble de la commune afin de donner une estimation réelle du potentiel photovoltaïque. Par conséquent, les résultats de l'analyse technique sont extrapolés et cartographiés à l'échelle de la ville en suivant les étapes ci-dessous.

3.1.2.1. La surface totale des toits

Tout d'abord, une estimation de la surface de toit disponible au niveau de la commune est nécessaire. L'ensemble des données requises sont extraites du Plan Directeur Urbain de Laghouat (PDAU Laghouat, 2009). Celui-ci présente le nombre de logements ainsi que des données statistiques sur les bâtiments sélectionnés. Pour les bâtiments à plusieurs étages, la surface de toit disponible (AMS.roofs) est calculée par type de bâtiment selon les équations suivantes (Equations 3 et 4) :

$$A_{MS. Roofs} = (A_{app/f}(1+A_{circ})) * Nr_{bui} \quad (2)$$

$$A_{app/f} = A_{app} * Nr_{app/f} \quad (3)$$

$A_{app/f}$ est la surface résidentielle totale par étage, A_{circ} est la surface moyenne de circulation horizontale et verticale, Nr_{bui} est le nombre de bâtiments à plusieurs étages, A_{app} est la surface d'un appartement, $Nr_{app/f}$ est le nombre d'appartements par étage .

Pour l'habitat individuel, les données disponibles concernent la surface de la parcelle et l'emprise au sol . Les surfaces de toiture (ASF.roofs) sont calculées comme suit :

$$\text{ASF.roofs} = (A_{\text{plot}} * \text{CR}) * \text{Nr}_{\text{plot}} \quad (4)$$

Où A_{plot} est la superficie de la placette, CR est le sol de couverture réglementaire et Nr_{plot} est le nombre de parcelles .

3.1.2.2. La carte du potentiel géographique

Le potentiel géographique correspond au rayonnement solaire annuel reçu sur les toits des bâtiments résidentiels. Il est calculé en multipliant la surface totale du toit et l'intensité solaire. La surface totale du toit déjà estimée à l'étape précédente, et l'intensité annuelle du rayonnement solaire est calculée dans la partie d'ingénierie. En utilisant le système d'information géographique QGIS, le résultat est représenté sur une carte géographique.

3.1.2.3. Le facteur d'utilisation

Sur la base des résultats de l'ingénierie, le facteur d'utilisation (UF) est identifié pour chaque typologie. Il représente la fraction effective de la surface de toit utilisable pour une installation PV après avoir éliminé les pertes dues à l'ombrage, l'espacement des panneaux et l'occupation du toit. Il est calculé selon l'équation suivante (Eq.6) :

$$\text{UF} = ((A_{\text{Roofs}} * (1 - (\text{Ob}_R + \text{Sh}_L))) * \text{GCR} \quad (5)$$

Où A_{Roofs} est la surface totale des toits qui pourrait se référer à ASF dans le cas de maisons individuelles et A_{MS} dans le cas d'appartements à plusieurs étages ; Ob_R et Sh_L sont, respectivement, les fractions d'occupation des toits et de pertes par ombres portées de chaque typologie et GCR est le rapport de couverture au sol.

3.1.2.4. La cartes de potentiel technique

Le potentiel technique fait référence à la quantité d'électricité produite sur les toits. Le calcul implique de prendre en compte la surface effective de la toiture,

l'irradiation solaire, les modules PV et l'efficacité du système. Dans cette étude, nous supposons une configuration simplifiée des modules avec une efficacité moyenne de 17%. Le rendement PV est calculé selon l'équation suivante :

$$\text{Technical } p = (A_{\text{total}} * \text{GR}) * \text{UF} * \text{PR} \times \text{Me} \quad (6)$$

Où A_{total} est la surface totale du toit, GR est le rayonnement solaire global annuel, PR est un ratio qui prend en compte les pertes d'énergie PR= 75%, Me est le taux d'efficacité du module dans des conditions d'essai standard Me =17% et UF est le facteur d'utilisation.

3.2. Etape 2, un modèle d'agrégation statistique pour établir le bilan énergétique de la commune.

Notre objectif dans cette étape vise à établir le bilan énergétique entre la demande énergétique de la commune et son potentiel de production. Cette approche est basée sur le modèle *GUUD (Geographical Urban Units Delimitation)* qui a été développé par Amado.M. Ce dernier repose sur une approche cellulaire à l'échelle de la ville, en définissant un ensemble d'unités urbaines, inspirée de la théorie des automates cellulaires, qui peuvent être considérées comme négatives, positives ou neutres en fonction du différentiel entre leur potentiel respectif d'approvisionnement en énergie solaire et les modèles de consommation d'énergie existants. Le concept d'énergie nette zéro est ainsi déplacé du bâtiment à l'unité urbaine (Amado & Poggi, 2014).

Un tel modèle d'agrégation nous permet également de mettre en relation une variété de déterminants morphologique tels que le tracé des rues, l'orientation des bâtiments, la densité et l'occupation des sols, qui ont une grande influence sur la production et la consommation d'énergie solaire. Cette étape est réalisée au sein de QGIS. Nous adoptons un point de départ pour la délimitation des unités urbaines prédéfinis dans la base de données géographiques constituée en analysant les

synergies entre les unités urbaines de la commune, qui ne sont pas nécessairement à net-zero-energy.

Au niveau opérationnel, cette étape est élaborée sur la base des résultats de l'étape précédente. L'agrégation des données du potentiel photovoltaïque au niveau des unités urbaines de la commune permet d'établir le bilan énergétique et de classer les unités urbaines en 4 types :

- Unité Positive ;
- Unité Négative ;
- Unité Net zero ;
- Unité Nearly- zero.

Sur la base de cette classification, un plan d'interrelation du système énergétique entre les unités urbaines est établi. Selon ce plan, nous proposons un schéma de réseau intelligent qui gère les unités existantes en fonction du bilan énergétique afin d'optimiser l'équilibre entre l'offre et la demande d'énergie.

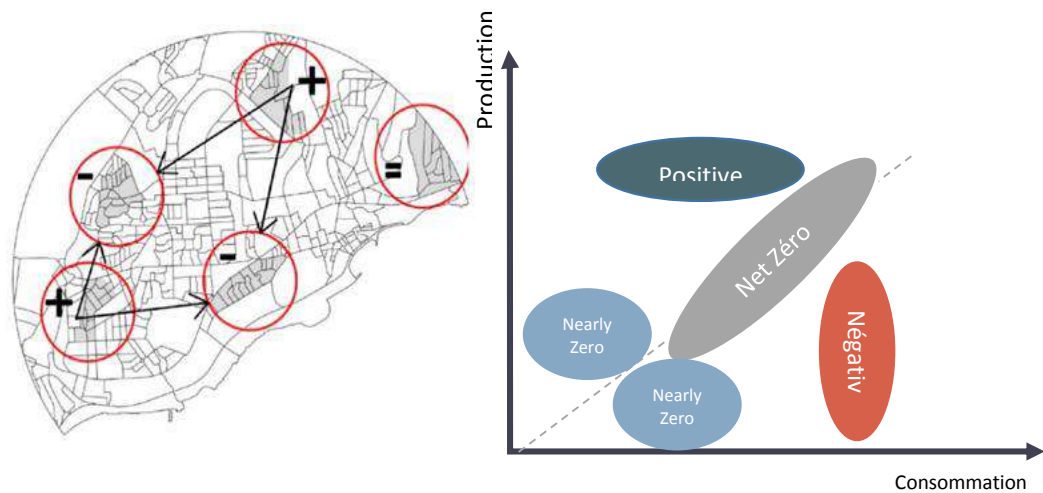


Figure 27. Le model d'agrégation statistique. (Source :Amado & Poggi, 2014) adapté par l'auteur

3.3. Etape 3, une méthode paramétrique pour l'optimisation du potentiel solaire des typologies résidentielles

Dans cette étape, en s'appuyant sur les outils numériques, une étude paramétrique a été établie permettant d'explorer les interrelations entre les typologies résidentielles, le potentiel solaire et le confort extérieur. Notre objectif est de trouver un compromis entre les considérations énergétiques et environnementales quantitatives dans la conception des typologies résidentielles dans le contexte climatique de Laghouat pour guider les conceptions futures à travers des indications fiables. Les données d'input, les paramètres de simulation et les mesures de performances sont détaillés ci-dessous :

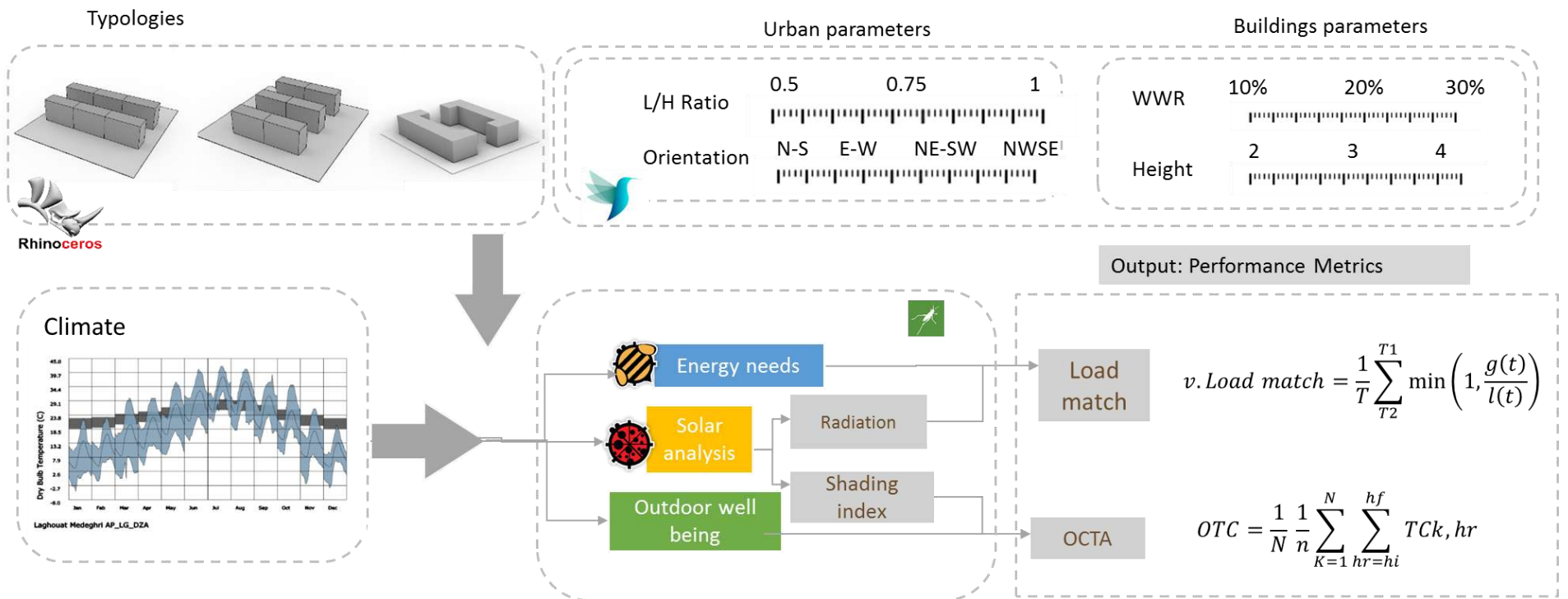


Figure 28. Schéma récapitulatif de l'approche paramétrique.

3.2.1. Les données d'input : Typologies et paramètres variables

Le composant central des typologies résidentielles est le 'bloc'. En effet, les quartiers résidentiels sont générés en modifiant la disposition spatiale de ces blocs-type. Trois typologies théoriques simplifiées ont ensuite été conçues, pour représenter les formes d'agencements résidentiels les plus utilisés à Laghouat. Il s'agit de : bâtiments barres, groupés et à cour intérieure.

D'autre part, sur la base de la littérature examinée sur le potentiel solaire à l'échelle du quartier (dans le chapitre 2, Section 2), les paramètres variables qui ont le plus d'impact sur la consommation énergétique et le potentiel solaire ont été renseignés. Parmi les différents indicateurs associés à la performance énergétique à l'échelle architecturale et urbaine, nous avons sélectionné :

- Deux paramètres architecturaux relatifs au : le rapport fenêtre/mur (WWR) et le nombre d'étages ;
- Deux paramètres urbains : le rapport (H/L) et l'orientation des voies.

Par conséquent, pour couvrir tous les variables de ces paramètres, un nombre de 108 scénarios de stimulation différents ont été calculés pour chaque typologie. Ce qui fait au totale 324 simulations.

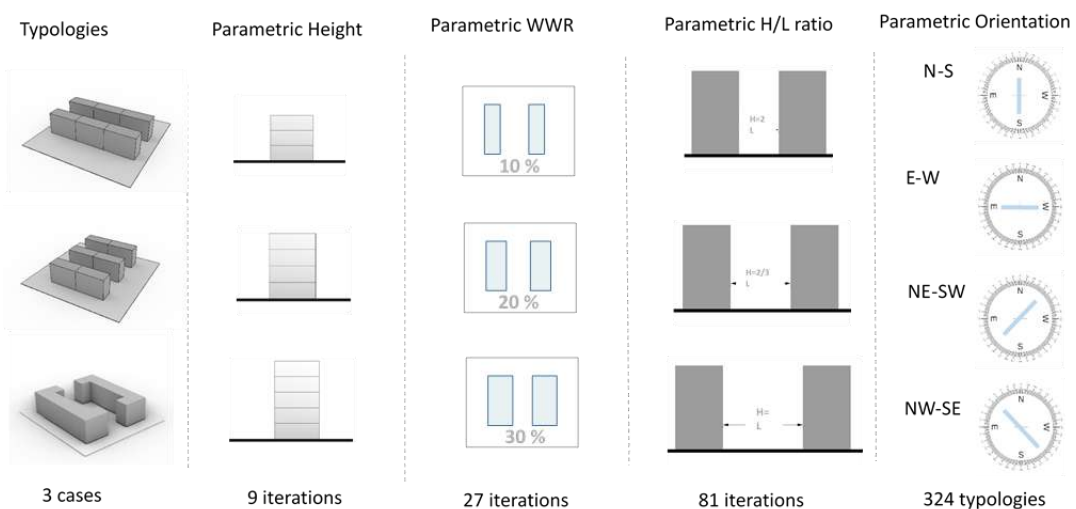


Figure 29. Les données inputs de l'approche paramétriques (fait par l'auteure).

3.2.2. Les paramètres de simulation

Toutes les simulations détaillées ci-dessous ont été déclenchées en changeant chacun des paramètres input via *colibri*.

3.2.2.1. La simulation solaire

L'objectif principal de la simulation solaire est de mesurer l'association entre l'exposition solaire nécessaire à la production d'énergie et le confort thermique nécessaire au bien-être extérieur. Cette démarche a été largement motivée par l'exploration d'un équilibre entre la conception solaire passive et active qui pourrait être mieux adapté aux conditions climatiques chaudes. En effet, l'analyse du rayonnement solaire s'est appuyée sur le même outil *Ladybug* avec le même processus expliqué dans l'étape 1. Cette analyse solaire a été réalisée à la fois pour étudier l'exposition solaire des blocs résidentiels et pour mesurer des heures d'ensoleillement sur le socle urbain pour les 324 combinaisons. Le seuil des irradiances solaires considéré pour l'installation photovoltaïque (PV) sur les toits et des surfaces de façade latérales est d'une valeur égale ou supérieure à 1000 kWh/m².

Ainsi, une analyse préliminaire est effectuée afin de mettre en évidence les surfaces recevant une valeur égale ou supérieur au seuil mentionné requises pour le calcul de la production d'énergie PV. Cette énergie est calculée en utilisant le composant de surface photovoltaïque *Ladybug*, basé sur une efficacité de module de 17% et un pourcentage de couverture de surface PV de 60%. Il s'agit du facteur d'utilisation défini dans la première étape mais en éliminant les ombres incidents.

Dans cette étude, les indices d'ombrage ont été construits sur l'hypothèse que l'ombrage solaire à l'extérieur est avantageux par rapport à l'exposition solaire dans un environnement chaud. L'indice d'ombrage annuel (SI) est alors défini comme le rapport des valeurs d'insolation cumulées annuelles obstruées et non obstruées sur toutes les heures de l'année, déduit d'un pour représenter la valeur d'ombrage plutôt que la valeur d'exposition.

La mesure des heures d'ensoleillement, quant à elle, a été effectuée par le composant *sun-path* de *Ladybug*, qui produit des vecteurs solaires basés sur l'emplacement, et qui sont ensuite utilisés pour mesurer le nombre d'heures d'ensoleillement direct obtenues par une surface d'entrée donnée. La taille de la grille pour les expériences sur les heures d'ensoleillement a été fixée à 3,5 m, tout comme la taille de la grille pour l'étude du rayonnement. Cette valeur a été calculée à chaque itération pour chaque point et multipliée autour des limites du modèle suivant cette équation :

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^{np} SI_p}{np} \quad (8)$$

où SI est la moyenne des valeurs SI p pour un nombre n de points évalués dans une section urbaine. Où SI p est l'indice d'ombrage pour un point donné p, Insolation p est la valeur d'insolation annuelle cumulée pour un point donné et Insolation r est la valeur d'insolation annuelle cumulée pour une section urbaine non obstruée.

3.2.2.2. La simulation de la demande énergétique

Pour la demande de l'énergie, une stratégie de zonage thermique « *core and shell* » basée sur l'algorithme général de *honeybee* a été adoptée afin de créer des modèles énergétiques de bâtiments multizones. Cet algorithme est utilisé pour les modèles de masse de conception urbaine et schématique afin d'accélérer la modélisation énergétique du bâtiment au début de la conception (Voir Figure).

Suivant cette stratégie, le plancher est divisé entre les zones internes et les zones périphériques, avec une division secondaire des zones périphériques en fonction de leur orientation solaire. Selon l'orientation, ladite division considère la distribution des gains solaires comme un facteur clé de la performance énergétique. La profondeur des zones périmétriques a été fixée à 3m pour les bâtiments résidentiels. Les conditions de frontière interne entre les zones internes ont été définies comme des murs solides dans les bâtiments résidentiels.

La demande énergétique est évaluée par les composants du plugin *Honeybee Grasshopper*, simultanément à l'évaluation de la température de la surface externe en utilisant les mêmes paramètres et la méthode de zonage thermique. Pour chaque exécution, la demande de l'électricité a été enregistrée représentant l'utilisation totale normalisée (en kWh).

2.2.2.3. L'indice thermique universel de climat pour le confort extérieur

L'indice universel de climat thermique (UTCI) correspond à une référence reconnue mondialement qui met en relation l'humidité relative, la température radiante moyenne (MRT), la vitesse du vent et la température de l'air pour prédire la température équivalente qu'une personne ressentirait dans une atmosphère extérieure donnée en fonction de ces paramètres climatiques. Afin d'étudier la gamme annuelle du confort thermique extérieur pour divers environnements urbains, 8760 valeurs UTCI (correspondant au nombre d'heures dans une année) ont été automatiquement déterminées dans *Grasshopper* pour chaque point sur le socle urbain autour des blocs résidentiels, à l'exception de la température radiante moyenne (MRT) qui a été calculée à l'aide de *Honeybee* désignés en suivant la méthodologie proposée par Mackey et al. (Mackey, Galanos, Norford, & Roudsari, 2017). Le calcul du MRT est basé sur une évaluation détaillée de la température de surface pour le niveau de rez-de chaussé de chaque typologie. Les valeurs de MRT pour chaque point sont ensuite calculées également en utilisant les facteurs de vue de chacun des points sur les surfaces d'Energy Plus. Pour cette simulation et pour réduire le temps de calcul, l'étude est basée sur une semaine typique d'été.

3.2.3. Les données output : Mesures de performance

3.2.3.1. L'indice de correspondance des charges (L_m %) :

Dans cette phase, l'indicateur L_m % est utilisé pour permettre une compréhension plus approfondie et offrir une meilleure interprétation de la capacité de la typologie à fonctionner en équilibre énergétique dans un intervalle horaire, quotidienne et mensuelle plus élevée. Ainsi, l'intensité de la synchronisation énergétique ou la capacité de la typologie d'atteindre le Net-zero energy peut être efficacement

indiquée. Cet indice est apparu comme l'indicateur le plus efficace pour refléter le taux de couverture temporelle de la demande totale d'énergie par la production d'énergie renouvelable sur site. Il est défini comme la valeur moyenne sur une période d'évaluation pour expliquer comment la production sur site couvre la charge d'énergie PV (Šúri, Huld, Dunlop, & Ossenbrink, 2007; Yuan, Farnham, Emura, & Lu, 2016). Plus l'indice est élevé, plus la correspondance entre la consommation et la production sur site est bonne.

Les valeurs Lm % ont été calculées pour une valeur mensuelle moyenne annuelle. Les formules décrivant l'indice de correspondance de la charge varient de très générales (Chow, Li, & Fung, 2016; Temby et al., 2014), la formule la plus détaillée est utilisée :

$$v . Load\ match = \frac{1}{T} \sum_{T2}^{T1} \min \left(1, \frac{g(t)}{l(t)} \right) \quad (9)$$

où g représente les valeurs de production d'énergie (en kWh), l est la charge énergétique, traitée par des simulations séparées sur la charge et la production, t est l'intervalle de temps utilisé (heure), et T correspond au nombre d'échantillons de données dans la période d'évaluation, pour l'intervalle de temps horaire, le nombre d'échantillons est de 8760.

3.2.3.1. Confort thermique extérieur

La mesure du confort thermique extérieur est définie par le pourcentage d'heures d'une période donnée pendant lesquelles la température se situe dans la plage "sans contrainte thermique" (c'est-à-dire entre 9 et 26 °C) (Pohekar & Ramachandran, 2004; Schöttl, Ordóñez Moreno, van Rooyen, Bern, & Nitz, 2016; Wang, Cot, Adolphe, Geoffroy, & Sun, 2017). Comme expliqué précédemment, le travail actuel considère (UTCI) comme référence. Pour les évaluations du confort thermique, nous nous basons sur une semaine typique d'été extérieur en été, en prenant en compte les heures de la journée (08:00h-18:00h). Les résultats présentent la valeur moyenne dans les points mesurés du modèle urbain.

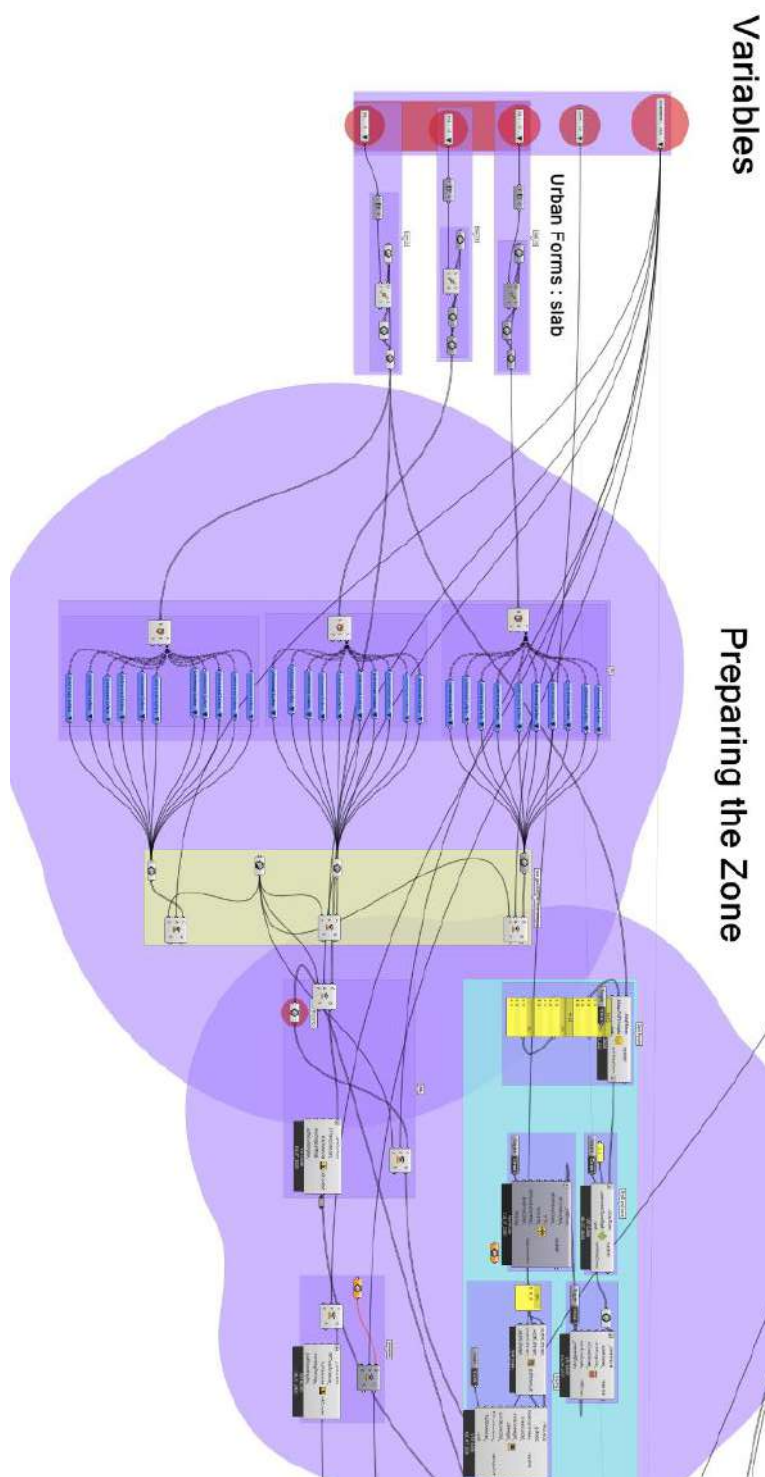
La mesure du confort thermique extérieur est calculée selon l'équation suivante définie par (Nazarian, Acero, & Norford, 2019) :

$$OTC = \frac{1}{N} \frac{1}{n} \sum_{K=1}^N \sum_{hr=hi}^{hf} TCk,hr \quad (10)$$

$$TCk,hr = \begin{cases} 1 & \text{if } \in A \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

où TCk,hr , est l'indice de confort thermique , A est le "critère d'acceptabilité du confort thermique", c'est-à-dire la plage de confort thermique que l'on considère comme acceptable. N est le nombre total de jours d'occupation, hi et hf désignent le nombre de jours d'occupation et le nombre de jours d'occupation.

Figure 31. Préparation des zones et des variables des typologies résidentielles pour la simulation



Conclusion

Le présent chapitre a présenté le protocole et la démarche méthodologique qui guident notre réflexion. En se référant aux hypothèses de départ, notre approche a suivi les étapes ci-dessous :

- En premier lieu, la constitution d'une base de données de la consommation de l'énergie à l'échelle de la commune.
- En deuxième lieu, l'évaluation du potentiel physique et technique du résidentiel existant dans la commune.
- En troisième lieu, la proposition de scénarios d'optimisation des typologies résidentielles en assurant un équilibre entre les irradiations solaires nécessaires à la production d'énergie et les conditions climatiques de Laghouat pour les futures opérations d'urbanisation.

Cette démarche est établie par un système innovant couplant plusieurs outils numérique avancée. Le but est d'avoir des résultats qui peuvent être intégrés dans le processus de planification ciblant différentes échelles spatiales

Partie 2.

Evaluation du Potentiel Solaire : Application
à la ville de Laghouat.

La deuxième partie de cette thèse rassemble les résultats des trois étapes méthodologiques expliquées dans la partie précédente. Il s'agit d'une discussion finale qui relie ces étapes et met en évidence les principaux résultats. Tout d'abord, dans le chapitre 4, nous nous concentrons sur l'analyse du cas d'étude dans son milieu naturel, urbain et énergétique. Ceci implique la collecte et la sélection des données qui déterminent la recherche par la constitution d'un socle numérique via le SIG. Ce dernier servira d'infrastructure spatiale pour analyser, cartographier et interpréter les résultats. Une attention particulière est accordée à l'analyse du secteur résidentiel afin de déterminer des typologies résidentielles représentatives sur lesquelles nous basons notre recherche.

Le chapitre 5 détermine le potentiel solaire progressivement, en commençant par le potentiel physique, urbain et enfin technique. Cette démarche graduelle permet de fournir une estimation réelle de la capacité du secteur de l'habitat à recevoir les installations photovoltaïques, le niveau de performance actuel des typologies résidentielles et la possibilité d'atteindre le degré maximale en termes d'énergie zéro. Sur la base des résultats de l'étape précédente, notre objectif consiste à améliorer le potentiel solaire des typologies résidentielles pour optimiser le bilan énergétique et atteindre le net-zéro.

Cependant, lorsque qu'on élargit le champ des performances solaires aux considérations environnementales, il est question d'investiguer le compromis entre les avantages de l'exposition solaire du côté de l'offre et les inconvénients d'une disponibilité élevée du côté de la demande et le confort extérieur dans les climats chauds.

Le chapitre 6 s'interroge sur les considérations d'exposition solaire recherchée pour optimiser le potentiel photovoltaïque et son impact sur le confort thermique extérieur dans différentes typologies résidentielles représentatives du cas d'étude. En présentant les résultats de l'approche paramétriques, nous offrons des indications et des scénarios multiples en termes d'équilibre souhaitable entre les mesures de performance énergétique et environnemental

Introduction du cas d'étude : la commune de Laghouat

Introduction :

Ce chapitre présente le cas de Laghouat dans son milieu naturel, urbain et socioéconomique et énergétique. Tout d'abord, nous examinons le contexte climatique de la région et de la commune spécifiques pour identifier les données météorologiques typiques qui seront utilisées pour l'évaluation solaire le long de cette partie. Par la suite, il convient de réunir toutes les informations disponibles afin de mettre en œuvre une base de données via le SIG. Notre objectif est de fournir un socle spatial permettant de réunir les informations géographiques de la commune. Ces derniers servent d'infrastructure spatiale pour notre approche analytique. Il s'agit de l'exploitation des données existantes, mais aussi le géo référencement des résultats souhaités afin de renforcer le processus de planification de l'énergie solaire. Enfin, une analyse couvrant la composition urbaine de la commune et son secteur résidentiel particulièrement est établie afin d'identifier les typologies résidentielles représentatives selon les caractéristiques géométriques qui influent sur le potentiel solaire.

1. Situation Géographique

La wilaya de Laghouat fait partie des neuf wilayas (9) steppiques ainsi que des wilayas du sud. Partageant ses limites avec deux wilayas des hauts plateaux (Tiaret et Djelfa) et deux autres du Sud qui sont (El Baydh et Ghardaïa). Elle est composée de Huit daïras et Vingt Quatre Communes. La commune de Laghouat est chef-lieu de la Wilaya. Elle s'étend sur le plateau saharien du côté Sud. Cette

agglomération de nature mixte entre les hautes terres d'un côté et les basses terres de l'autre, constitue une liaison et une zone tampon entre le Nord et le Sud du pays. Retraccée lors du découpage de 1985, la commune de Laghouat est structurée en (Voir figure n.31) :

- Un centre urbain
- Une zone agricole (Bordj-Senouci)
- Une vaste zone Steppique (au Nord).

Située au centre du territoire de la Wilaya, sur l'axe de la route rational RN 1 reliant Alger à l'extrême Sud du pays, la commune contribue à un flux d'échange socio-économique très important dans l'organisation de l'espace et le développement de la région. Cette position lui confère un rôle attractif parmi toutes les agglomérations environnantes, jouissant d'une prépondérance politique et économique dont le rayonnement régional confirme bien sa position de chef-lieu de wilaya, en tant que porte ouverte du grand -Sud.

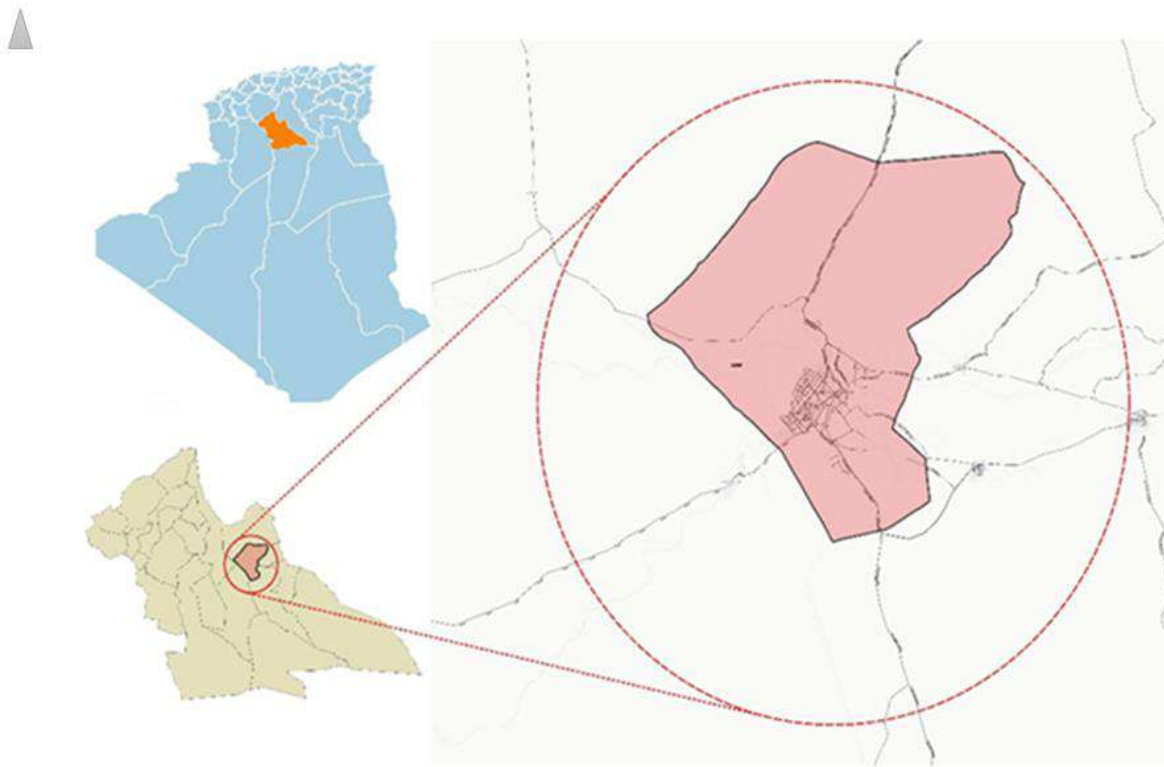


Figure 32. Situation Géographique et localisation de la commune de Laghouat.

2. Analyse du milieu Naturel

De par sa position géographique au piémont de l'Atlas Saharien, la wilaya de Laghouat est marquée par trois étages bioclimatiques (Voir figure 32). En effet, 62% de du territoire de la wilaya couvrant neuf communes (9) est caractérisé par un climat de type saharien ; 25 % est classé comme un climat aride englobant sept communes (7) et environ 13% du territoire couvrant les huit communes (8) restantes se qualifie comme un climat semi-aride.

Le commun chef-lieu se situe dans la zone du type saharien. Pour les données climatiques et du rayonnement solaire nécessaires pour nos simulations, cette recherche s'est basé sur un fichier représentant les données climatiques d'une année typique « TMY 3 ». Les TMY sont très reconnus pour la modélisation des systèmes d'énergie renouvelable, car ils fournissent un ensemble de données relativement concis à partir duquel il est possible de développer des estimations de la performance des systèmes solaires.

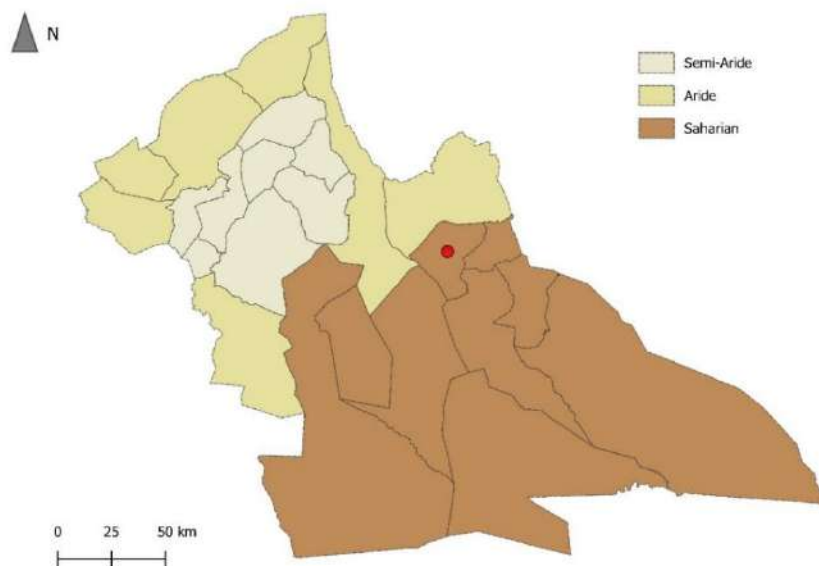


Figure 33. Les étages bioclimatiques de la wilaya de Laghouat.

Source : conservation des forêts de la wilaya de Laghouat (2017) , modifiée par l'auteur.

Les fichiers TMY contiennent des données d'une année complète construites à partir de (8760 heures) choisis comme étant les plus typiques parmi les années qui composent la base de données. Ils sont les produits d'une analyse statistique et un processus de pondération de paramètres météorologiques durant la période entre 1958 et 2018. Le graphe n.32 ci-dessous montre l'année source de chaque valeur typique. Chacune de ces valeur typique a été sélectionnée sur la base de sept (7) indices quotidiens comprenant les températures maximales, minimales et moyennes du bulbe sec, du point de rosée, de la vitesse maximale et moyenne du vent et du rayonnement solaire. Les fichiers originaux sont issus de la station métrologique de l'aéroport Meghedri.

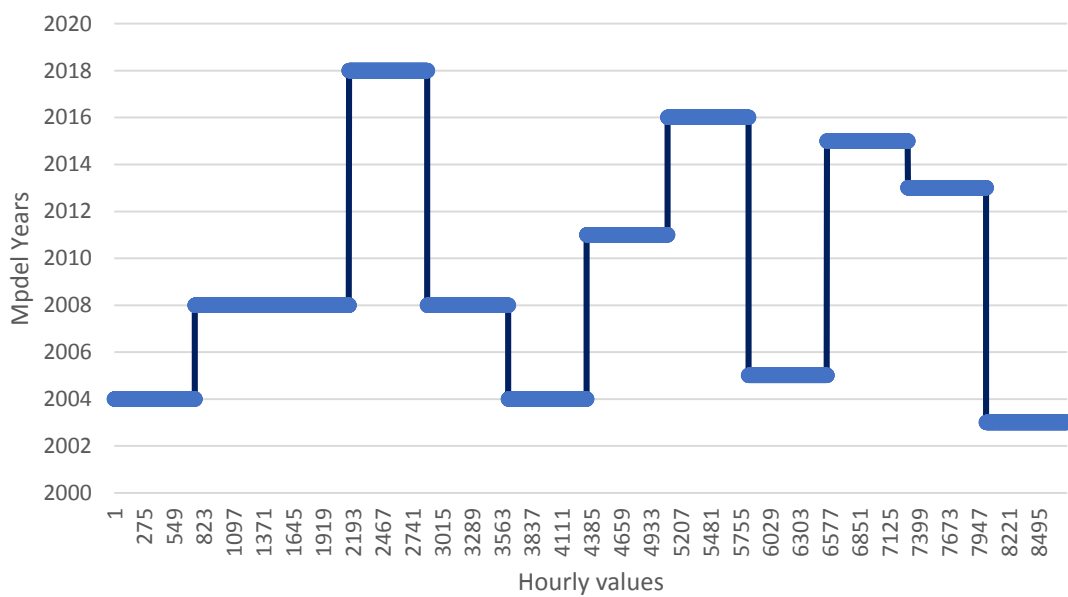


Figure 34. Graphe démontrant l'année source de chaque valeur horaire utilisée dans le TMW 3.
Source : Fait par l'auteur, issu des données EPW

2.1. Température et précipitations

Le climat de la commune chef-lieu de Laghouat est de type Saharien marqué par un été très chaud et un hiver froid. L'analyse des températures constitue un facteur clé pour comprendre les niveaux de confort thermique intérieur et extérieur, mais également pour expliquer les besoins énergétiques des bâtiments. La figure n.34 montre les variations de température quotidienne le long d'une année typique. Les moyennes mensuelles maximales sont enregistrées en général pendant le mois de juillet et Août. En effet, durant une semaine typique d'été (entre 24 août -30 août) la température quotidienne moyenne varie entre 29°C et 30°C tandis que la semaine la plus chaude s'étend entre le 29/06 et le 07/07, où les températures maximales peuvent atteindre 42°C.

La figure n.35 indique les variations horaires d'une journée typique de chaque mois. Dans le but d'étudier les conditions les plus défavorables en été à l'intérieur des bâtiments, l'analyse des *Cooling degrés Days* a été établie afin de mesurer la période où la consommation d'énergie liée au confort thermique est la plus élevée. La température de base pour le calcul des CDD et HDD est de 18°C pour le chauffage et de 25°C pour la climatisation. Le graph n.36 montre que les besoins de climatisation débutent depuis le mois d'avril jusqu'à à la fin du mois de septembre. Le pic est enregistré durant le mois de juillet pendant lequel les variations horaires d'une journée typique qui sont considérées comme '*le Cooling design Day*' soit le jour où les besoins de climatisation sont le plus élevés.

En ce qui concerne le confort thermique extérieur, la figure n.37 révèle une classification des températures horaires moyennes qui peuvent être ressenties à l'extérieur selon l'indice universel de climat. Cette classification se base sur la température de l'air pour prédire la température équivalente qu'une personne ressentirait dans une atmosphère extérieure.

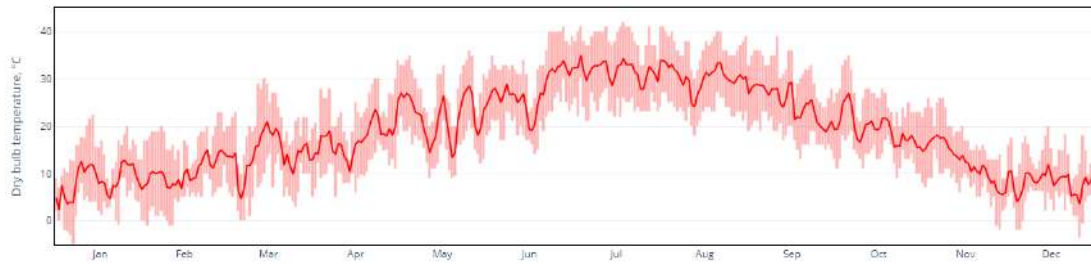


Figure 35. Les variations des températures moyennes, maximales et minimales quotidiennes à Laghouat.

Source : CBE Climat Tool modifié par l'auteur

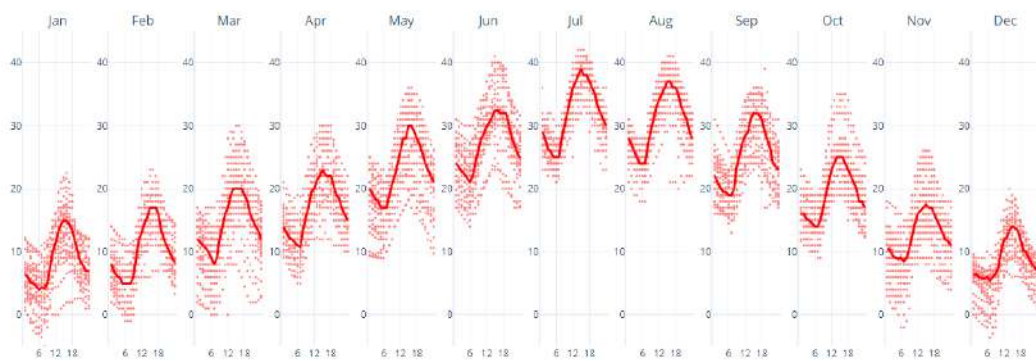


Figure 36. Les variations horaires de températures moyennes, minimales et maximales pendant une journée typique de chaque mois à Laghouat.

Source : CBE Climat Tool modifié par l'auteur.

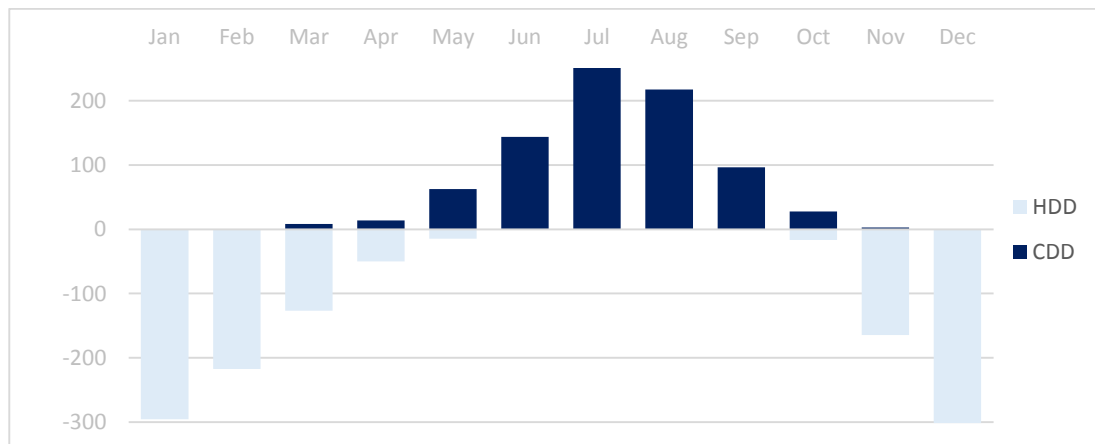


Figure 37. Heating degree days and cooling degree days à Laghouat

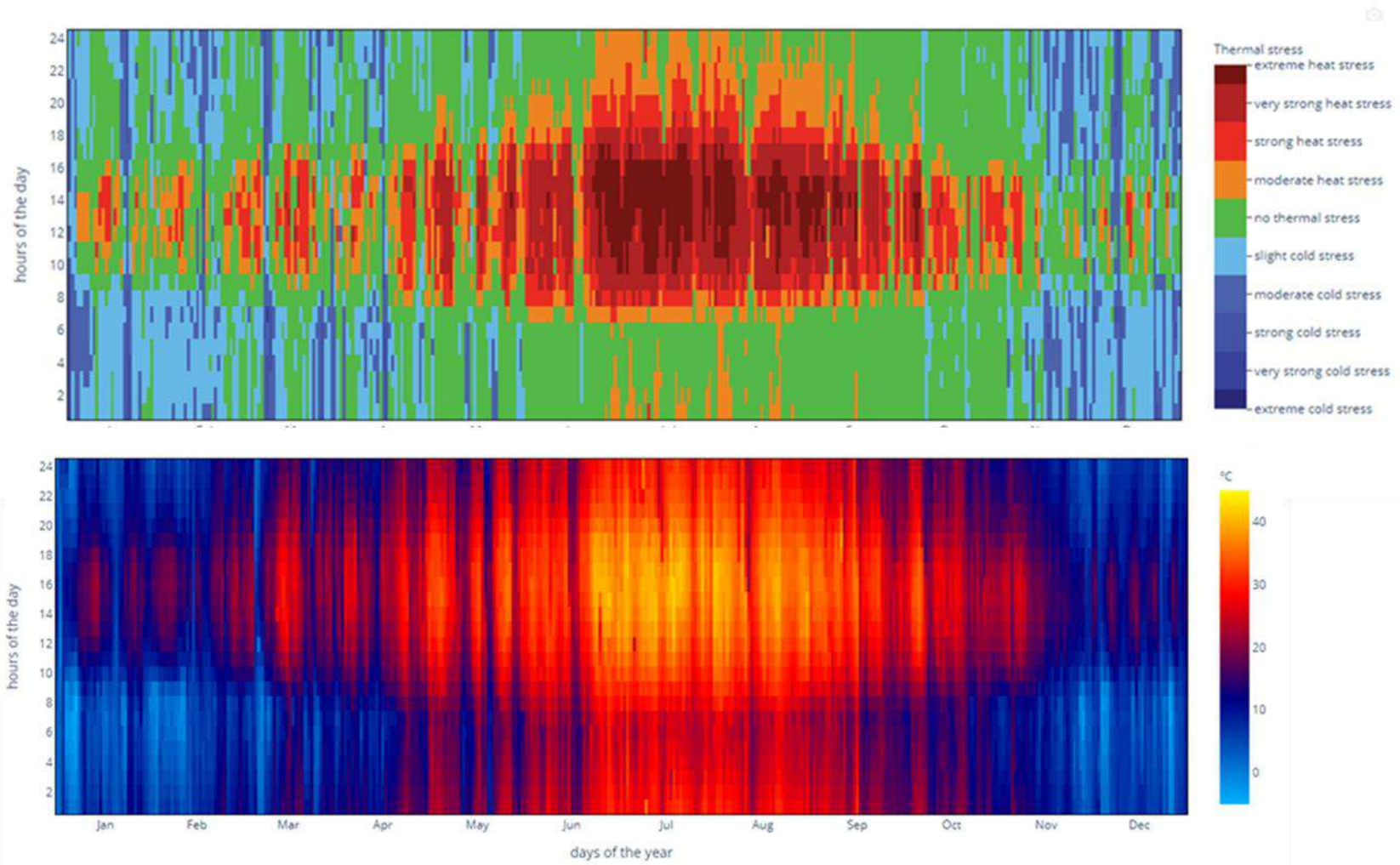


Figure 38. Classification des températures ressentis à l'extérieur à Laghouat, selon l'indice thermal international. Source : CBE Climat Tool modifié par l'auteur (Source :CBE Climat Tool modifié par l'auteur)

En matière de précipitation, elles sont irrégulières et insuffisantes dans la région de Laghouat. En effet, ladite région a connu une grande période de sécheresse durant la décennie écoulée, et les données TMY établis sur un espace-temps de 30 ans présentent une moyenne annuelle se situant entre un maximum de 171,5 mm et un minimum de 31 mm.

Parallèlement aux précipitations, le pourcentage de nébulosité connaît une variation saisonnière considérablement faible au cours de l'année. Le ciel est dégagé ou partiellement nuageux à 94 %. Il est, en moyenne, couvert ou nuageux à 6 %. La période la plus nuageuse de l'année commence aux alentours du septembre, où le ciel est couvert ou nuageux dans l'ensemble à 39 % et dégagé ou partiellement nuageux environ 61 % du temps.

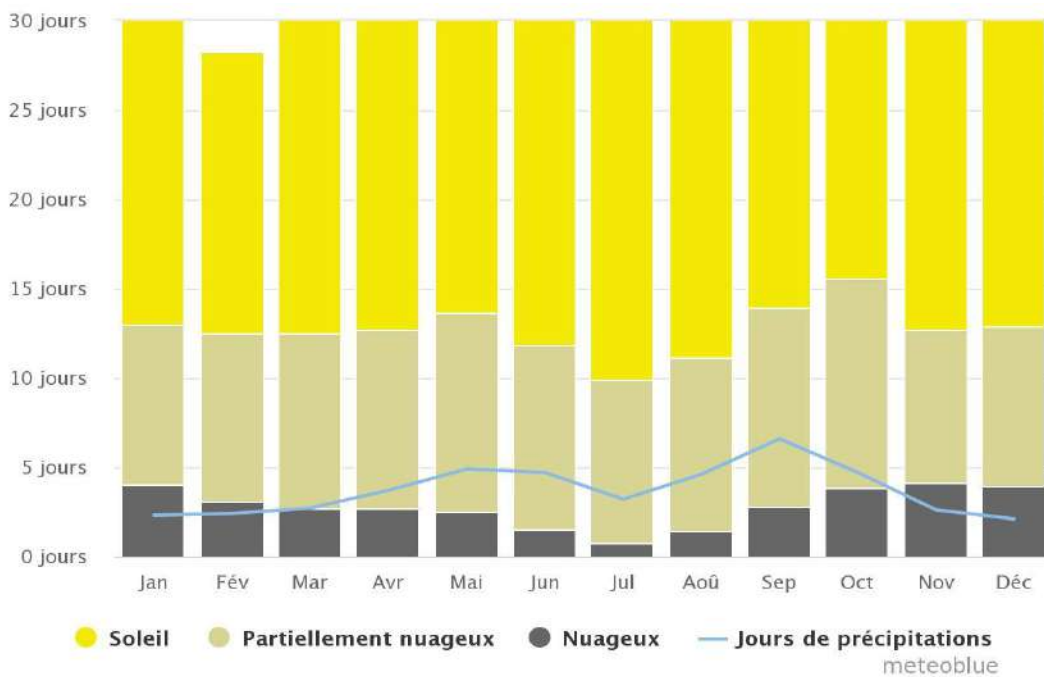


Figure 39. Précipitation et nébulosité à Laghouat
(Source : Météo bleu)

2.2. Topographie :

Les coordonnées géographiques de Laghouat sont $33,800^\circ$ de latitude, $2,865^\circ$ de longitude. La Commune de Laghouat se situe à une altitude moyenne de 760 mètres, entourée par des chaînes de montagne aussi bien du côté Nord que du Sud, créant le chemin de parcour ou nid de deux oueds « *M'zi et Messad* ». La commune de Laghouat affiche ainsi deux profils topographiques distincts l'une de l'autre. Au nord, elle conserve une topographie générale caractérisée par le pied de contre fort du *Djebel Amour*, un maillon de l'Atlas Saharien. Ce sont, en général, de hautes terres du genre steppique d'occupation pâturage, habillées d'une couverture végétale essentiellement constituée de plants d'Alfa et de pâturage. Au Sud, la partie des terres parcourant par le lit d'*oued M'zi*, en pente douce jusqu'à l'extrême Sud de la wilaya prenant contact avec le Sahara, est caractérisée par une partie désertique plate, recouverte en grande majorité par des sables.

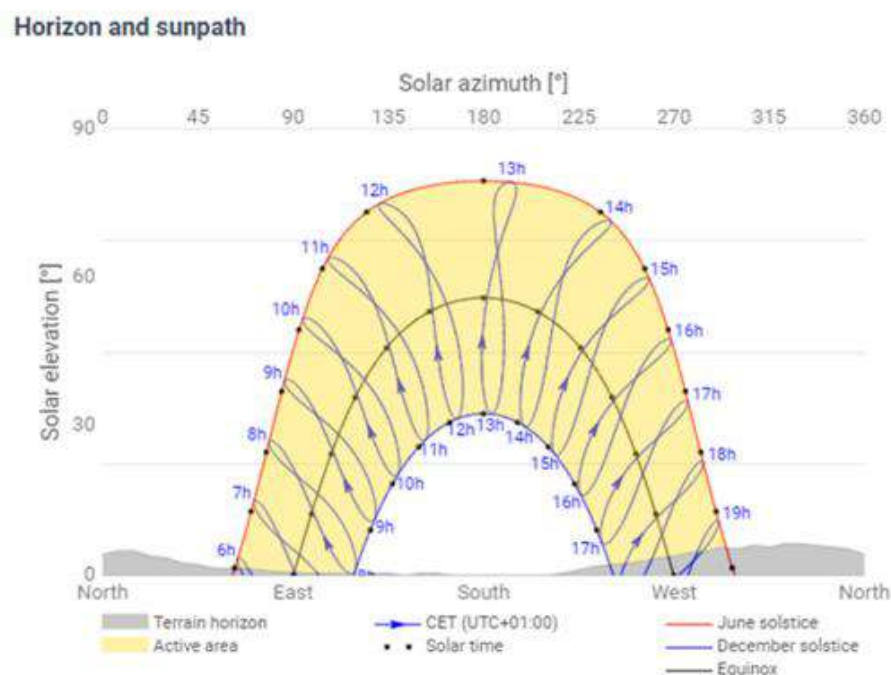


Figure 40. Profil topographique et l'azimut solaire à Laghouat.

(Source CBE Clima Tool, modifié par l'auteur)

2..3. Les vents

Pour une année météorologique typique, nous recueillons des fréquences moyennes des vents exprimés en m/s pour toutes les directions. Le siroco souffle du côté Nord et Ouest. Il est fréquent entre Juin-Aout. Ces vents sont souvent violents et leur vitesse varie de 15 à 20 m/s. La région fait face aussi à des vents fréquents et cycliques. Ce sont les vents Sahraouis qui viennent du Nord-Ouest/Sud-Est entre Mars et Mai, tandis que les vents dits « Bahri » soufflent de direction Est-Ouest et se manifestent à partir de septembre.

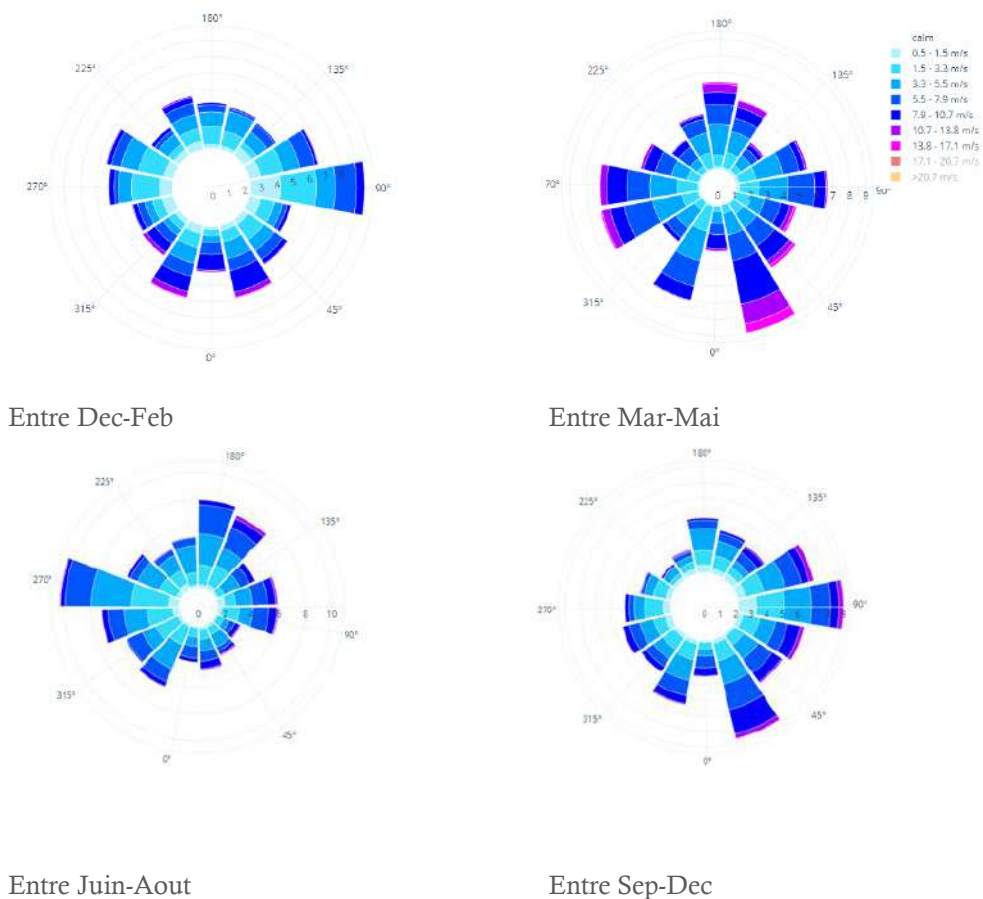


Figure 41. Les variations saisonnières des vents à Laghouat.(Source : CBE Clima Tool)

2.4. Les radiations solaires

Compte tenu de sa position géographique, Laghouat dispose de l'un des gisements solaires les plus favorables à l'installation photovoltaïque. En effet, la durée d'insolation sur la quasi-totalité de la ville peut même atteindre 3900 heures. L'énergie solaire globale reçue par jour sur une surface horizontale est ~ 1860 KWh par an et par m^2 au Nord et $5,5$ KWh ~ 2410 KWh par an et par m^2 au sud. Cette partie sera expliquée en détail dans le prochain chapitre.

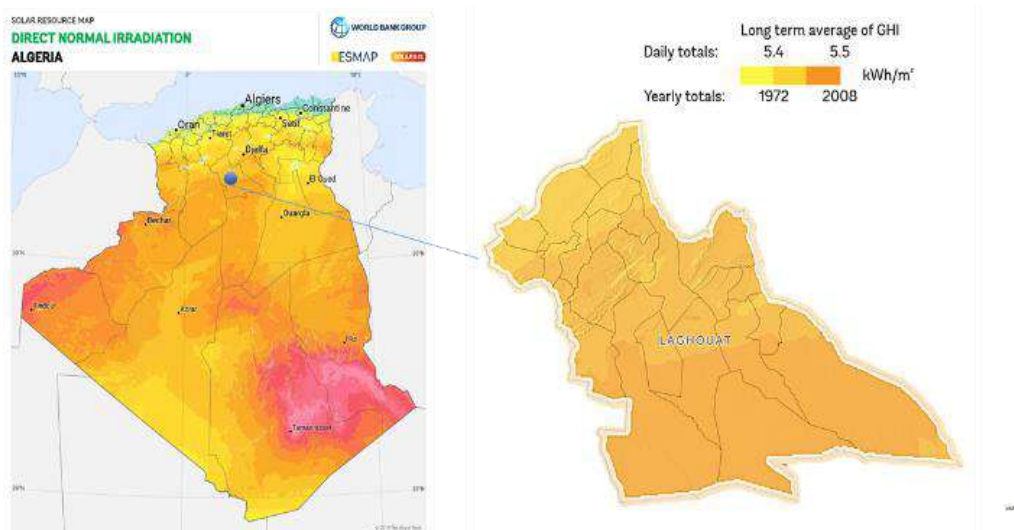


Figure 42 Irradiation horizontale normale à Laghouat.

Source: PVGIS tool .

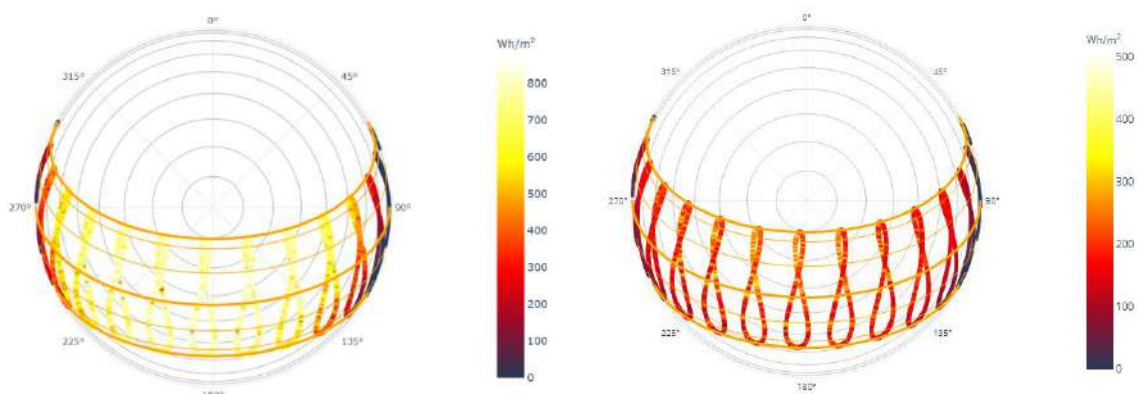


Figure 43 .Trajectoire et intensité des radiations solaires .

Source : CBE Clima Tool modifié par l'auteure

3. L'analyse du milieu urbain

3.1. Le développement urbain et le secteur de l'habitat dans la commune de Laghouat

Après l'indépendance, Laghouat a connu une grande extension orientée par les éléments naturels (Oued-M'zi, la chaîne rocheuse et les deux Oasis) qui délimitent son environnement. Ces obstacles naturels ont fait que le noyau original de la ville se trouve de plus en plus excentré par rapport au développement de la ville. Par conséquent, une bande d'équipements s'est développée le long de la route nationale N1 suivant un tracé concentrique, et de l'habitat s'est développé sur le côté Nord-Ouest et Sud-Ouest.

3.1.1. L'habitat traditionnel du vieux Ksar

Le vieux ksar constitue le symbole des premières constructions de l'agglomération. Son type d'architecture est basé sur un plan simple où l'espace est diminué au profit de l'ombre. La circulation à l'intérieur se fait par un axe principal qui le divise en deux parties. C'est autour de cette voie que s'organisent le commerce d'artisanat et d'autres activités. De part et d'autre de cet axe s'acheminent perpendiculairement les ruelles étroites jouant le rôle de dessertes vers les maisons traditionnelles. Près de 90 % de ce tissu est en mauvais état et ne sera donc pas considéré dans notre recherche.

Table 9. Etat des lieux de l'habitat traditionnel (Source : PDAU Laghouat)

Etat	Nbre	Bon état	Mauvais état	Etat dégradé	En Ruine	Menace	Inhabité
Nombre	204	19	30	91	11	9	44

3.1.2. Les lotissements : Habitat Individuel

L'expansion du tissu urbain commence par les lotissements *Essadikia* et *Bouameur* au sud-ouest du centre historique, suivi par celle *d'El-Makam* ainsi que le nouveau site

de *Maamourah*. On retrouve aussi les lotissements Oasis-Nord, avec un prolongement à l'Ouest du quartier 11 décembre. Ces types de lotissements caractérisés par un tissu urbain érigé en parcelles qui ont été construits durant des périodes variées.

3.1.3. Habitat collectif et semi collectif

L'habitat collectif est localisé dans les sites situés sur le côté Sud de la ville, aboutissant aux limites extrêmes de l'agglomération du côté Sud-Est de la commune. Il s'agit d'un groupement de bâtiments à des styles différents, constituant de ce fait un nouveau noyau de tissu urbain récent par rapport à un l'ancien tissu en voie de régression. Notre objectif dans cette partie est d'analyser le secteur de l'habitat afin d'identifier les typologies résidentielles représentatives pour chaque zone de la commune.

Avant d'entreprendre cette étape, il faut mentionner que les typologies urbaines, par définition, peuvent référer à des données très différentes à savoir historique, constructives ou sociales...etc. De plus, elles s'appliquent sur des échelles variées également du bâtiment à l'îlot urbain. Dans cette recherche, nous nous intéressons seulement aux données qui impactent les résultats souhaités. Il s'agit des données géométriques et morphologiques des bâtiments partant de l'échelle de l'îlot urbain au bâtiment.

Les paramètres géométriques et morphologiques de l'habitat collectif et semi-collectif étaient plus faciles à identifier puisque l'empreinte numérique est disponible. Néanmoins, pour l'habitat individuel, plusieurs difficultés ont été relevées, principalement en raison du manque de données et de cartographie ou d'empreinte numériques. Par conséquent, les typologies ont été définies selon trois (3) variables : la période de construction, la taille de la parcelle et la hauteur. Une analyse morphologique a été établie pour les typologies calculées puis analysées. Cela concerne l'identification des paramètres déterminant et discriminant de son potentiel solaire.

Pour conclure, bien qu'il soit compliqué d'identifier avec précision l'urbain par un nombre de paramètres morphologiques, nous avons pu sélectionner deux typologies. Chacune est définie par un nombre de types :

- L'habitat individuel : La taille de la parcelle varie entre 150-350 m² avec un taux de couverture d'environ 0,7. Le nombre d'étages varie de 1 à 2 niveaux.
- L'habitat collectif et semi collectif : type d'appartement 1 (MS1) et (MS2).

Aerial views of urban textures and normalized models taken as case studies.

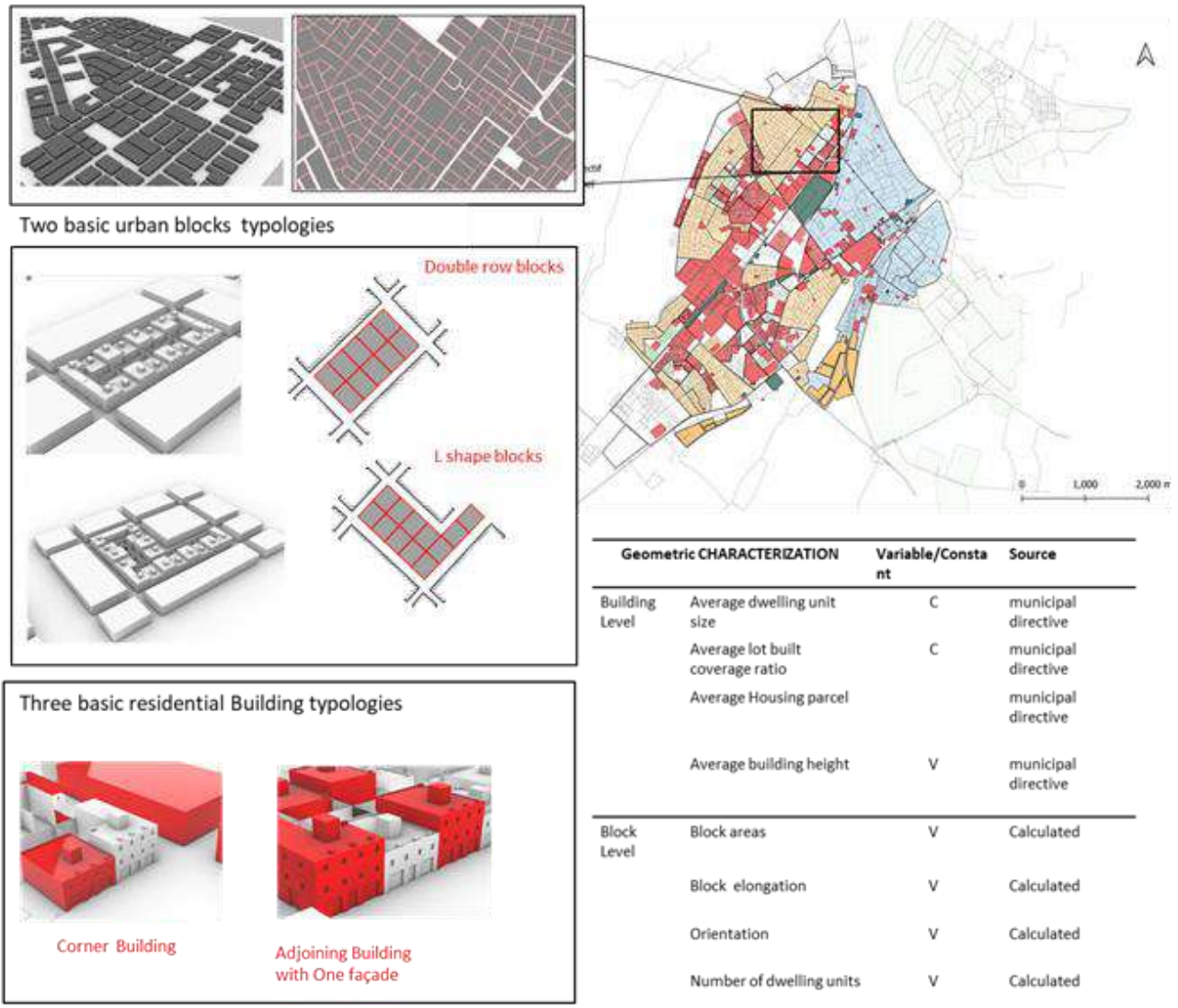


Figure 44. Détails Morphologiques des typologies d'habitat Individuel.

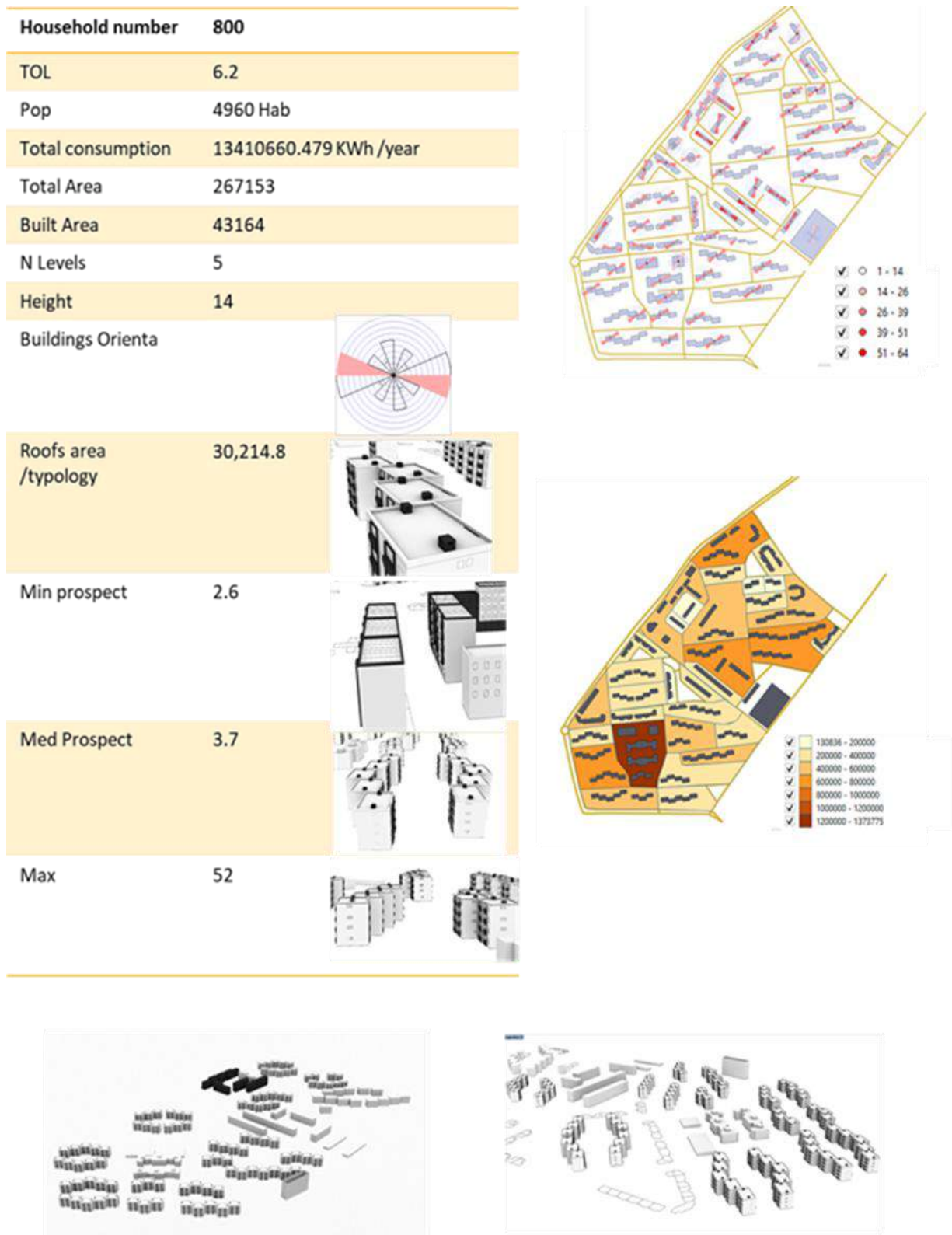


Figure 45 .Détails morphologiques des typologies de l'habitat collectif.

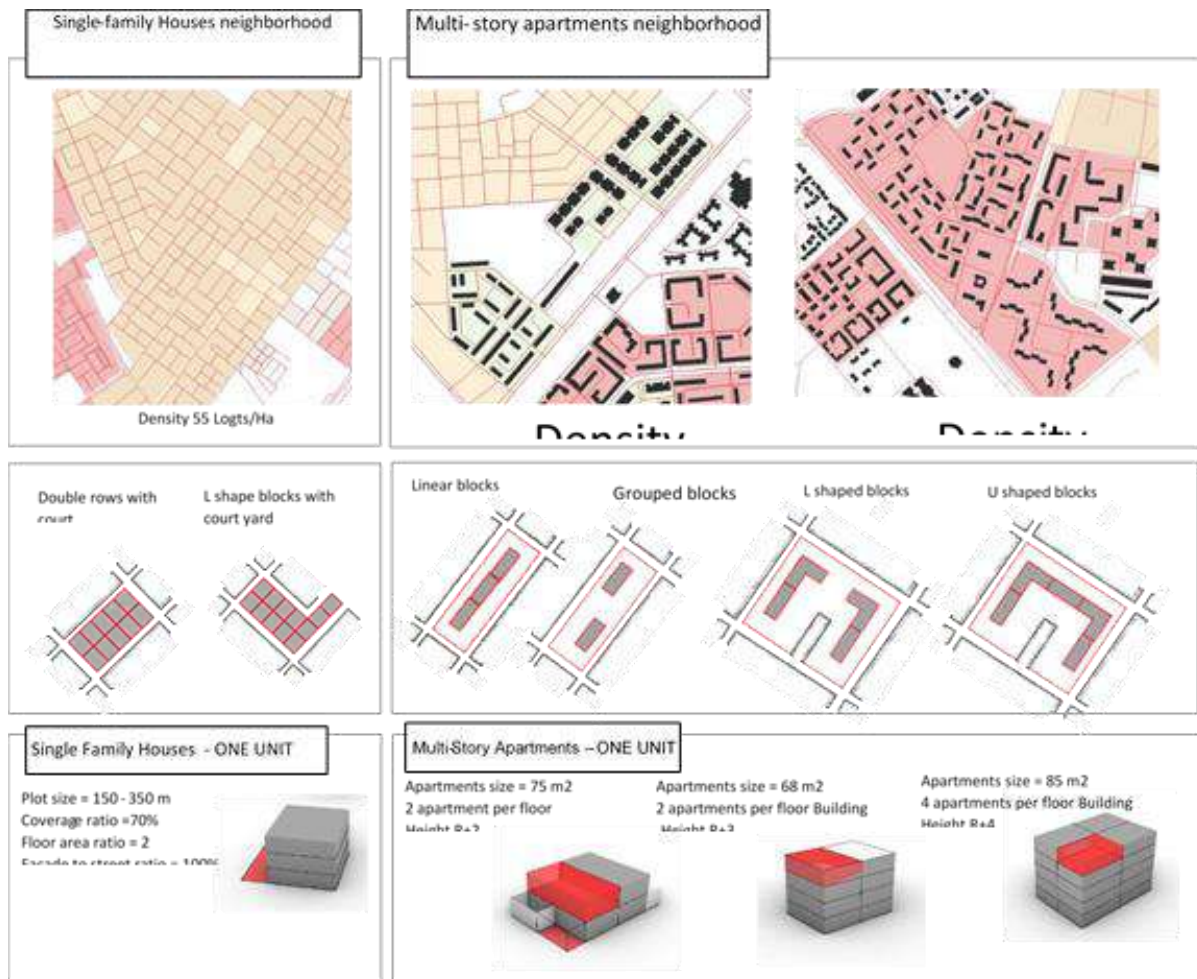


Figure 46. Récapitulatif des typologies résidentielles sélectionnées.

3.2. L'organisation et les principes de la donnée Géographique

La base de données élaborée via le SIG est constituée de couches géographiques qui servent d'infrastructure spatiale de base pour notre approche analytique. Ces couches définissent les bases de géo-référencement des données statistiques et nos résultats modélisés du système énergétique. Le contenu de notre base de données géographique crée un instrument solide pour l'évaluation, la prise de décision et la communication des préoccupations liées à la planification de l'énergie solaire dans la commune.

L'estimation de la production des installations d'énergie solaire comprend des informations sur la répartition urbaine et du potentiel solaire où l'on peut inclure les installations photovoltaïques sur les bâtiments résidentiels pour évaluer sa

contribution dans le bilan énergétique. Cette évaluation est basée sur les informations de base de la ville telles que les zones résidentielles disponibles, ou la surface des toits des bâtiments pour l'installation de panneaux photovoltaïques et la consommation résidentielle.

Pour une conception solide et judicieuse, le défi à relever pour cette base est de :

- Exploiter de manière intelligente des données existantes (comme l'occupation des sols, la population ... etc.).
- Définir un niveau d'agrégation, auquel les données ou créées deviennent utilisables et apportent une valeur ajoutée à la prise de décision.
- Créer des informations d'output pertinentes, c'est-à-dire qui servent à notre problématique

Afin de relever les défis susmentionnés, la base de données de la ville devrait comporter trois domaines d'information de base. Les détails de chaque domaine sont expliqués dans la section suivante.

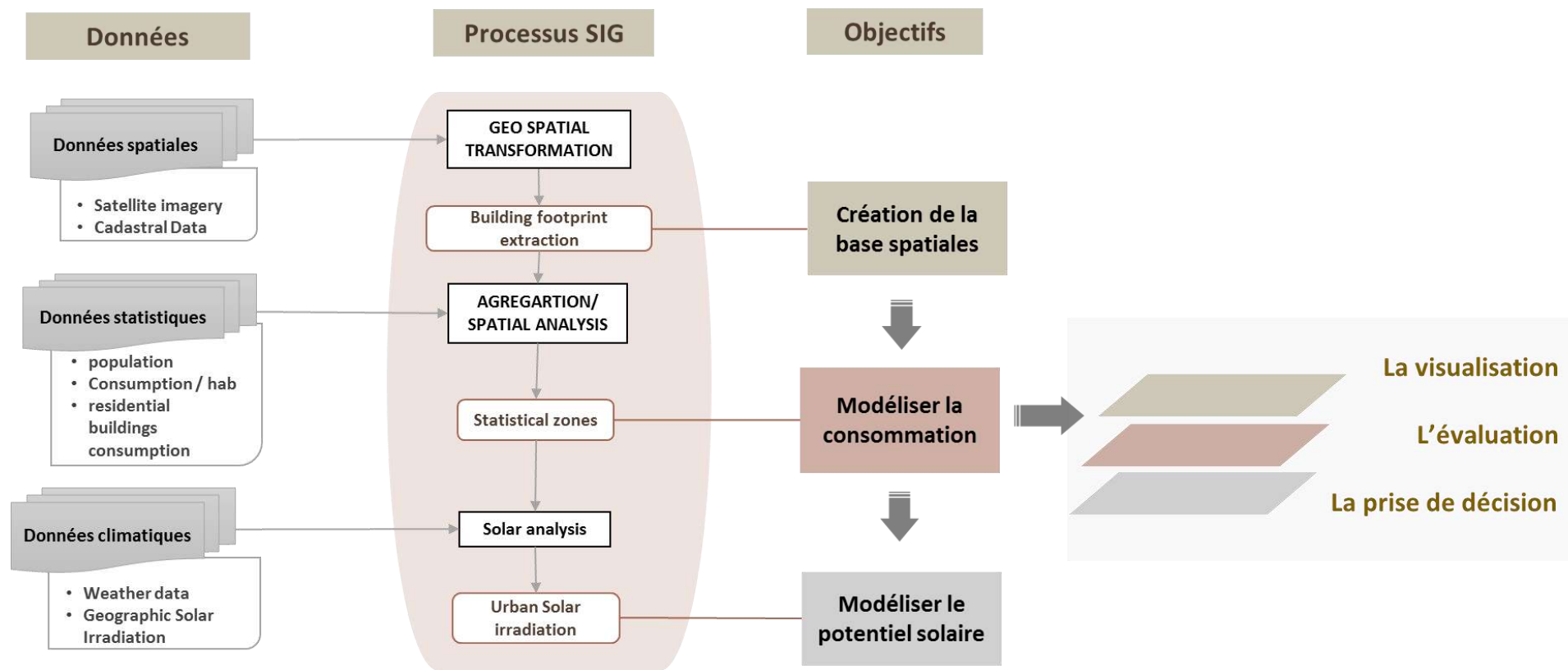


Figure 47. principe de constitution de la base de données sur le SIG.

3.2.1. Les couches de données urbaines

Les couches de données urbaines contiennent les informations géographiques de base de la commune qui servent d'infrastructure spatiale de base de la ville. Il s'agit de l'exploitation des données existantes, mais aussi le géo-référencement des données statistiques. Les données incluses sont :

- Les informations géographiques de base de la ville, tels que le réseau routier et l'occupation des sols de base.
- Les bâtiments publics ou commerciaux pour lesquels la consommation d'énergie peut être estimée de manière plus détaillée.
- Toute information supplémentaire, telle que les lieux présentant des restrictions particulières en matière de construction ou des informations immobilières. Le développement de bases de données géographiques est, principalement, une tâche horizontale. Par conséquent, tous les systèmes SIG de la ville partagent ou échangent des informations et des opérations avec tous les calques .

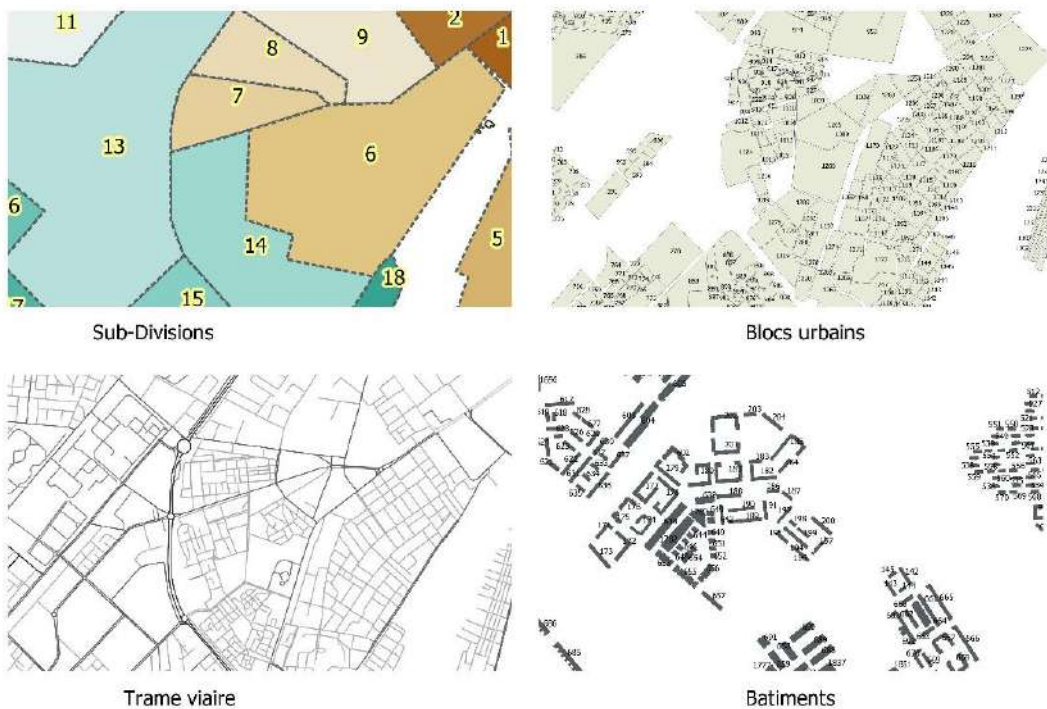


Figure 48. Les couches géographiques de la base de données créée pour Laghouat

Table 10. Organisation de la base des données sur SIG.(Source :Auteur)

Couche		Couche	
Segments du Réseau viaire	Lines	Bâtiments	Polygones
Quartiers (Unité de références)	Polygones	Bloc urbains	Polygones

Attribues gometriques

Couches	Description
Bâtiments	Typologies /surfaces / nombre d'étages.
Bloc urbains	Surfaces /Dimensions /densité / orientation
Réseau viaire	Type /Longueur / direction

Attributs socio-economies

Couche	Description
Population	Nombre d'habitants
Consommation énergétique	Consommation par habitant
Affectation des sols	Activities zoning : equipment, public institution , residential ..etc

Attribues énergétiques

Couche	Description
Surface des toits	Area/typo
Intensité des irradiations solaires	Mini /maxi/optimal
Potentiel photovoltaïque	Mini /maxi/optimal

3.2.2. Les couches d'agrégation statistique

Le développement de bases de données géographiques est, comme indiqué précédemment, principalement, une tâche horizontale. Par conséquent, tous les systèmes SIG de la ville partagent ou échangent des informations et des opérations avec tous les paquets de travail séparés du projet. Afin d'offrir une référence géographique pour toutes les informations énergétiques de la commune, on spécifie une couche agrégée fondamentale sur la base de ses quartiers. Il convient de souligner que la couche agrégée fondamentale désigne la couche géographique sur laquelle toutes les informations doivent être rassemblées.

Selon l'exemple suivant, les informations statistiques qui seront reliées à chaque objet géographique unique, c'est-à-dire chaque secteur, peuvent avoir des associations de type un-à-un ou un-à-plusieurs (figure n.49).

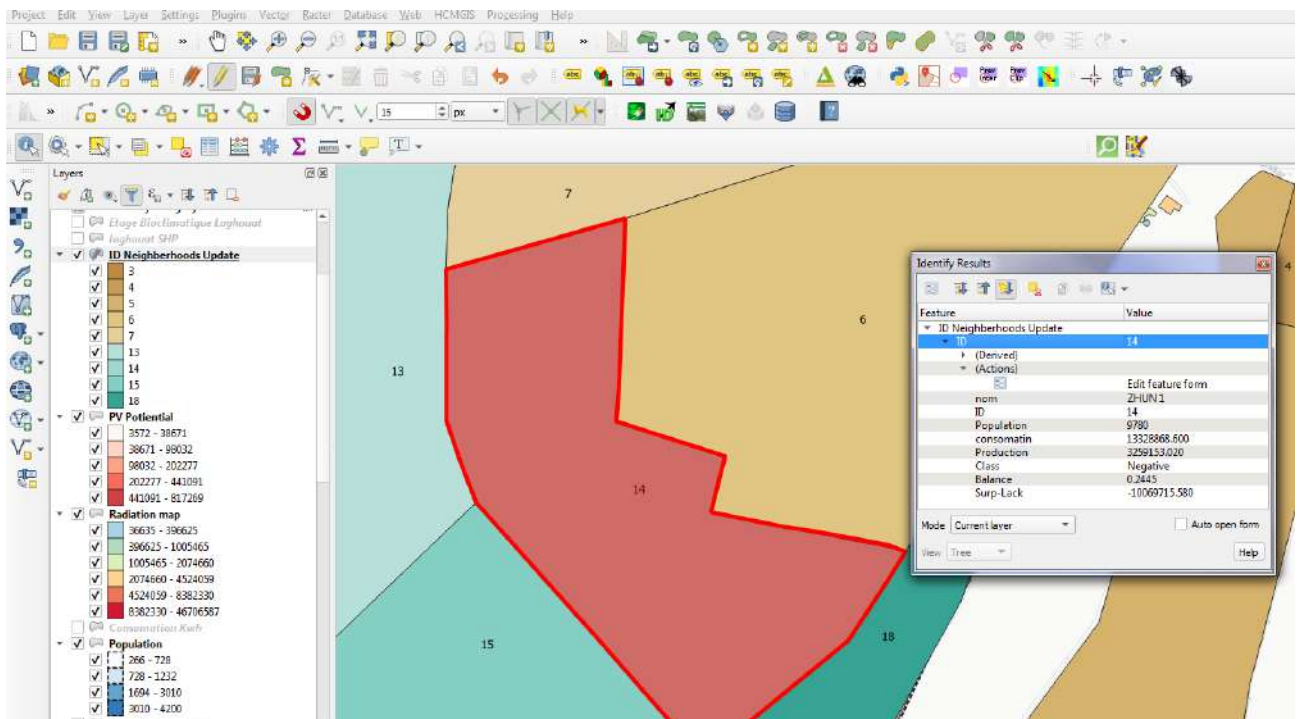


Figure 49. Capture sur les attribues relative à la couche d'agrégation

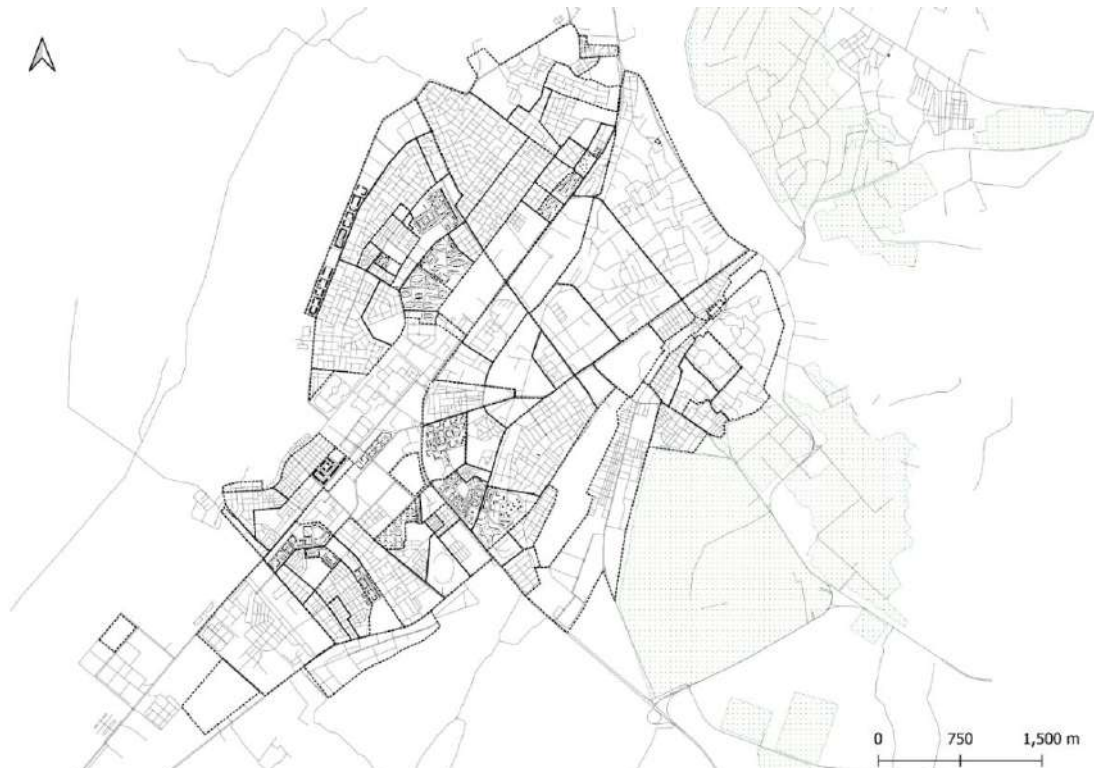


Figure 50. Carte des subdivisions par type d'habitat à Laghouat.

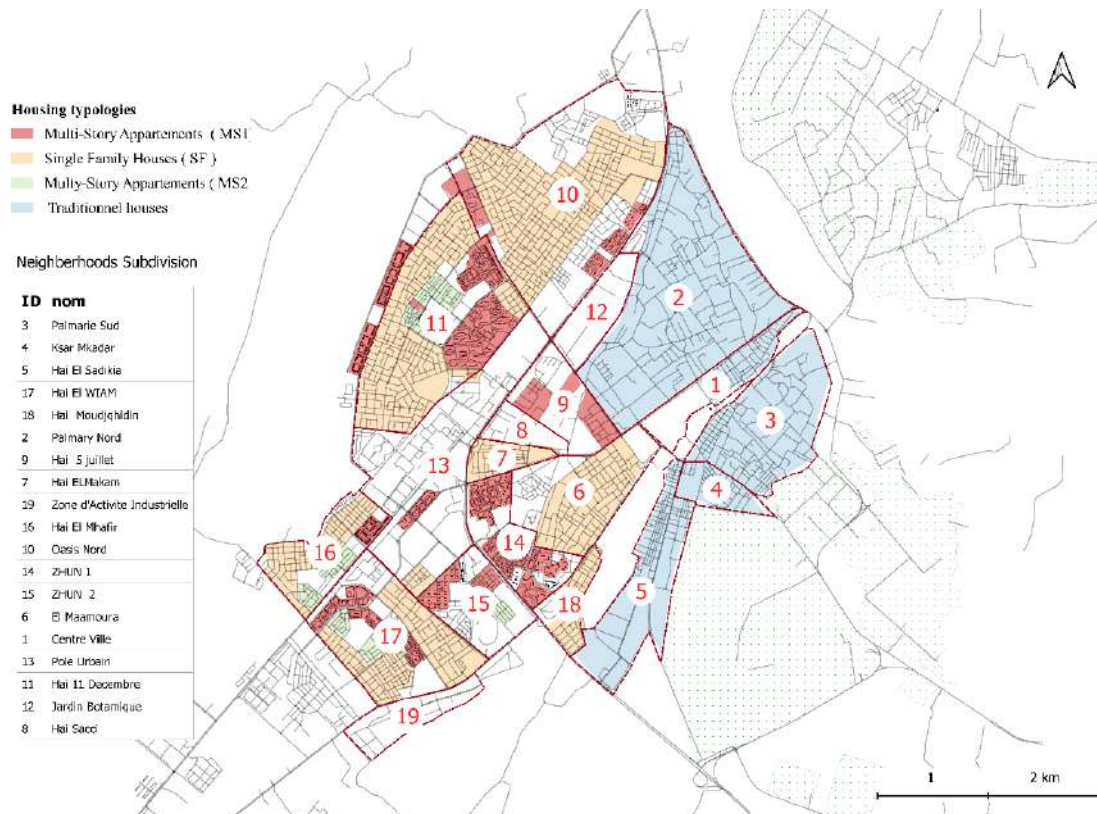


Figure 51. Carte des unités d'agrégation adoptés

3.2.3. Les cartes thématiques finales :

L'objectif ultime de cette base de données de commune est de montrer la distribution géographique de la demande et de la production d'énergie dans les différents quartiers de manière auto-explicative. Les éléments suivants seront représentés sous forme de cartes thématiques au niveau de la couche d'agrégation.

1. La demande d'électricité

La consommation représente un défi pour la collecte de données. La technique peut être estimée en un calcul de l'énergie utilisable nécessitant un certain nombre de données :

- En commençant par le nombre de " populations " réelles, c'est-à-dire la distribution spatiale de la surface des structures d'une certaine typologie,
- La consommation moyenne d'électricité par habitant dans le secteur résidentiel en Algérie est estimée à 1362,87 kW h/habitants.

Etant donné que la consommation d'électricité est corrélée au nombre d'habitants, la consommation totale d'électricité au niveau de la commune est présentée dans la carte ci-dessous.

2. Estimation de la capacité PV installée et de la production d'énergie par district.

Le secteur résidentiel de la ville sera analysé pour identifier les typologies de bâtiments qui le caractérisent. Le potentiel solaire de chaque typologie sera étudié plus en détail à l'aide de logiciels de simulation spécialisés comme expliqué dans l'étape 1 du chapitre 3. Sur la base des simulations correspondantes, le potentiel solaire spécifique à chaque typologie ainsi que le potentiel d'économie d'énergie provenant des installations photovoltaïques sont déterminés.

Les informations résultantes ont été intégrées dans la base de données SIG afin de fournir une représentation graphique du potentiel solaire totale de la commune et d'identifier les régions d'intérêt particulier.

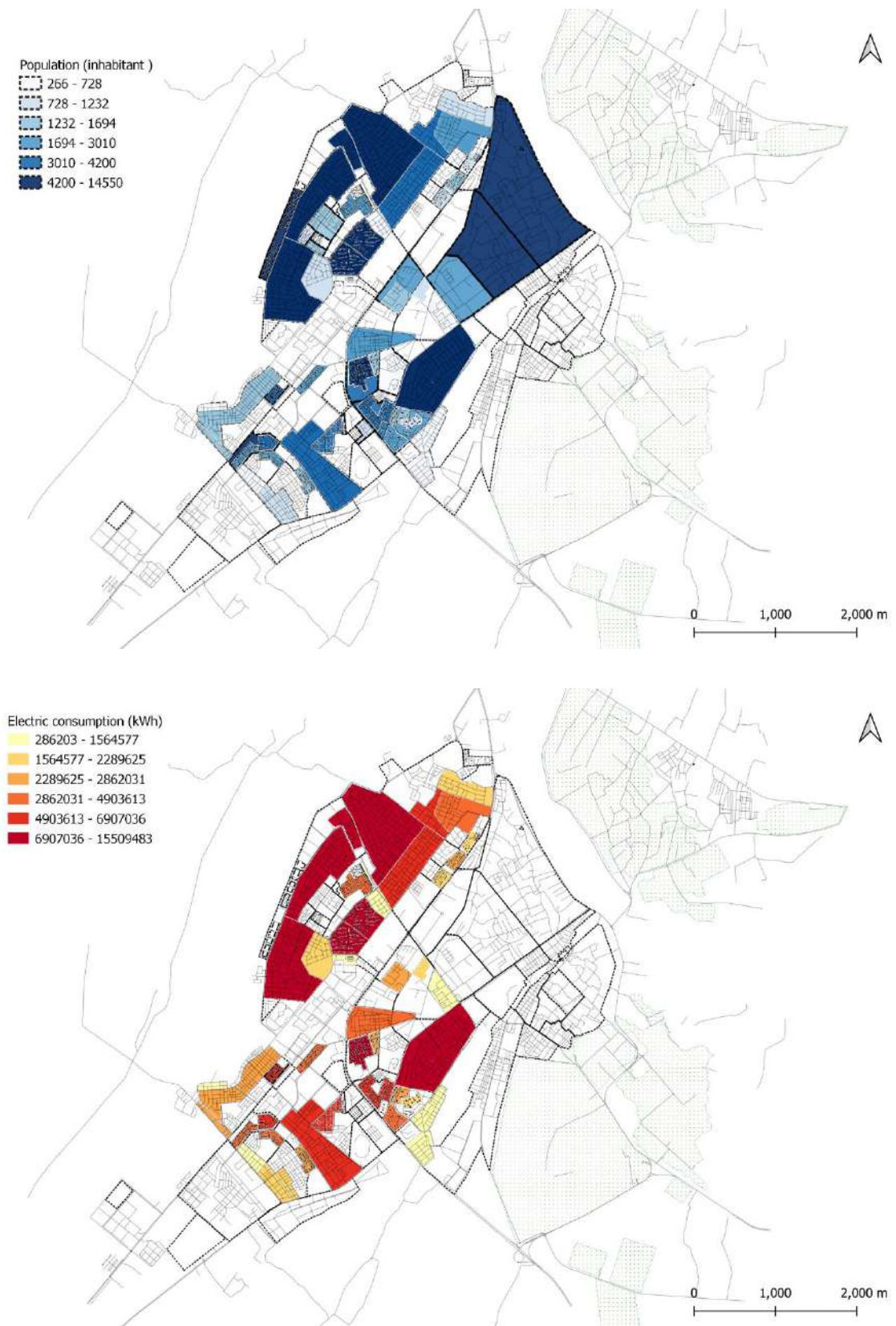


Figure 52. Carte de répartition de la consommation à Laghouat .



Figure 53 .Carte de répartition de la consommation en fonction de la population .

Conclusion

Ce quatrième chapitre s'est consacrée à la caractérisation de la commune de Laghouat comme étant le cas d'étude de la présente recherche, et ce à travers l'analyse de différentes données par le biais de différents outils performants. Dans le cadre de ce chapitre, une présentation des fonctionnements relatifs aux systèmes d'information géographique de la commune de Laghouat a été analysé via une plateforme, ayant pour rôle principal la dissémination des résultats relatives à la comparaison entre la demande énergétique et le potentiel solaire. En effet, la couche d'agrégation intégrant le bilan énergétique de la ville à long terme, à travers des différents scénarios alternatifs permet de procéder à l'évaluation du potentiel solaire à l'échelle résidentielle cet objectif se trouve être l'objet phare du prochain chapitre. Nous souhaiterions rappeler que le choix du présent cas d'étude s'inscrit dans une optique de grand déficit de connaissances relatives au potentiel solaire résidentielle, où l'ambition principale réside dans l'évaluation et la détermination des atouts d'une telle approche scientifique, et ce, afin d'ouvrir la voie vers une meilleure application des scénarios de maîtrise énergétique à l'échelle résidentielle.

Potentiel physique urbain et technique de l'énergie solaire à Laghouat

1. Potentiel physique et géographique

Introduction :

Dans le présent chapitre, les résultats des étapes méthodologiques une et deux sont présentés et discutés selon un processus hiérarchique. Notre objectif vise à fournir une estimation quantitative réelle de l'énergie produite à travers l'installation des panneaux photovoltaïques sur les toitures résidentielles. Sur la base de ces résultats, le bilan énergétique entre la demande de la commune et son potentiel de production est établi. Un plan d'interrelation du système énergétique entre les unités urbaines peut être proposé dans le but d'améliorer les performances énergétiques de l'existant et offrir des recommandations de planification au futur.

1.1. Analyse du rayonnement

Les résultats de la simulation solaire montrent que toutes les surfaces inclinées, sans ombrage, reçoivent annuellement la quantité de 1996.04 kWh/m². Cette valeur est étendue au reste de la ville. Les résultats du rayonnement sont cartographiés sur l'ensemble de l'empreinte disponible.

1.2. Facteur d'utilisation (FU)

La surface estimée du toit doit être ajustée pour déterminer la surface effective pour la production d'électricité PV à des fins de production d'électricité. Dans ce sens, le

facteur d'utilisation dépend de trois aspects principaux : l'occupation du toit, les pertes dues à l'ombre et le CGR.

1.2.1. Occupation du toit

En l'absence d'une configuration détaillée des toits pour toutes les typologies résidentielles, les obstacles spatiaux possibles ont été identifiés à l'aide d'images Google Earth, comme indiqué dans le tableau. Tous les objets probables en toiture sont résumés et catégorisés en fonction de leur nature, éléments structurels ou équipements. L'aire de service correspond à une surface supplémentaire qui fait référence à un chemin périphérique dédié aux questions de maintenance ou d'installation. La surface moyenne de chacun d'entre eux est estimée selon les données des normes (voir Tableau).

Table 11. Détails des obstacles sur les toitures.

	Elements Structurels		Equipements			Aire Service	de
	Cage d'escalier	Gainé	Réservoir d'eau	Antenne parabolique	Unité Ex de climatisation	Périmètre de sécurité	
Surface moyenne %	4%	0.40%	1.90 %	0.30%	0.70%		9.10%
Individuel	X	X	X	X	X		X
Collectif	-	X	-	-	-		X

2.2. Pertes d'ombre

Une analyse des heures d'ensoleillement a été réalisée afin d'identifier le taux le plus efficace de pertes d'ombres sur les toits résultant de leurs éléments d'occupation, ainsi que de leur voisinage. La simulation est exécutée sur chaque typologie de bâtiment dans un voisinage de hauteur aléatoire et uniforme. En ce qui concerne leur

occupation, il est considéré que seuls les obstacles structurels peuvent produire des ombres permanentes sur les toits.

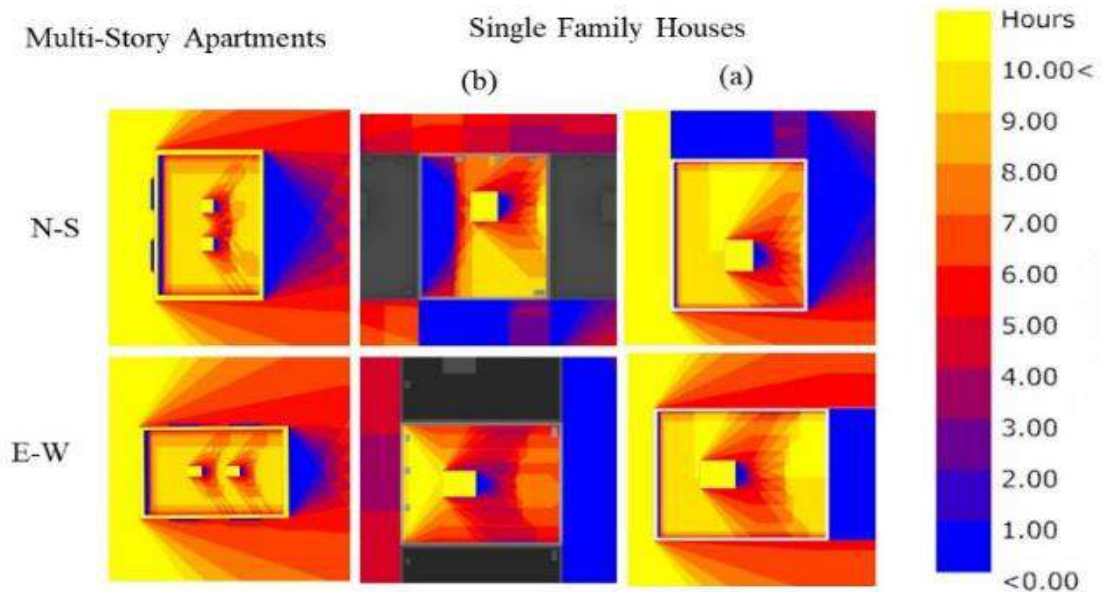


Figure 54 .Repartions de l'ombre des éléments structurel dans des différentes orientations

Dans le cas des hauteurs uniformes, les pertes moyennes pour des habitations individuelles sont d'environ 51% avec une variation allant de 1% à 12 en fonction de l'orientation. Dans le cas de hauteurs aléatoires, le taux peut atteindre plus de 70% de la surface totale, ce qui peut éliminer la toiture de recevoir des installations photovoltaïques. Dans les bâtiments d'habitat collectif et semi collectif, les pertes d'ombre sont estimées à environ 20%. En effet, la variabilité des fractions d'ombre dépend fortement de la configuration des toits, les toits des maisons individuelles sont généralement accessibles et plus encombrés que ceux des immeubles à plusieurs étages.

Les résultats qui sont rapportés ici doivent être compris en tenant compte de certaines limites. Selon Karteris et al. (Karteris, Slini, & Papadopoulos, 2013), la forme du toit, la position et l'orientation des éléments structurels ont une grande influence sur les effets d'ombrage. En raison du manque de données, la forme du

bâtiment et la position de la cage d'escalier sont simplifiées et identifiées selon les critères les plus courants.

4.2.3. Rapport de couverture du sol (CGR)

Le CGR dépend de la latitude et des conditions climatiques. Par conséquent, pour choisir la disposition PV appropriée, l'analyse détermine l'inclinaison optimale, qui met en relation les performances du système PV avec l'intensité du rayonnement solaire.

Tout d'abord, les résultats illustrent l'impact de l'angle sur l'intensité du rayonnement solaire et suggèrent l'inclinaison optimale pour chaque saison. Ensuite, nous procédons à une comparaison des profils d'électricité résultant d'un panneau PV installé sous l'inclinaison optimale pour chaque saison. La variation entre les différents profils est détaillée pour chaque saison comme présentée ci-dessous :

- Les inclinaisons de $13,4^\circ$ et 18° reçoivent l'intensité maximale du rayonnement solaire en été et au printemps. En hiver et en automne, les panneaux reçoivent 80-90% du rayonnement solaire produisant ainsi 23% d'électricité en moins, en considérant 10% d'ombrage annuel.

Les inclinaisons de $45-49,5^\circ$ reçoivent l'intensité maximale du rayonnement solaire également en hiver et en automne. En été, elle reçoit 80-90% de l'irradiation totale. En conséquence, la production PV diminue en moyenne de 16%.

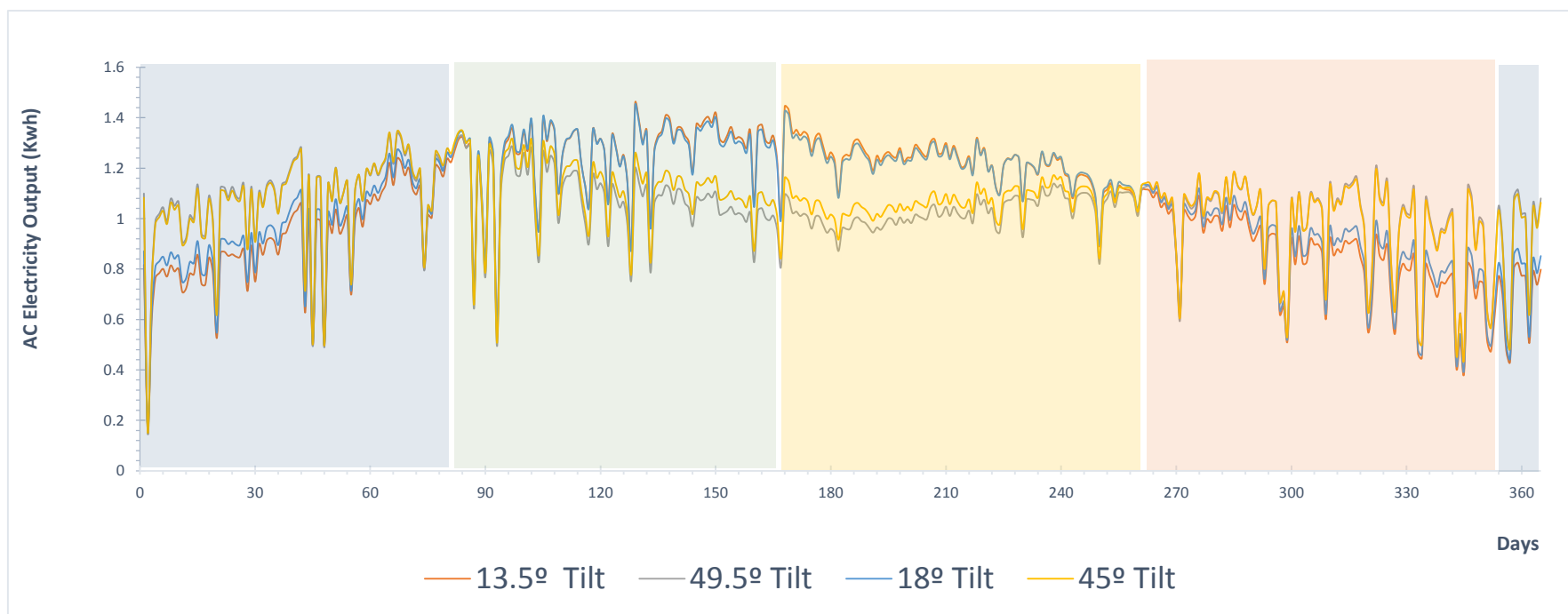


Figure 55 .Profil de l'électricité produite d'un panneau solaire sous différents angles d'inclinaison

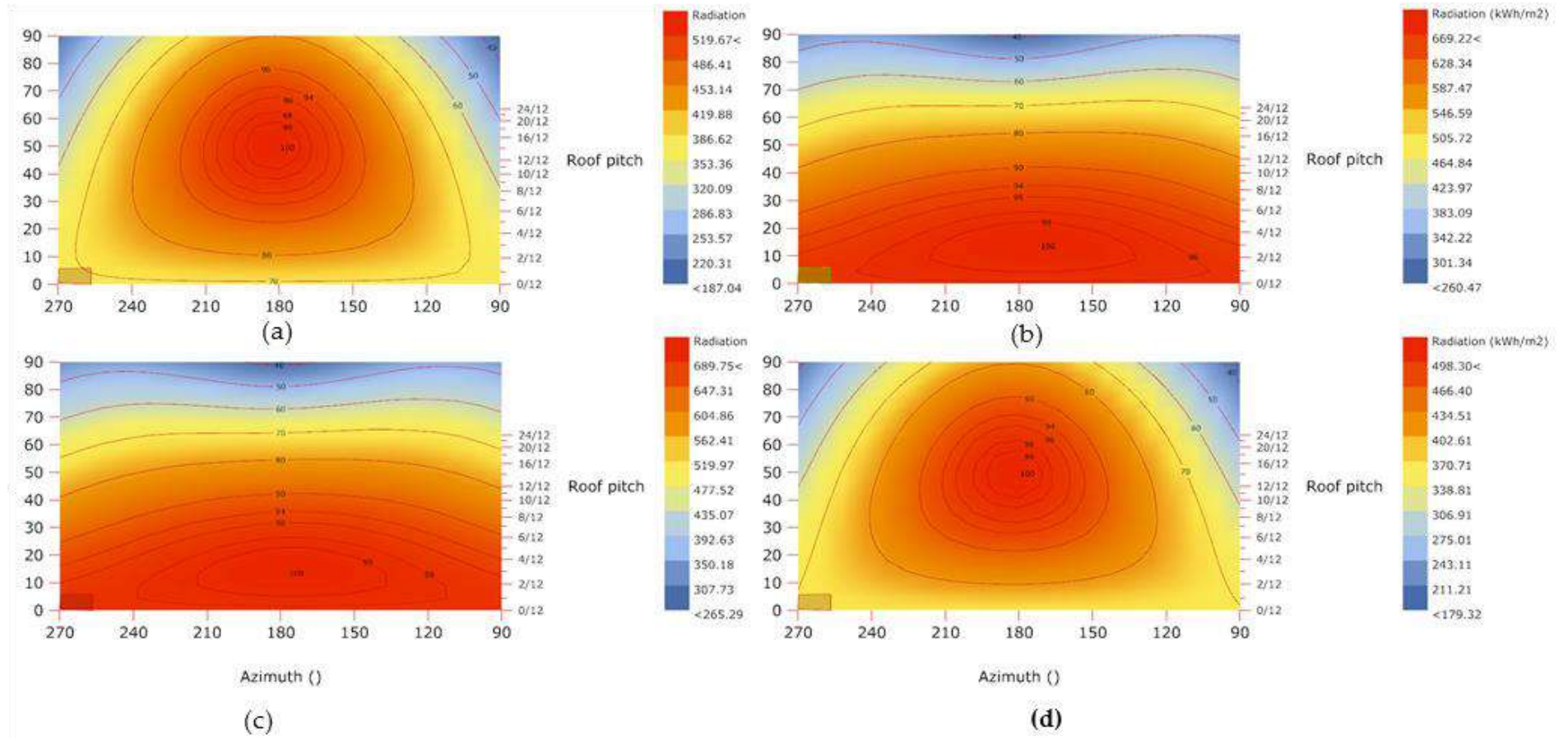


Figure 56 .l'intensité des irradiations solaires selon l'angle d'inclinaison dans chaque saison.

Néanmoins, il convient de mentionner que les inclinaisons à des angles plus importants nécessitent un plus grand espacement entre les panneaux PV afin de minimiser l'auto-ombrage. En parallèle, diminuer l'angle d'inclinaison pour améliorer le CGR nécessiterait un investissement plus important en termes d'installation et de maintenance.

La comparaison des profils de rendement PV dans la figure n.55 montre une faible réduction de la production PV annuelle lorsque l'angle d'inclinaison est réduit et proche de l'inclinaison optimale. Pour cette raison, l'inclinaison moyenne est estimée à 31,5°, en considérant un SBR égal à 3/1, ce qui signifie que le CGR utilisé pour l'étude est de 0,48.

Table 12. Table comparatif du CGR .

Angle d'inclinaison	Espace minimum entre les PV(m ²)	PV Yield (Kwh)	CGR
49.5°	4.01	377.11	0.41
45°	3.9	384.27	0.42
31.5°	3.43	394.70	0.48
18°	2.76	388.90	0.6
13.4°	2.5	385.36	0.67

En combinant les calculs présentés, les facteurs d'utilisation sont calculés selon l'équation (4) pour chaque typologie. Le FU est égal à 0,18 pour les toits de l'habitat individuel et 0,35 pour les toits des bâtiments collectifs. Ce résultat représente une contribution considérable à la connaissance puisqu'aucune recherche antérieure n'a été faite dans ce contexte spécifique en Algérie. De plus, il pourrait être facilement reproduit dans d'autres communes ayant les mêmes typologies résidentielles afin d'estimer leur potentiel technique PV.

Le facteur d'utilisation (FU) est principalement influencé par l'adéquation architecturale et solaire. Dans la littérature, nous avons trouvé différents FU exprimés sous forme de coefficients de réduction. D'une part, les réductions

architecturales se réfèrent aux obstacles de la construction (installations de chauffage et de climatisation, ascenseurs, etc.), aux effets d'ombrage et, dans certains cas, à d'autres restrictions dues à des bâtiments historiquement protégés. D'autre part, la disponibilité solaire considère l'intensité du rayonnement solaire en fonction du bâtiment, l'inclinaison du toit et la séparation entre les panneaux PV qui varient en fonction de l'emplacement géographique.

En fait, tous ces coefficients de réduction sont entièrement ou partiellement pris en compte en fonction des objectifs de la recherche. Dans notre recherche, nous avons sélectionné uniquement les coefficients que nous considérons comme essentiels pour répondre à la spécificité du cas étudié. De plus, les valeurs FU trouvées dans la littérature montrent une grande variabilité en fonction de la typologie résidentielle. Par conséquent, pour fournir une comparaison notable, la présente étude se réfère uniquement aux auteurs qui fournissent des UF avec des typologies similaires.

Par exemple, l'utilisation des toits résidentiels à Delhi est estimée à 0,2 (Ram, Abhishek Pratap, Anand Prabhu Pathanjali, & Abhishek Pratap, 2013). En Grèce, Karteris et al. (Karteris et al., 2013) ont trouvé une variation du facteur d'utilisation allant de 0,25 à 0,5. De même, dans les îles Canaries, le facteur d'utilisation est déterminé en fonction des typologies résidentielles (immeubles d'appartements, maisons jumelées et individuelles) et des caractéristiques de la toiture. C'est dire que la valeur varie de 0,35 à 0,48 (Schallenberg-Rodríguez, 2013). Dans une autre étude en Espagne, Ordóñez et al. (Ordóñez, Jadraque, Alegre, & Martínez, 2010) ont trouvé des facteurs d'utilisation plus élevés en Andalousie, variant de 0,51, 0,53, 0,54, dans les maisons individuelles et les immeubles de grande hauteur.

Les facteurs d'utilisation trouvés dans la présente étude sont relativement faibles par rapport aux valeurs de la littérature. Ces résultats inférieurs peuvent être expliqués par la nature et la configuration des toits, qui ont un caractère plus encombré dans le cas étudié. Cependant, la quantité d'irradiation solaire reçue annuellement est plus importante ce qui signifie que le rendement des panneaux est plus important.

Table 8. Comparaison de la valeur UF par rapport à la revue de littérature.

	Utilisation factor				
	Présente étude	(Ram, et al 2013)	(Karteris, et al 2013)	(Schallenberg-Rodríguez, 2013)	(Ordóñez, Jadraque et al , 2010)
Individuel (SF)	0.18	0.2	-	0.35	0.51
Collectif (MS1) (MS2)	0.35		0.25 -0.5	0.48	0.54

2. Le potentiel technique

Parallèlement aux centrales solaires en sites isolés, les résultats de notre analyse révèlent que Laghouat pourrait être une municipalité leader en matière d'efficacité énergétique, avec la part d'énergie renouvelable la plus élevée du pays. En effet, la surface de toit appropriée pour les panneaux PV, en considérant l'FU de chaque typologie est d'environ 383 709,2 m². La production annuelle d'électricité obtenue en installant le système PV sur cette surface est évaluée à 90 148 816,32 kWh. Une telle quantité d'électricité annuelle pourrait remplacer 55% de la consommation totale d'électricité résidentielle, qui est habituellement produite à partir de sources d'énergie fossiles.

Le but de l'estimation d'un potentiel technique est d'offrir une vision analytique, qui aiderait à développer une politique énergétique. Le plan directeur proposé représente un outil crucial d'aide à la décision, permettant ainsi de révéler l'avantage de la production PV distribuée. Il contribue à informer les pouvoirs publics et les acteurs concernés de l'option stratégique à adopter afin d'aboutir à un équilibre énergétique, conduisant les quartiers à une consommation zéro. En outre, il offre aux investisseurs et aux consommateurs d'électricité un aperçu de la configuration

optimale des toits, ce qui permet de tirer pleinement parti des toits disponibles et d'obtenir des bénéfices d'investissement élevés.

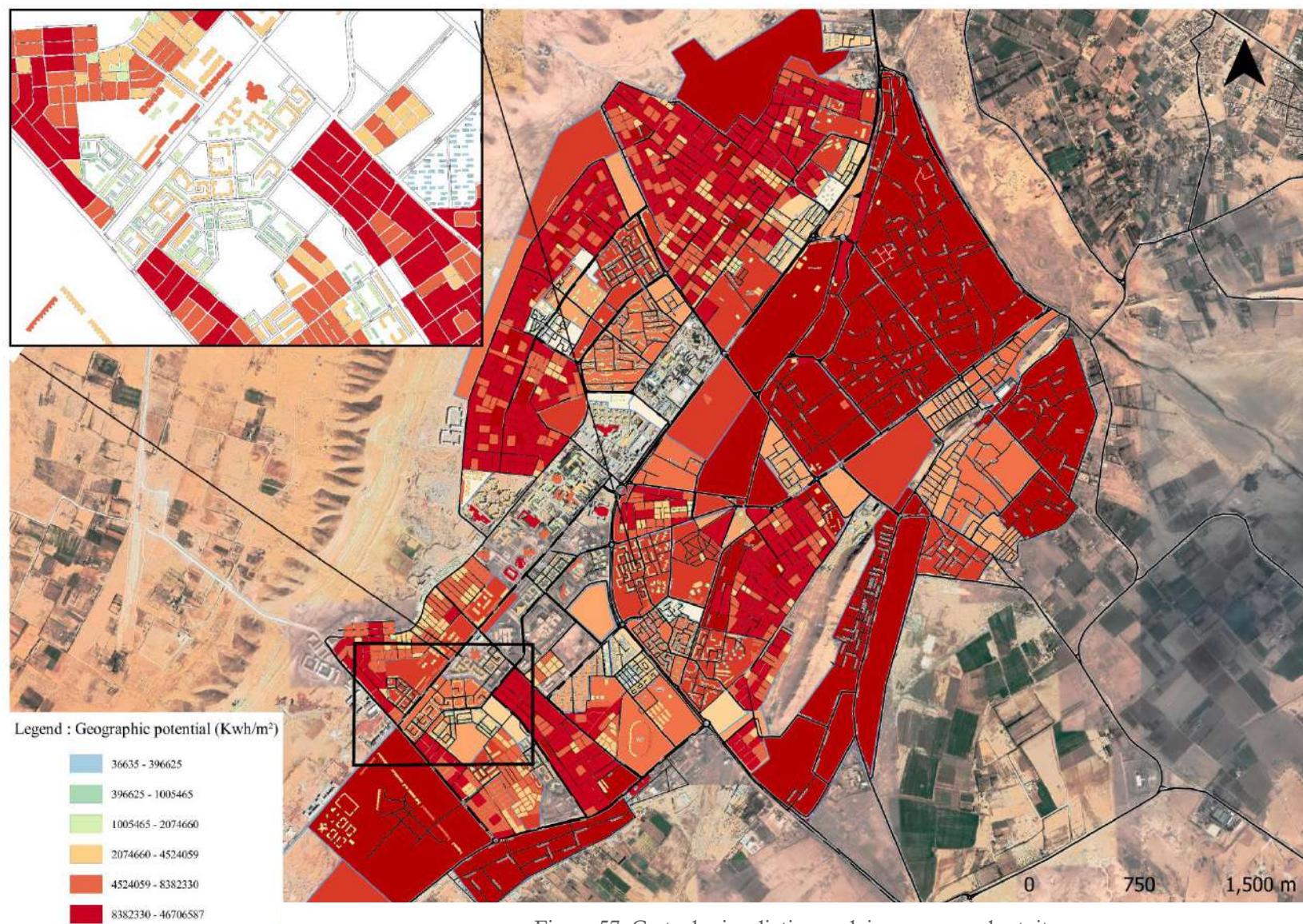


Figure 57. Carte des irradiations solaires reçues sur les toits.



Figure 58 .Carte du potentiel Solaire Technique à Laghouat.

3. Le bilan énergétique

L'agrégation des résultats du potentiel photovoltaïque au niveau des unités urbaines permet d'établir le bilan énergétique. En se basant sur les résultats obtenus, nous concluons que les quartiers (ID : 6.7.18) sont les plus productifs en énergie car ils atteignent même plus de 100% de la consommation annuelle d'électricité. D'autre part, les quartiers composés d'un (ID : 9.14.15) ont un potentiel moindre, couvrant seulement 24-33% du besoin.

Dans l'ensemble, l'analyse du potentiel technique démontre que l'habitat collectif et semi collectifs de type 1 (MS1) et de type 2 (MS2) peuvent couvrir 20-24% et 43% de leurs besoins annuels en électricité, respectivement. La consommation électrique de l'habitat collectif dépend du nombre d'appartements, tandis que la production photovoltaïque dépend de la taille du toit. Afin d'améliorer l'équilibre énergétique de cette typologie, les façades latérales, lorsqu'elles sont bien orientées, pourraient également être utilisées pour la production photovoltaïque.

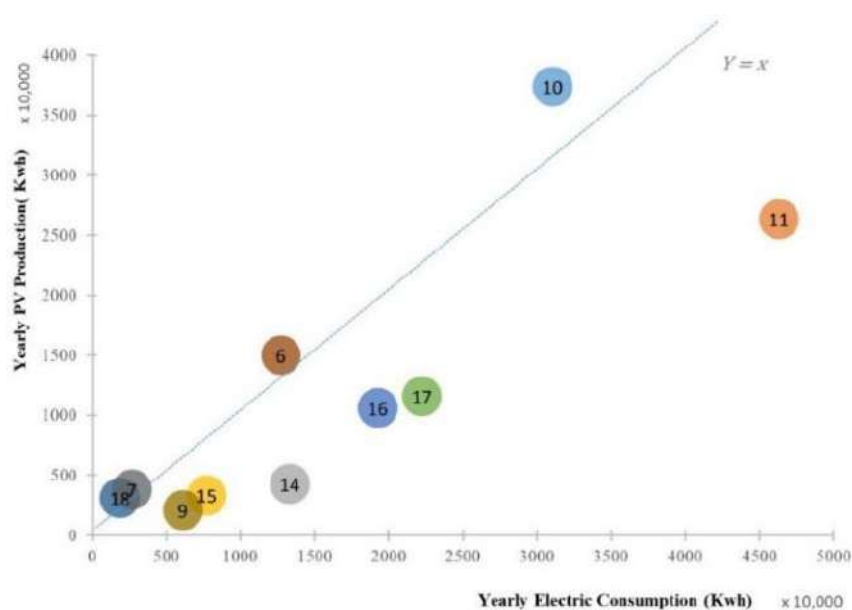


Figure 59. Classification des unités urbaines de Laghouat selon leur bilan énergétique.

Table 14. Table récapitulatif du potentiel solaire technique par quartier.

ID	NAME	Housing Type /Number /Percentage	Nor population	Estimated Yearly Consumption (Kwh)	Total Area (m2)	UF	Suitable Area (m2)	Estimated Yearly PV Potential (KWh)		
10	Oasis Nord	Single-Family (SF)	2556	67%	15336	20900974.32	626220	0.18	112719.6	26482396.5
		Multi-story apartment (MS1)	1240	33%	7440	10139752.8	26997.975	0.35	9449.29125	2220020.986
11	Hai 11 December	Single-Family (SF)	1803	32%	10818	14743527.66	315525	0.18	56794.5	13343326.88
		Multi-story apartments (MS2)	854	15%	5124	6983345.88	36210	0.35	12673.5	2977518.125
		Multi-story apartments (MS1)	3006	53%	18036	24580723.32	47100.506	0.35	16485.1771	3873035.358
14	ZHUN 1	Multi-story apartments (MS2)	148	9%	888	1210228.56	6290	0.35	2201.5	517221.4583
		Multi-story apartments (MS1)	1482	91%	8892	12118640.04	33345	0.35	11670.75	2741931.563
15	ZHUN 2	Multi-story apartments (MS2)	144	15%	864	1177519.68	6120	0.35	2142	503242.5
		Multi-story apartments (MS1)	800	85%	4800	6541776	24848.59	0.35	8697.0065	2043278.849
16	Hai El Mhafir	Single-Family (SF)	888	38%	5328	7261371.36	93240	0.18	16783.2	3943053
		Multi-story apartments (MS2)	784	33%	4704	6410940.48	33320	0.35	11662	2739875.833
		Multi-story apartments (MS1)	684	29%	4104	5593218.48	17468.9	0.35	6114.115	1436453.09
17	Hai El Wiam	Single-Family SF	1177	88%	7062	9624587.94	123585	0.18	22245.3	5226321.375
		Multi-story apartments (MS2)	168	11%	1008	1373772.96	7140	0.35	2499	587116.25
		Multi-story apartments (MS1)	1374	86%	8244	11235500.28	37161.613	0.35	13006.5646	3055768.469
18	Hai Moudjahidin	Single-Family (SF)	231	100%	1386	1888937.82	56595	0.18	10187.1	2393362.125
6	El Maamoura	Single-Family (SF)	1558	100%	9348.239657	12740435.38	272656.99	0.18	49078.2582	11530469.35
7	Hai EL Makam	Single-Family (SF)	331	100%	1986	2706659.82	69510	0.18	12511.8	2939528.25
9	Hai 5 juillet	Multi-story apartments (MS1)	750	100%	4500	6132915	19395.75	0.35	6788.5125	1594896.359

L'habitat individuel, quant à lui, est plus proche de l'équilibre énergétique. La taille des parcelles à Laghouat varie entre 150 et 350 m². Une parcelle de 250 m² constitue la taille optimale pour répondre à 91 % des besoins annuels en électricité. La taille de 350 m² pourrait être pertinente pour encourager les bâtiments connectés à l'avenir. Néanmoins, ces résultats doivent être interprétés avec prudence car la consommation d'électricité est basée sur le recensement national indiquant le taux d'occupation par logement et le taux de consommation par habitant, tandis que la taille du toit n'est pas nécessairement en corrélation avec le nombre de résidents.

4. Scenarios d'équilibre pour atteindre NZE à l'échelle de la ville

Dans l'objectif d'atteindre le *net zero energy* au sein du système énergétique urbain et optimiser les interrelations complexes entre l'offre et la demande d'énergie, nous proposons la mise en œuvre d'un modèle de partage intelligent qui gère les typologies résidentielles dans la même unité urbaine ou entre les unités de manière interactive en fonction de leur potentiel de production solaire.

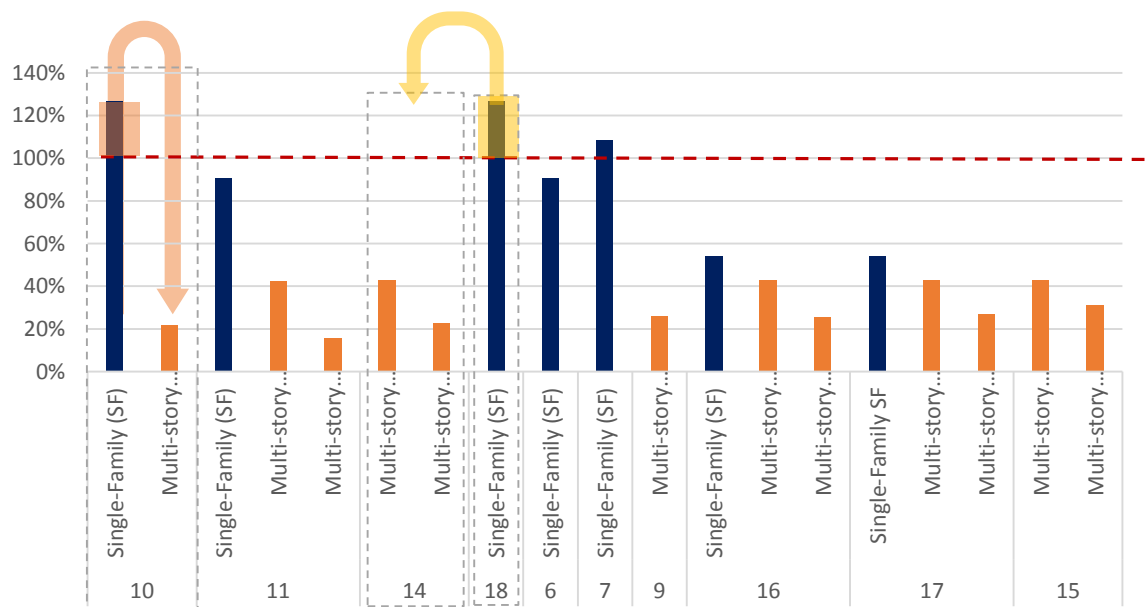


Figure 60 .Principe des scneraios d'equilibre pour atteindre NZE .

4.1. Produire et partager au sein de la même unité urbaine

En fonction des densités horizontales et de l'utilisation mixte des topologies résidentielles dans un seul quartier, nous concluons que les quartiers composés uniquement de logements individuels (ID : 6.7.18) sont les plus productifs en énergie, atteignant même plus de 100% de la consommation annuelle d'électricité. D'autre part, les quartiers composés uniquement d'appartements à plusieurs étages (ID : 9.14.15) ont un potentiel moindre, couvrant seulement 24-33%. Comme discuté précédemment, les logements collectifs peuvent couvrir entre 20-24%%, le semi-collectif 43% de leurs besoins annuels en électricité, tandis que l'habitat individuel peut répondre à 85- 120 % des besoins annuels en électricité en fonction de la taille des parcelles.

Ceci nous mène à considérer l'avantage potentiel d'une infrastructure du réseau intelligent qui gère l'offre et la demande entre les typologies résidentielles au sein du même quartier. Cette gestion intelligente de l'énergie offre la possibilité de partage de l'énergie photovoltaïque entre les bâtiments résidentiels. Un tel scénario devrait permettre d'améliorer l'efficacité énergétique et optimiser le contrôle de l'énergie entre les bâtiments interconnectés pour atteindre le quartier net zéro (Amado et al., 2017).

Effectivement, ces résultats suggèrent un modèle de planification urbaine et énergétique intéressante pour atteindre un quartier à Net-zéro d'énergie. En d'autres termes, un quartier composé de 14% du type résidentiel 1 (MS1), 14% du type résidentiel 2 (MS2) et 71% d'une maison individuelle pourrait être autosuffisant. Ce modèle promeut, techniquement et socialement, un mélange optimal de typologies résidentielles, en partageant et en appariant l'énergie entre les typologies au sein de la même unité urbaine.

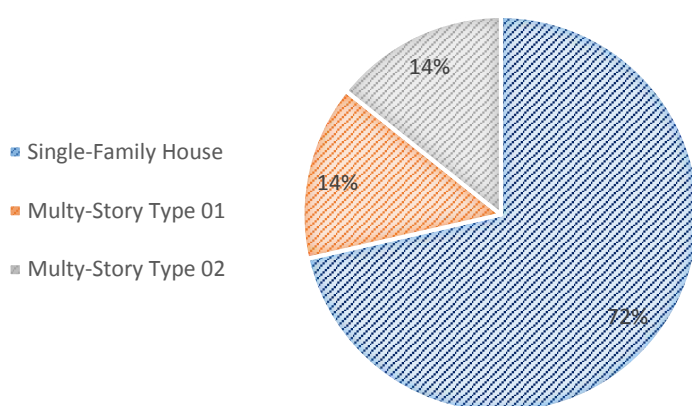


Figure 61 Le mix optimal des typologies résidentielles pour atteindre le NZE

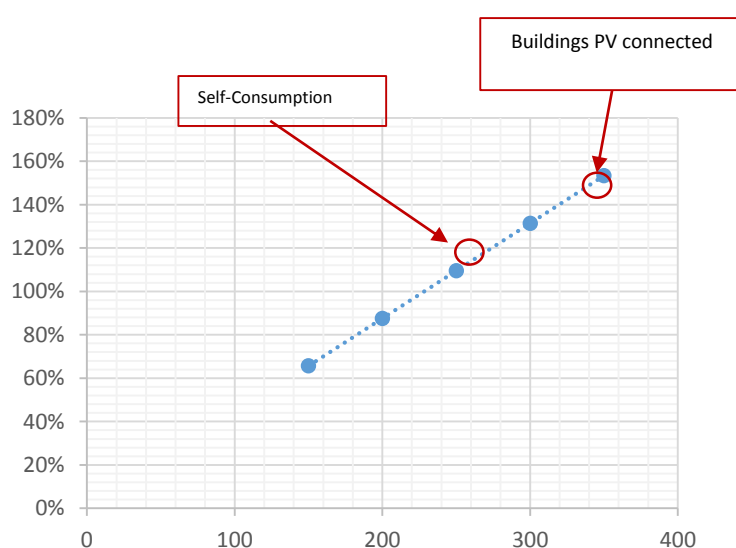


Figure 62 Le bilan énergétique en fonction de la taille des parcelles

Il est globalement reconnu que le scénario des systèmes de micro génération PV sur les toits appropriés de tous les bâtiments permet aux propriétaires de systèmes PV à petite échelle de consommer l'électricité produite ou de vendre l'excédent d'énergie produite au réseau aux prix du marché. Le réseau à basse tension existant présente un ensemble de nœuds de connexion pour la gestion de l'approvisionnement solaire à partir des microsystèmes de production PV à travers l'unité urbaine.

Le scénario " Produire et vendre " suppose l'adoption d'un ensemble de systèmes intelligents (Niemi, Mikkola, & Lund, 2012), à savoir :

- L'installation des compteurs intelligents dans chaque logement pour collecter des données sur la consommation d'énergie et les transmettre au compteur intelligent collectif situé dans le bâtiment ;
- L'installation d'un compteur intelligent collectif dans chaque bâtiment constitue le serveur central pour la collecte des données sur la consommation d'énergie de tous les compteurs intelligents des consommateurs et des données sur la production d'énergie des systèmes de micro-génération PV. Il gère l'équilibre quotidien, mensuel et annuel entre la production et la consommation ;
- L'installation d'un nœud de connexion sur le réseau de distribution public assure la communication avec le compteur intelligent collectif. Celui-ci supporte la gestion, le suivi et l'optimisation des flux d'énergie produits sur le site et ceux fournis par le réseau de distribution public.

D'un point de vue urbanistique, les suggestions émergent concernent l'efficacité énergétique, la promotion de l'énergie solaire et la réglementation. En ce sens, la hiérarchie des compteurs intelligents et des bâtiments au réseau de distribution public, peut permettre une amélioration holistique de l'efficacité énergétique, couvrant trois niveaux différents : le consommateur, le bâtiment et le quartier. En outre, le compteur intelligent du consommateur, qui contrôle les coûts de l'électricité, l'informe sur la manière dont il utilise son énergie, sur l'efficacité de ses

appareils électriques et sur les moyens de l'améliorer. D'autre part, le compteur intelligent collectif, qui contrôle la performance énergétique du bâtiment, permet d'identifier et d'évaluer l'efficacité énergétique globale à l'échelle de l'unité urbaine

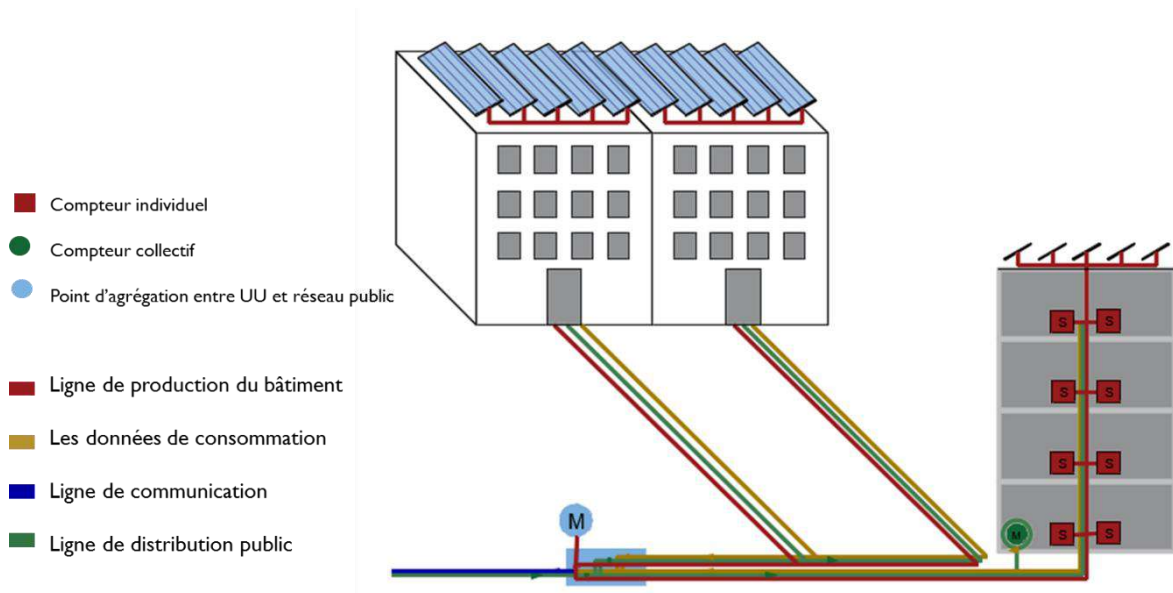


Figure 62. Partager au sein de la même unité d'agrégation urbaine.

4.2. Produire et partager entre plusieurs unités urbaines

L'agrégation des résultats du potentiel technique dans les unités urbaines montre que l'approvisionnement potentiel d'un système PV sur les toits permet de classer les unités urbaines en quatre (4) types :

- Unité Positive ;
- Unité Négative ;
- Unité Net zero ;
- Unité Nearly- zero.

Au cours des dernières années, plusieurs recherches ont montré la nécessité de considérer la ville comme une plateforme de production d'énergie locale. On

constate un intérêt croissant pour les projets pilotes de déploiement de réseaux intelligents et d'infrastructures de communication d'énergies renouvelables et même d'intégration de véhicules alternatifs (Sartori, Napolitano, & Voss, 2012 ; Niemi, Mikkola, & Lund, 2012 ; Guen et al., 2018 ; Waibel et al., 2019).

Cependant, ces études n'incluent pas des aspects importants tels que la morphologie urbaine, les modes d'utilisation des sols, les typologies résidentielles que nous avons considérées dans notre recherche. En effet, la particularité de notre approche est de coupler les seuls aspects techniques des réseaux intelligents afin de développer des scénarios pour l'environnement urbain complexe de la ville et créer, ainsi, une relation cohérente entre la planification urbaine et la gestion de l'énergie. Dès lors, l'unité urbaine permet d'explorer et de discuter un ensemble de scénarios schématiques de réseaux intelligents qui peuvent être développés en tenant compte de la perspective spatiale et temporelle de la planification urbaine.

La possibilité de créer un système de réseaux interconnectés est à la base du scénario. Celui-ci diffère du scénario précédent en termes de mécanisme économique, qui est basé sur le différentiel entre les coûts et les gains en énergie consommée et en énergie produite, dans lequel l'approvisionnement PV total de l'unité urbaine est vendu au réseau public et les gains de cette vente sont partagés entre les producteurs de manière pondérée.

Le schéma du scénario "Produire et partager" est mis en œuvre sur le principe d'un micro-réseau. Dans un modèle connecté au réseau, qui collecte l'offre solaire PV à l'intérieur des limites de l'unité urbaine et l'injecte dans un réseau de distribution public au moyen d'un nœud d'agrégation et de contrôle, le nœud d'agrégation et de contrôle assure le comptage et la gestion des droits aux bénéficiaires qui sont traités en fonction des différents modèles de consommation d'énergie de chaque consommateur/producteur. Ce scénario est basé sur le concept que l'énergie solaire est une ressource commune de la cellule urbaine. En tant que tel, le facteur économique est associé à la responsabilité sociale de surveiller la consommation

d'énergie et de promouvoir les comportements d'efficacité énergétique. Ici, le mécanisme clé est que l'habitant qui améliore sa performance énergétique dans le logement aura un retour économique plus élevé de la vente de l'électricité, générée par les photovoltaïques installés dans tous les bâtiments de l'unité urbaine, que celui qui montre des modèles de consommation plus élevés que les valeurs moyennes.

De cette façon, les compteurs intelligents des consommateurs et les compteurs collectifs collectent un grand nombre de données relatives à la performance énergétique de chaque bâtiment, qui sont mises à la disposition des décideurs et des techniciens chargés de la planification et de la gestion urbaine, de la systématisation et de la standardisation des informations pour modéliser, et de la comparaison et du test des scénarios de bilan énergétique dans toute la ville.

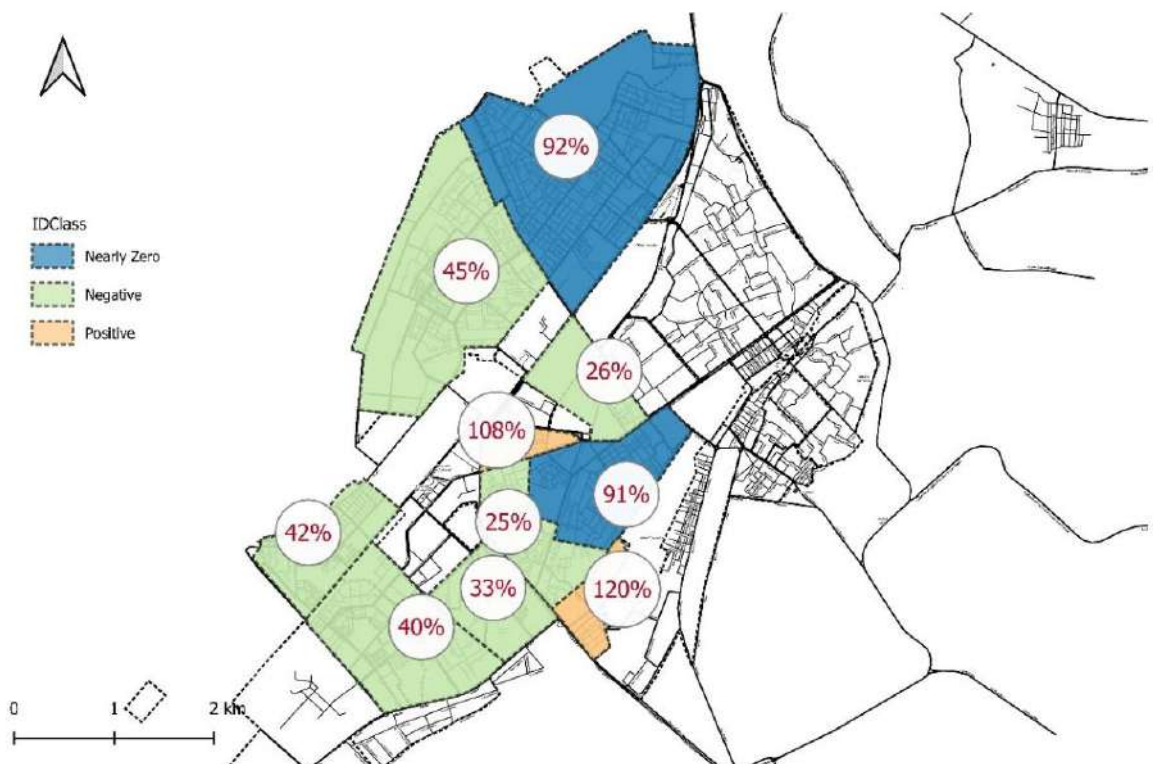


Figure 63. Carte classification des unités urbaines à Laghouat selon leur bilan énergétique

Cependant, ce scénario reflète également un autre problème important. Il s'agit du manque de capacité du réseau associé à l'approvisionnement en énergie renouvelable. En effet, l'augmentation des énergies renouvelables aura certainement de profondes conséquences en termes de structure des réseaux et des villes. Ici, il est important de souligner la portée stratégique de ce scénario qui promeut le concept d'équilibre énergétique comme moyen de créer une connexion efficace entre les cellules urbaines, où les flux de production et de consommation d'énergie sont équilibrés par des réseaux intelligents en fonction des performances négatives, positives et neutres de chaque unité urbaine à travers la ville.

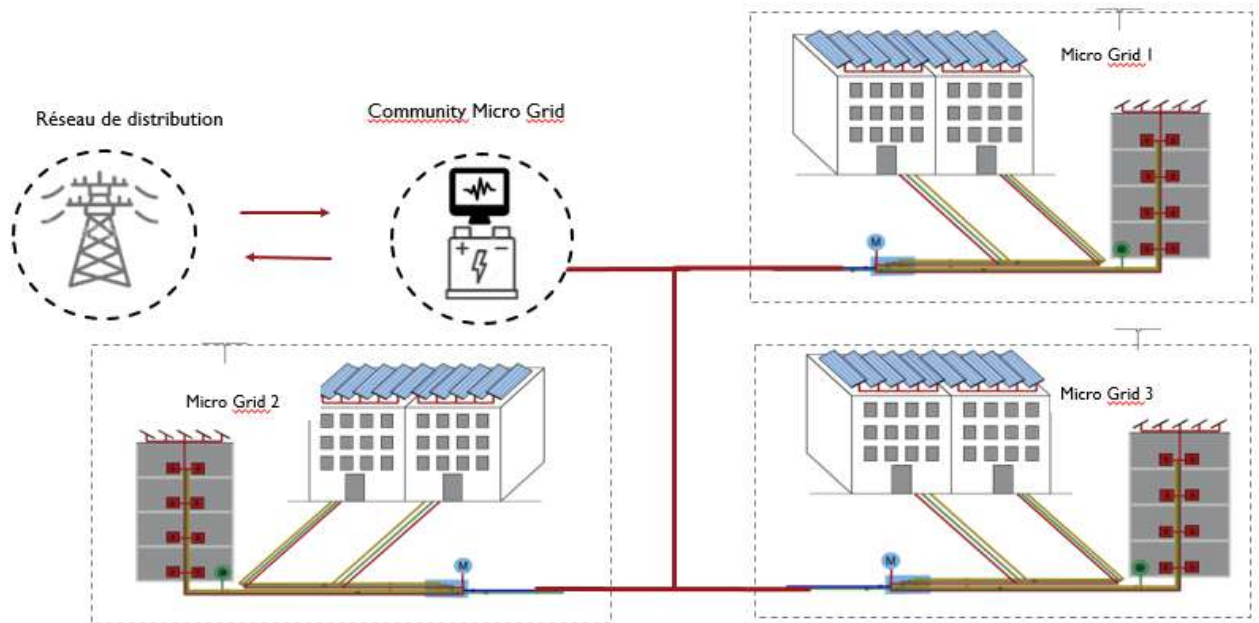


Figure 64 4.2. Produire et partager entre plusieurs unités d'agrégation urbaines .

Conclusion

L'estimation du potentiel solaire sur les toits urbains est une tâche complexe, notamment en raison du manque de ressources et l'absence de données. À cet égard, le présent chapitre propose une approche fiable basée sur la méthode combinée d'ingénierie-statistique afin d'évaluer le potentiel solaire PV sur les toits résidentiels.

Les résultats de ce chapitre révèlent que l'élaboration de cartes du potentiel géographique et technique est extrêmement utile pour la planification de l'énergie solaire. L'analyse fournit un résultat précieux concernant le facteur d'utilisation dans le secteur résidentiel. Le facteur d'utilisation fiable pour les installations PV sur les toits résidentiels peut être reproduit dans des recherches ultérieures dans d'autres régions avec des types de bâtiments ou des conditions climatiques similaires.

Dans l'ensemble, le potentiel technique des toits résidentiels de la municipalité de Laghouat est estimé à 90148816.32 Kwh, ce qui permet d'obtenir 55% de l'électricité de la ville grâce au photovoltaïque, sur une base annuelle. En outre, lorsqu'on les regroupe par quartier, certains d'entre eux devraient couvrir de 24 % à plus de 100 % de la consommation électrique annuelle. Ces résultats aident à élaborer différents scénarios de planification solaire en vue de réaliser des économies d'énergie et des projets de quartiers à consommation nette zéro à l'échelle municipale.

Néanmoins, l'évaluation du potentiel technique n'est que la première étape pour soutenir le processus d'intégration de l'énergie solaire. Les feuilles de route pour l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans l'environnement bâti comprennent de multiples défis que l'on cherche à relever. L'évaluation solaire des typologies résidentielles collectives a démontré des valeurs relativement faibles. Seulement 35 % de la surface de la toiture peut être utilisée pour l'installation de systèmes photovoltaïques, ce qui pourrait couvrir 24 à 43 % des besoins des bâtiments en fonction du nombre d'appartements. Par conséquent, dans le prochain chapitre nous consacrons notre attention sur l'influence des paramètres morphologiques sur la

production solaire en fonction des données climatiques de la ville. Notre objectif est de trouver un compromis entre les considérations énergétiques et environnementales quantitatives dans la conception des typologies résidentielles dans le contexte climatique de Laghouat pour guider les conceptions futures.

Au-delà du potentiel solaire, quelles considérations morphologiques pour une efficacité énergétique ?

Introduction :

Bien que notre recherche vise à identifier la meilleure manière d'optimiser le potentiel solaire en faveur d'une intégration des panneaux photovoltaïques pour la production de l'énergie, l'objectif consiste aussi à évaluer l'impact de l'exposition solaire sur le confort thermique dans l'un des climats du sud algérien. Par conséquent, notre attention dans le présent chapitre est consacrée à l'influence des paramètres morphologiques à travers la mesure des performances énergétiques et environnementales en fonction des données climatiques de Laghouat. Il est question de chercher un équilibre entre les considérations énergétiques et environnementales quantitatives dans la conception des typologies résidentielles afin de guider les conceptions futures

Dans ce chapitre, les principaux résultats de l'approche paramétrique sont présentés et discutés. Tout d'abord, nous décortiquons l'impact des paramètres urbains et architecturaux sur le ' $Lm \%$ ' et le ' $Otc \%$ '. Par la suite, en se basant sur les diagrammes à coordonnées parallèles, nous essayons d'investiguer l'équilibre souhaitable entre les mesures de performance en offrant de multiples scénarios de conception.

1. Impact des paramètres morphologiques sur le ($Lm\%$) :

Les résultats préliminaires autour de l'impact des paramètres urbains et architecturaux sur l'indice des correspondances des charges (Load Match %) révèlent une nette variation entre les typologies (voir figure). Sur une base annuelle, aucune des typologies n'atteint la moyenne souhaitée de 100% de Load Match (LM).

Cependant, la typologie (T3) a démontré les meilleurs pourcentages voire entre 35 et 45 % environ. La valeur moyenne de la typologie T2 est d'environ 33,08%, ce qui est plus proche de la valeur moyenne de T3 36%, tandis que la typologie T1 a enregistré la valeur la plus faible 26%. Pour commencer, nous essayons d'examiner l'impact des paramètres urbains L/H et l'orientation sur LM pour chaque typologie.

Le paramètre L/H démontre un impact significatif sur les typologies résidentielles T1 et T2. En effet, il s'agit d'une corrélation négative, c'est-à-dire plus H/l diminue, plus le pourcentage LM augmentent. Ceci est particulièrement dû aux conditions climatiques de Laghouat, où la largeur des voies renvoie à une stratégie de conceptions passives élaborées dans le but de réduire la demande énergétique, créant ainsi un important LM. Tandis que pour la typologie 3, le paramètre L/H a marqué une influence insignifiante. Malgré cela, la typologie 3 a atteint les plus grandes valeurs LM. Ceci peut être expliqué par l'aspect formel de la typologie. Il s'agit, en effet, d'une forme moins compacte avec un arrangement des blocs en forme d'U créant une cour centrale.

En ce qui concerne l'orientation, on peut observer que l'orientation NESW et NS exerce systématiquement la plus grande influence sur LM %, en particulier dans le cas de la typologie T1 et T2. Il s'avère que ces cas bénéficient de manière significative de façades latérales bien orientées qui pourraient recevoir l'installation de PV. La typologie T3, en revanche, semble être considérablement moins sensible à l'orientation. Cela peut être attribué au fait que, contrairement aux deux autres typologies, la typologie de la cour ne conserve pas de façades latérales qui peuvent être utilisées pour l'installation de PV et peuvent effectivement produire de l'électricité.

Ainsi, lorsqu'une installation photovoltaïque sur les façades latérales n'est pas possible, l'obtention d'un LM élevé par une stratégie passive devient un scénario de conception positif. Dans ce cas, les orientations NE-SW et surtout N-S ont tendance à augmenter les besoins en refroidissement et doivent être évitées, alors que les orientations EW et NW sont plus favorables. Quant aux paramètres architecturaux, la hauteur et le nombre d'étages a engendré une grande influence sur LM% dans les

trois typologies. En effet, la densité verticale renvoie à une consommation énergétique élevée.

L'impact des ratios de fenestration sur Av LM% (10, 20 et 30 pour cent) sur LM% a été enregistré pour chaque typologie dans différents scénarios. Les résultats de la figure 64 montrent une corrélation négative entre WWR et la correspondance de la charge. Cela signifie qu'un rapport de fenêtrage élevé provoque des gains solaires et des charges de refroidissement plus élevés, donc une LM% plus faible. Ces résultats indiquent que, le WWR joue un rôle moins important que la densité verticale dans les trois typologies. En d'autres termes, même si le WWR est plus élevé en gains solaires, les charges de refroidissement augmentent (c'est-à-dire qu'il réduit l'offre d'énergie mais augmente la demande).

En somme, les deux paramètres qui exercent le plus grand impact sur la correspondance de la charge totale dans toutes les typologies sont la hauteur et le L/H . Pourtant, les WWR ont un effet global limité. L'orientation ne devient plus influente que sur les façades latérales. Il est important de rappeler que l'adéquation de la charge énergétique calculée sur une base horaire peut indiquer le potentiel de synergie entre le bâtiment et le réseau. Ainsi, le stockage d'énergie, mensuel ou saisonnier, permet d'atteindre l'objectif énergétique jusqu'à 100 % du besoin.

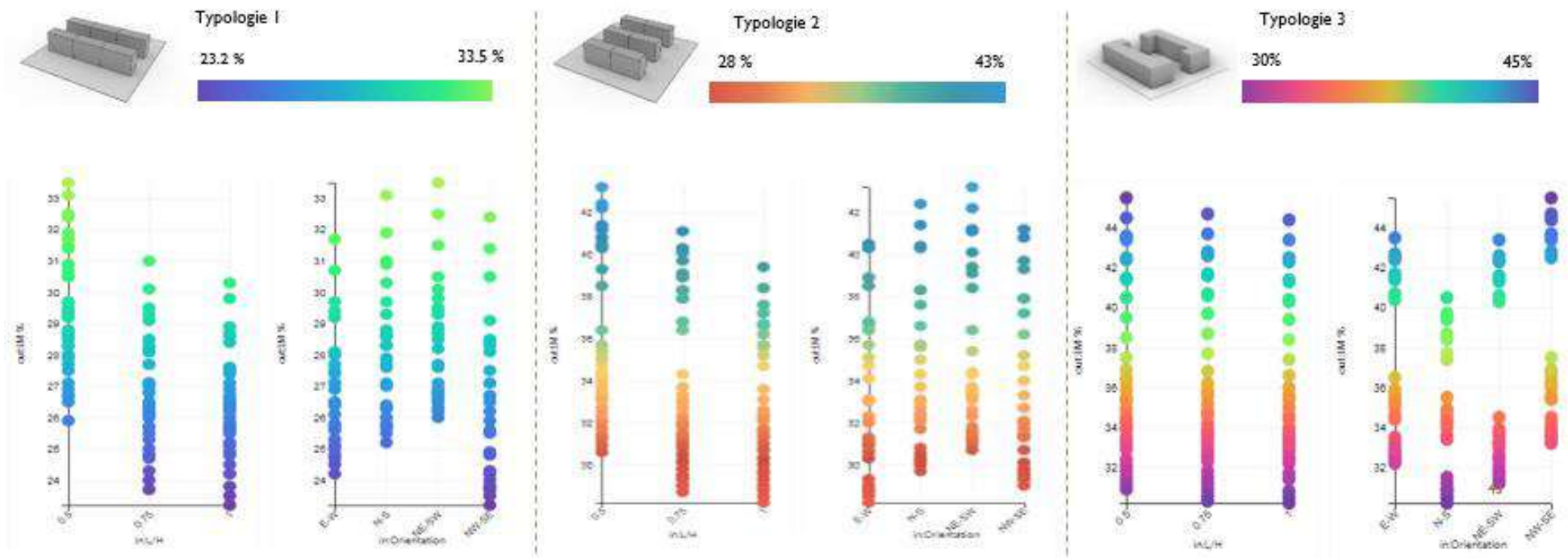
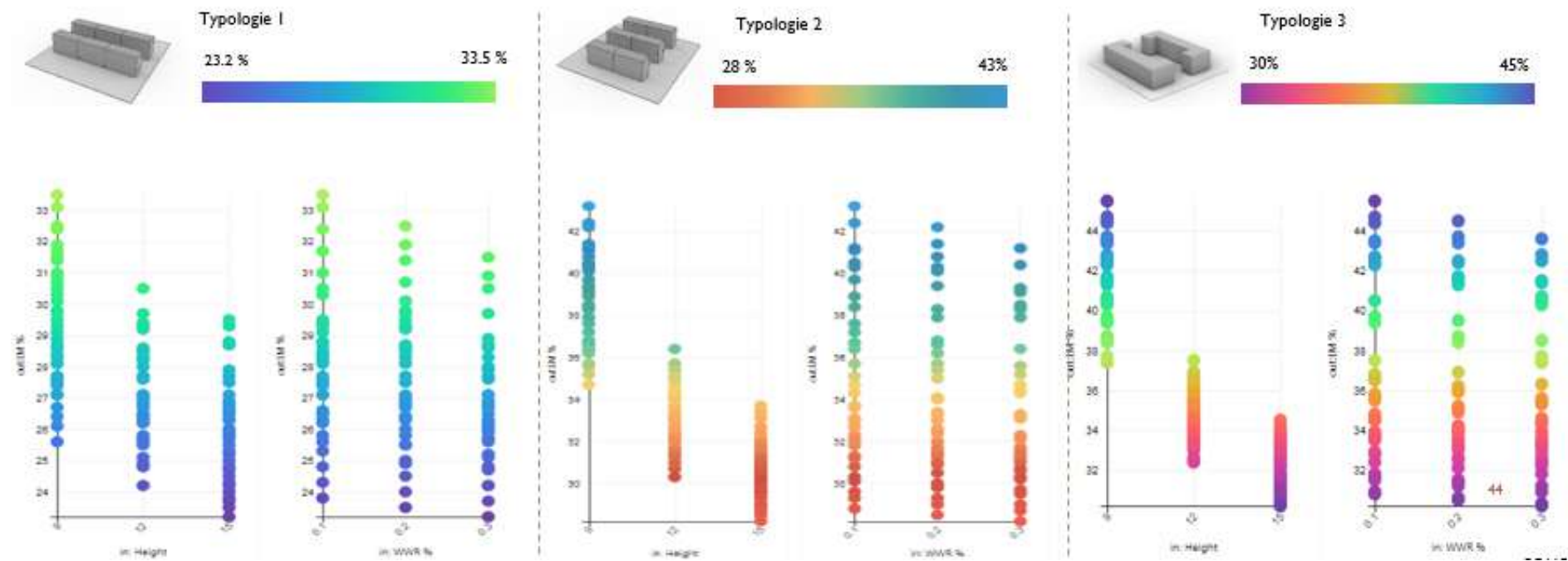


Figure 65. Impact des paramètres urbains sur l'indice de correspondance des charges (Lm%)



2. Impact sur le microclimat Otc % :

La figure 65 révèle globalement les tendances de l'impact des paramètres urbains et architecturaux pour chaque typologie sur les valeurs du confort extérieur durant une semaine d'été typique. Pour toutes les typologies, les résultats révèlent une influence négative marquée de la largeur des rues sur le confort thermique extérieur, une corrélation positive entre la hauteur et ce dernier. En effet, pour la typologie T1, le pourcentage Otc % moyen enregistré pour un « $L/H = \frac{1}{2}$ » est de 17.27 % avec une déviation standard égale à 0.8%. Tandis que pour un « $L/H = 1$ », la valeur moyenne est de 15 % avec une déviation standard de 0.5 %. Contrairement, les hauteurs élevées offrent de meilleure valeur Otc %, à titre d'exemple, pour une hauteur « $H = 9m$ » la valeur Otc % moyen est de 15 %. Cependant pour un $H = 15$ elle est de 17.4 %. Nous notons que les variations entre les valeurs sont relativement faibles ce qui indique ces les paramètres ont un effet minime sur le confort extérieur dans cette typologie.

Parallèlement à la typologie précédente, la typologie T 2 affiche la même tendance en ce qui concerne le H/L et la densité verticale mais avec des valeurs plus élevées. L' Otc % moyen pour cette typologie est égal à 21.54 %. La valeur moyenne minimale pour une hauteur $H=9$ est de 19.4 % et 23 .6% pour une $H = 15$, avec presque le même écart type $sd= 1\%$. Pour un « $L/H = \frac{1}{2}$ », la valeur moyenne est de 22.6 % mais pour un « $L/H = 1$ » la valeur est de 20.3% avec une variation standard égale à 1.85 % pour chaque hauteur.

Quant à la typologie T3, l'impact de la largeur des voies sur le confort a généré des valeurs légèrement inférieures à la typologie T2. La valeur moyenne Otc % est de 21.3 %, maximale et de 25.25 % et minimale est de 18.3 %. Pour un « $L/H = \frac{1}{2}$ », la valeur moyenne est de 22.6 % avec un écart de 1.8 %. Par contre, quand $H = 1$, la valeur Otc % est de 19.9 % avec un écart de 1.5 %. Pour la hauteur $H = 9$, le score

moyen est de 19 % avec un écart de 0.8 %. Pour la hauteur 15 le score est de 23 % avec un écart de 1.1 %.

La variation des valeurs, en particulier dans les cas de densités plus élevées, est minime. Cependant, la variation est devenue plus considérable dans les cas de densité plus faible. Ce fait peut être expliqué par l'impact de l'ombre. En effet, afin d'illustrer la corrélation relativement bonne entre le confort extérieur et l'indice d'ombrage, nous présentons la corrélation entre les mesures de prédiction basées sur l'énergie solaire testées (indice d'ombrage) et les résultats de l'étude Otc % décrite ci-dessus. Les résultats montrent la forte corrélation et réaffirment l'influence prédominante de l'exposition solaire sur l'Otc % et l'énergie.

Cependant, il faut mentionner que le confort thermique est très variable dans un espace extérieur. La typologie T3 démontre un $si = 35.2\%$ avec une variation de 2.02 %. La typologie T2 a démontré les meilleures valeurs. En effet, le shade index SI, en moyenne est égale à 33.9.01 % avec une variation de 2 %. Ceci peut être expliqué par la distribution des blocs dans l'espace et l'ombre générée. En revanche, la typologie T1 a eu des valeurs faibles en raison de la faible couverture du site, qui entraîne une exposition au soleil plus importante dans tous les scénarios de densité. Pour mieux comprendre, les schémas des résultats de simulation de l'Otc % identifient les endroits qui sont constamment en dehors des critères d'acceptabilité du confort thermique. Cela implique que dans ces typologies, des stratégies adaptatives à travers des éléments de conception passive (tels que des dispositifs d'ombrage les arbres) seraient bénéfiques pour améliorer le confort thermique dans ces endroits.

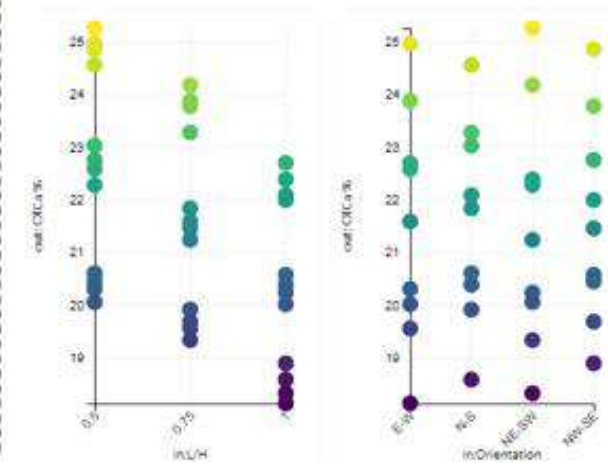
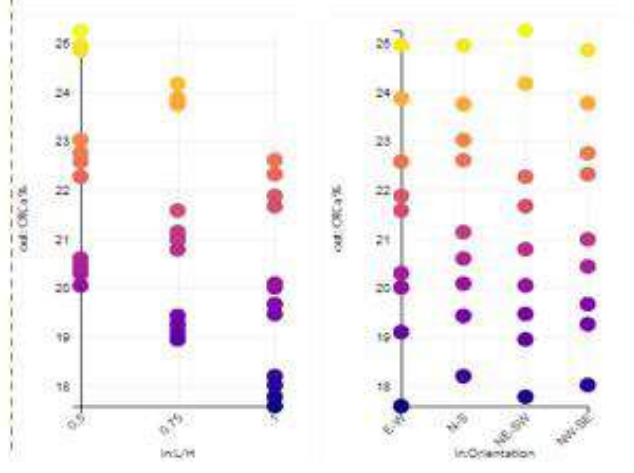
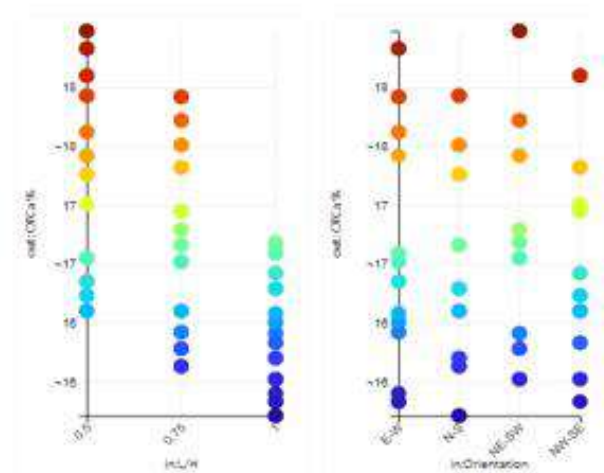


Figure 67. Impact des paramètres urbains sur l'indice de confort thermique extérieur (Otc%)

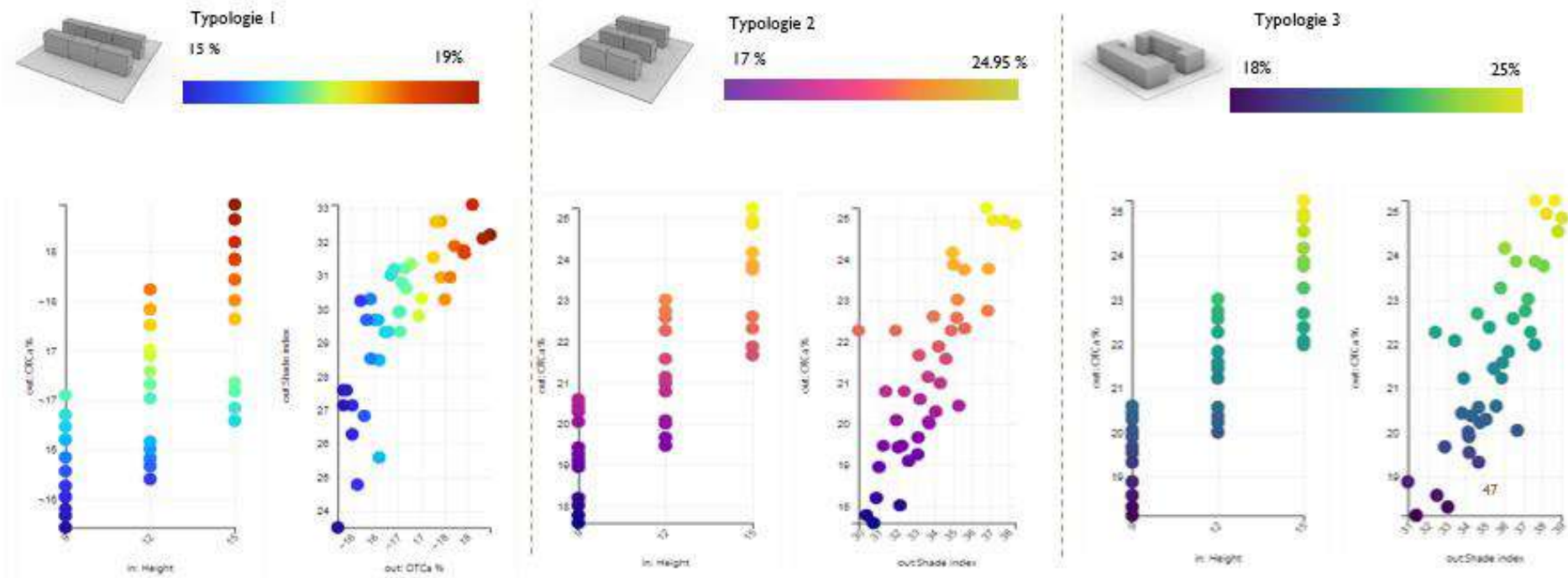


Figure 68. Impact des paramètres architecturaux sur l'indice de confort thermique extérieur (Otc%).

3.3. Etablir un équilibre entre les deux variables

Les résultats obtenus pour les 325 itérations sont tracés dans un diagramme de coordonnées parallèles (PCP) à l'aide de la plateforme en ligne *thread*, afin d'indiquer l'équilibre souhaitable qui respecte les options de performances énergétiques et environnementales pour atteindre le NZE. Les figures ci-dessous permettent une mise en évidence visuelle d'une gamme complète de résultats colorés selon la typologie. Comme indiqué, les graphiques ont sept (7) lignes verticales parallèles. Chaque axe vertical représente une variable et une métrique de sortie. Les cinq (5) premiers représentent les variables de conception. Quant aux deux (2) derniers, ils représentent les mesures d'efficacité analytique : Lm% et OTC. Chaque axe a une échelle de taille différente, qui est normalisée et disposée de bas en haut, du plus bas au plus haut.

Nous avons mis en évidence les valeurs Lm% les plus élevées de chaque typologie dans les figures ci-dessous qui représentent les scénarios optimaux. Pour la typologie T1 et T2, la combinaison définie par « $H=9$ m ; $WWR=0.1$; $L/h =0.5$ et Orientation : NESW » représente la valeur Lm% la plus élevée. De même, les deux typologies partagent également la combinaison qui offre le meilleur Otca est caractérisée par « $H=15$; $L/H =0.5$ et Orientation : NESW ». Néanmoins, la typologie T2 a démontré de meilleures performances pour les deux mesures que pour T1. Le Lm% = 43.2 % et Otc % = 25.25 % comparant à T1 qui offre seulement LM= 33.5 % et Otc % =18.48%.

Pour la typologie T3, la combinaison définie par « $H=9$ m ; $WWR=0.1$; $L/h =0.5$ et Orientation : NWSE » a abouti vers la valeur Lm% la plus élevée dans les trois typologies, soit Lm = 44.5 %. Cependant, la combinaison qui offre le meilleur Otca% équivalent à 25.23 % est caractérisé par « $H=15$; $L/H =0.5$ et Orientation : NESW ».

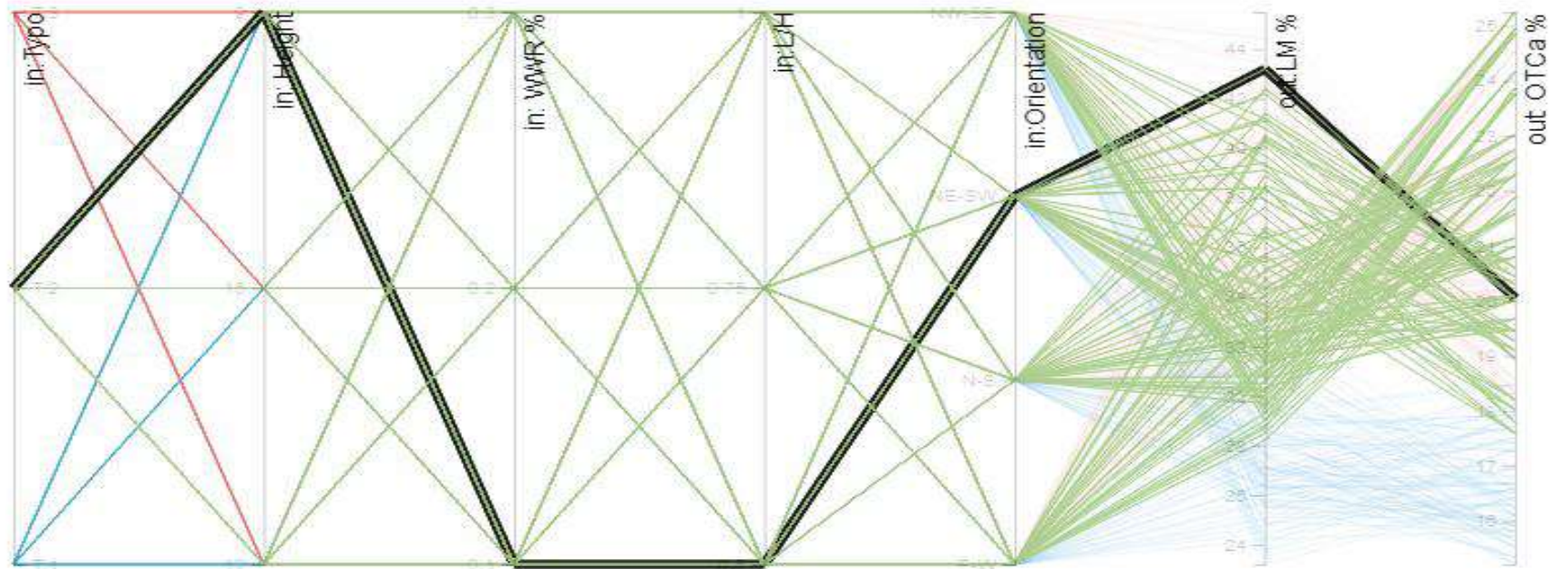
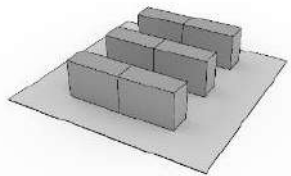


Figure 69. Scenario de conception pour la typologie T2 offrant la meilleure LM %.

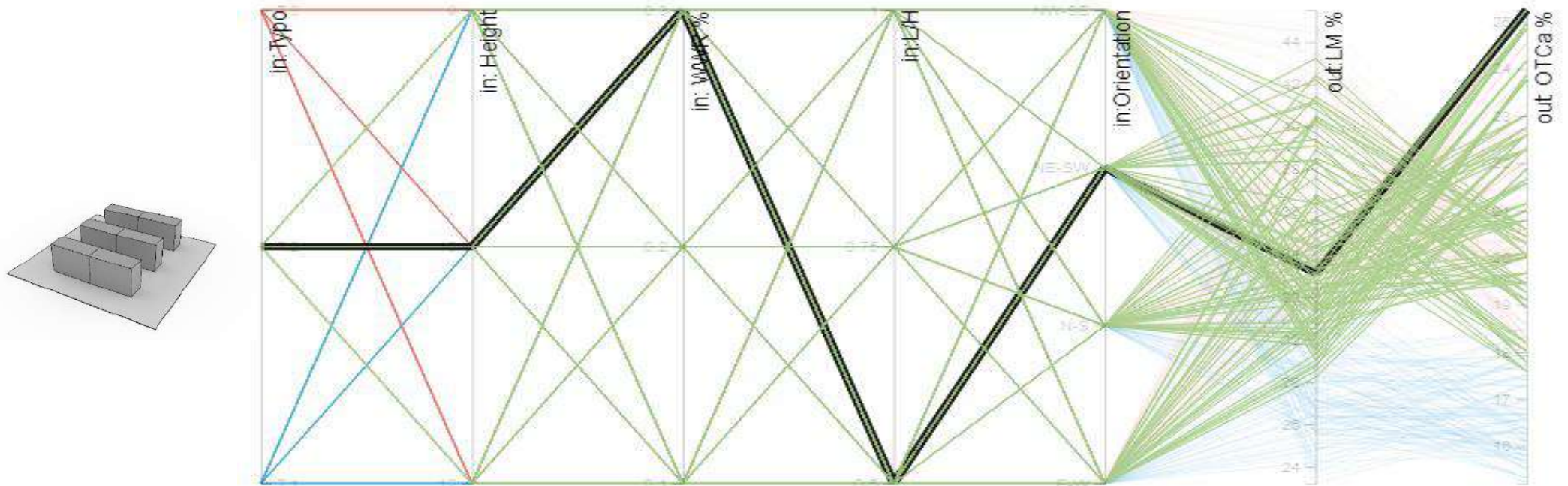


Figure 70. Scenario de conception pour la typologie T2 offrant la meilleure OTCa %.

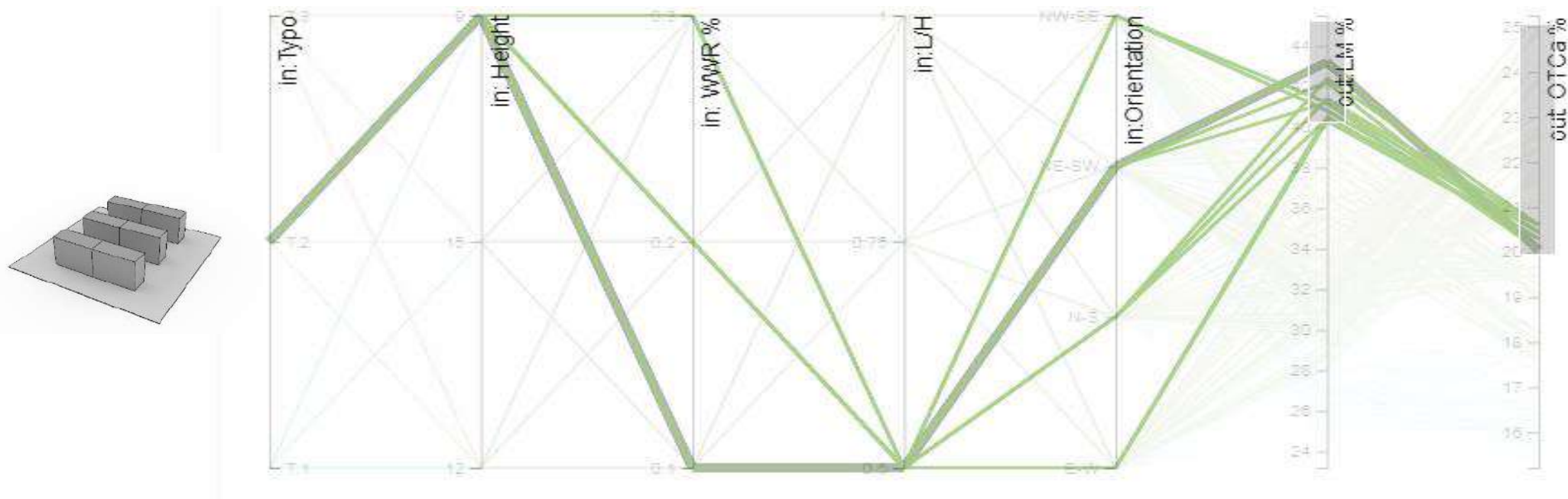


Figure 71. Multiples scenarios de conception pour la typologie T2 offrant les meilleures valeurs LMm% et Otc %.

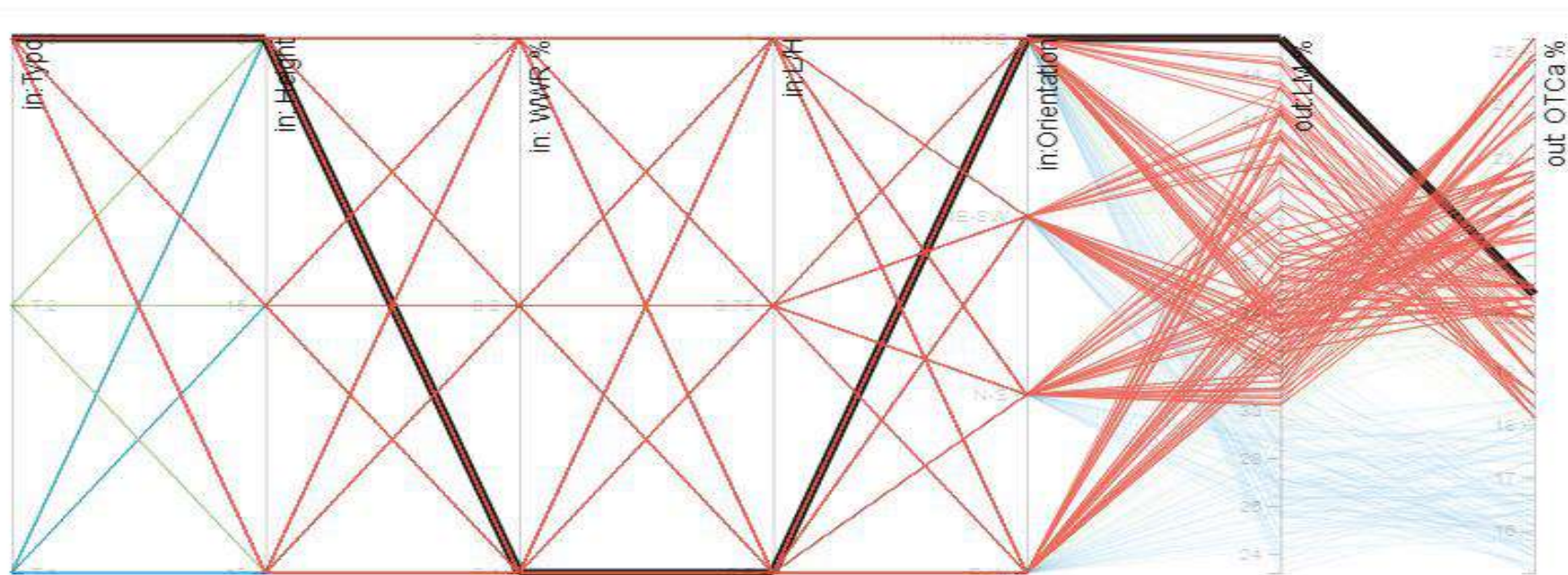
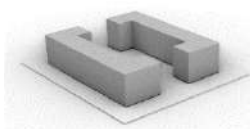


Figure 72. Scenarior de conception pour la typologie T3 offrant la meilleure LM %.

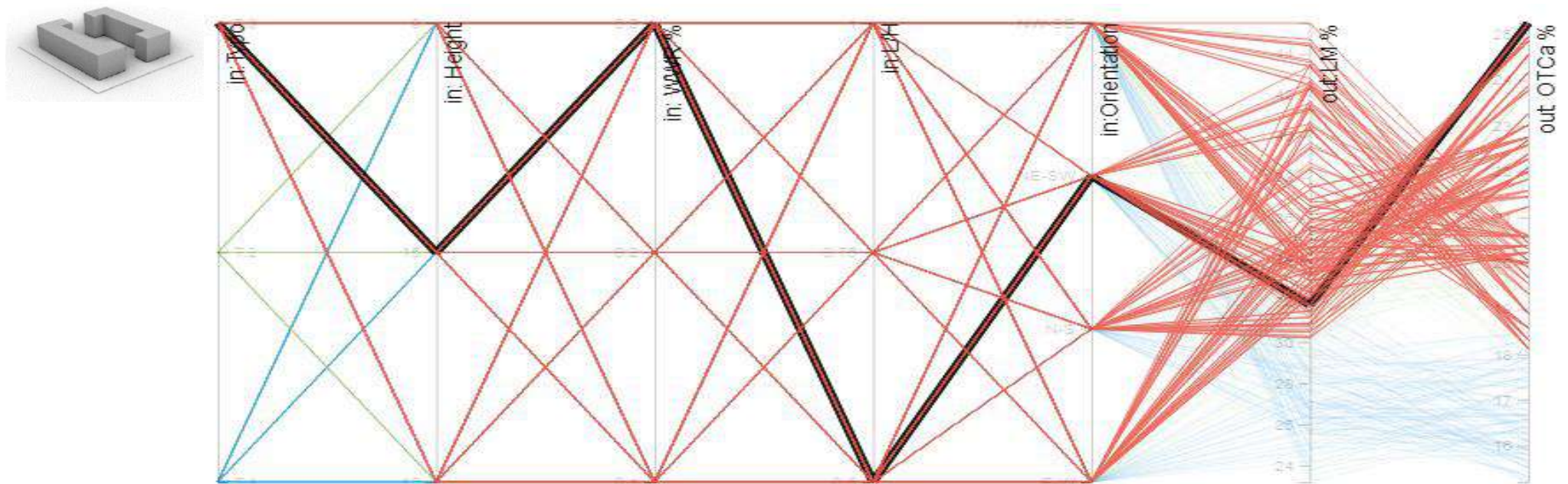


Figure 73. Scenario de conception pour la typologie T3 offrant la meilleure Otc %.

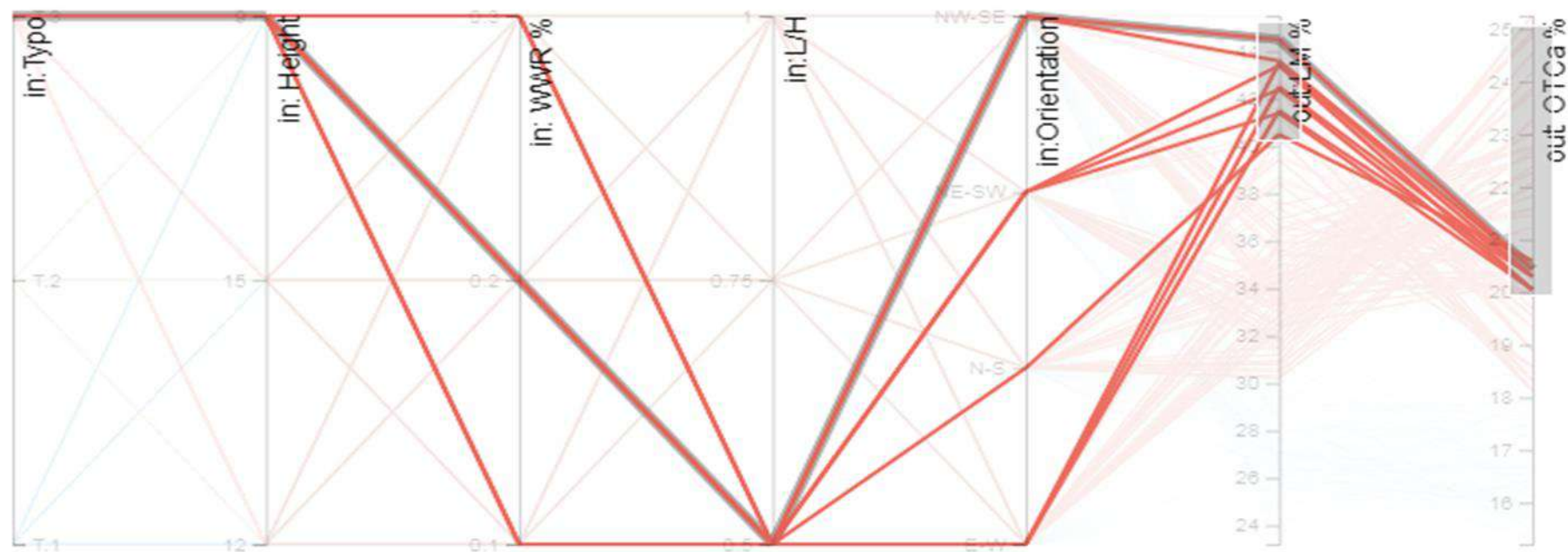
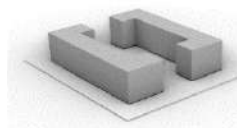


Figure 74. Multiples scenarios de conception pour la typologie T3 offrant les meilleures valeurs LMm% et Otc %.

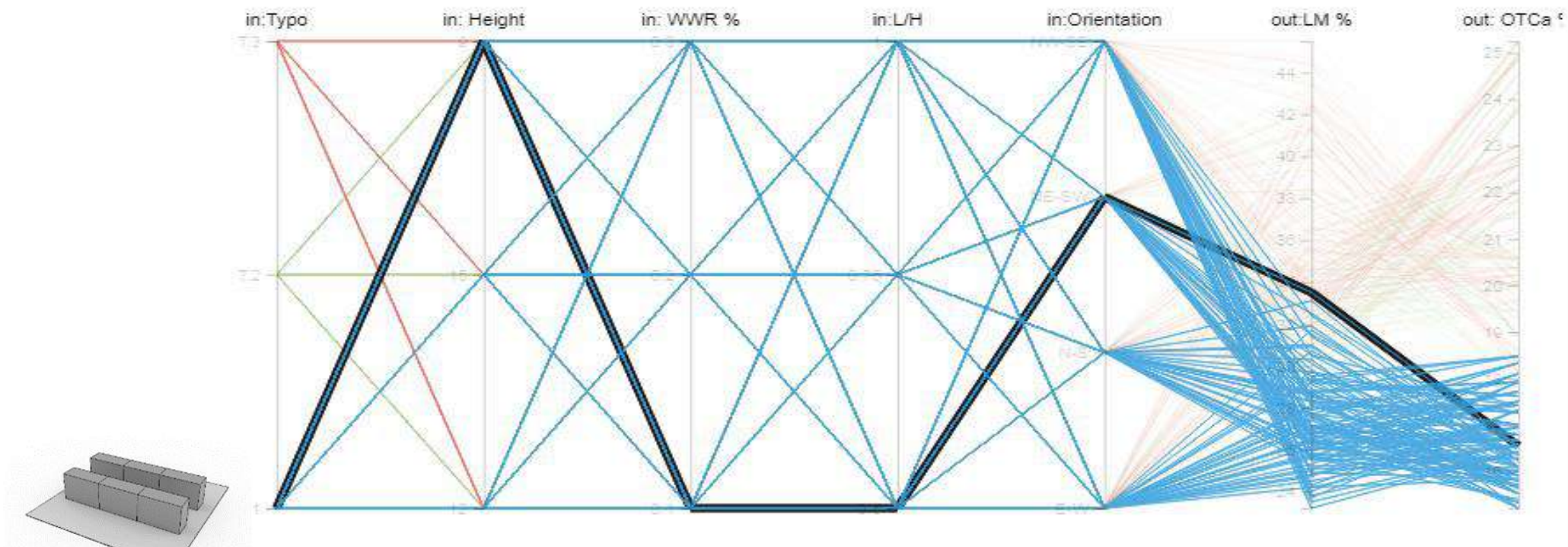


Figure 75. Scenario de conception pour la typologie T1 offrant la meilleure LM %.

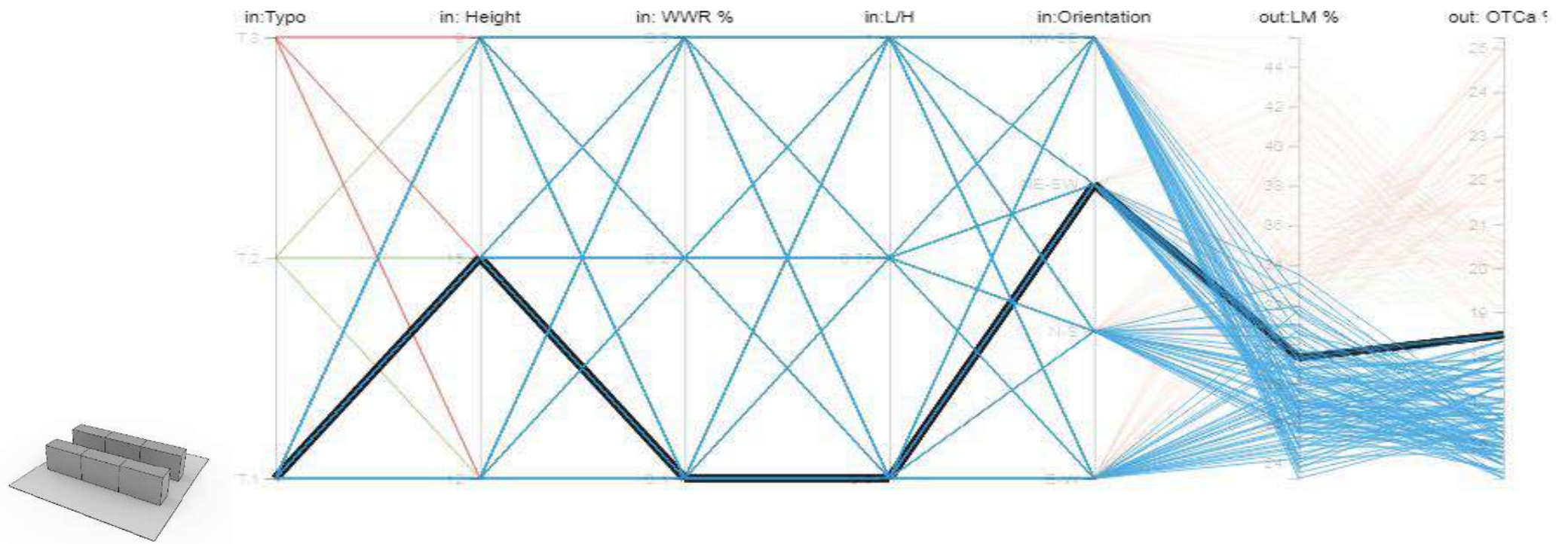


Figure 76. Scenario de conception pour la typologie T3 offrant la meilleure Otc %.

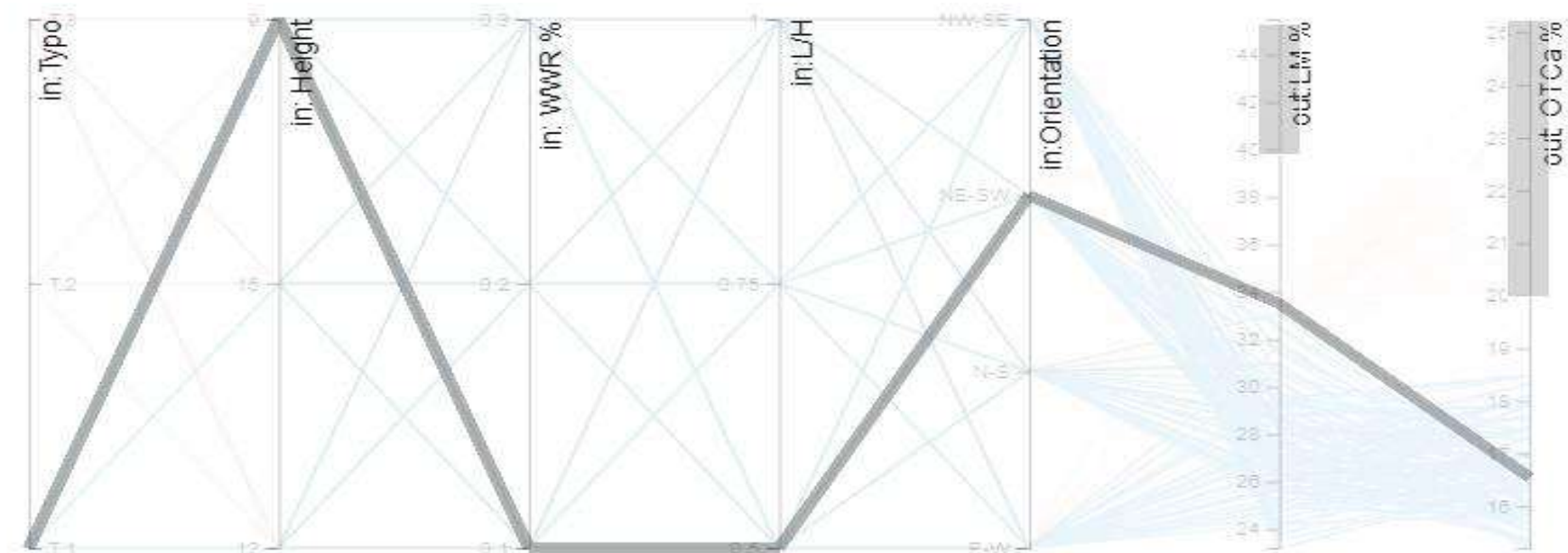
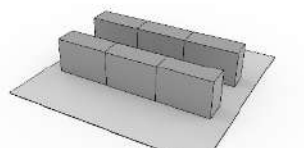


Figure 77. Multiples scenarios de conception pour la typologie T1 offrant les meilleures valeurs LMm% et Otc %.

Au final, il y a lieu d'indiquer qu'une densité verticale plus élevée dans toutes les typologies entraînera un impact positif sur la performance environnementale, c'est-à-dire un meilleur confort thermique extérieur, mais en même temps un bilan énergétique plus faible. À l'inverse, une faible densité verticale est plus performante d'un point de vue énergétique. Au niveau typologique, la typologie T3 s'est avérée favorable dans les évaluations du $Lm\%$. La typologie T2 a montré, quant à elle, la meilleure performance environnementale avec l' $Otc\%$ le plus élevé. En revanche, la typologie T1 a enregistré une plus grande vulnérabilité environnementale et un potentiel de $Lm\%$ nettement inférieur par rapport aux autres typologies. À l'instar d'autres études qui sont parvenues à une conclusion similaire (Ratti et al. 2003 ; Taleghani, 2014 ; Zhang et al., 2019), les résultats de notre recherche ont réaffirmé le potentiel de la typologie des cours intérieures à offrir une combinaison d'avantages morphologiques et microclimatiques dans des contextes climatiques chauds.

Il convient de mentionner que cette affirmation est loin d'être définitive dans la mesure où ce potentiel doit être examiné de près en fonction de l'équilibre recherché entre les performances énergétiques et environnementale. Notre objectif à travers cette étude paramétrique n'est pas de trouver une solution optimale unique ; nous cherchons plutôt à trouver plusieurs scénarios de paramètres de conception qui offrent simultanément de bonnes valeurs $Lm\%$ et $Otc\%$.

Afin d'identifier la relation entre ces mesures de performances, nous nous sommes fixés des seuils de sélection. Il s'agit de 40% pour la $Lm\%$ et de 20% pour $Otc\%$.

Les options parcourues en fonction des seuils spécifiés sont illustrées dans la figure n.70 montrant la corrélation entre $Lm\%$ et $Otc\%$ pour chaque typologie. Seules deux typologies T1 et T2 qui pourraient atteindre les seuils $Lm\%$ et $Otc\%$, sous une combinaison spécifique de différents paramètres de conception. Ces seuils n'ont été atteints que dans des densités relativement faibles ($H= 9$ et $H/le=0.5,075$) cependant, T1 ne suit aucun seuil $Otc\%$ et aucun seuil de bilan énergétique.

En général, ces résultats ont permis de contextualiser la performance des variables de conception. Le résultat montre que la faisabilité des typologies à net zéro energy n'est pas possible dans les conditions limites testées. Ceci suggère d'impliquer d'autres stratégies d'efficacité énergétique relatives aux matériaux de construction pour assurer une meilleure isolation.

L'ensemble des résultats de cette approche sont communiqués dans un tableau de bord interactif . Le tableau de bord interactif établi aide à parcourir tous les mesures de performances $L_m\%$ et $O_{tc}\%$ simulé et calculé en fonction des paramètres architecturales et urbaines. Il permet également d'identifier de scénarios de conception permettant d'atteindre des performances énergétiques et environnementales élevées et équilibrés. Ce tableau de bord interactif constitue un outil original et efficace pour guider les concepteurs dans la création de villes à travers des indications fiables et efficaces sur les niveaux de performances énergétiques et environnementales des projets dans le contexte climatique du sud d'Algérie



Figure 78 .Vue d'ensemble sur le Dashboard qui regroupent tous les résultats de l'approche paramétrique pour toutes les typologies

Conclusion

Arrivé aux termes de cette thèse, nous considérons que nous avons tenté d'obtenir des indications fiables et des scénarios de planification des projets d'habitat collectif résidentiel afin d'améliorer leur potentiel solaire et offrir en parallèle un niveau de confort extérieur dans un contexte climatique au sud algérien. Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats d'une approche paramétrique conduite dans le but d'identifier un compromis entre un bilan énergétique urbain et des considérations de la qualité environnementale. En se basant sur un processus numérique, nous avons réussi à évaluer efficacement l'impact des paramètres de conceptions architecturales et urbaines sur la performance énergétique et la qualité environnementale à travers les mesures de performance – %, et l'Otc % % - calculés via un moteur de simulation validé par la communauté scientifique pour différentes typologies résidentielles.

Les résultats sont réunis dans un Dashboard interactif qui permettra donc d'aider les concepteurs urbains à obtenir non seulement une production énergétique pour satisfaire la demande énergétique, mais également des orientations en termes d'aménagement pour améliorer le confort thermique.

Dans la seconde partie de la thèse, l'évaluation du potentiel solaire a été effectuée, en mettant l'accent sur l'impact de la morphologie urbaine sur les performances solaires et environnementales dans le secteur de l'habitat à travers l'expérimentation de nouvelles approches adoptées pour soutenir le processus d'intégration de l'énergie solaire dans un contexte climatique du sud algérien

L'enchaînement des trois chapitres de cette seconde partie a permis de présenter les résultats de l'approche méthodologique. Tout d'abord, nous avons présenté les principes de constitution et du fonctionnement la plate-forme SIG qui représente un outil de planification énergétique urbaine et joue un rôle central dans l'analyse et dissémination des résultats.

Par la suite, afin d'identifier la capacité de la commune de Laghouat à recevoir les installations solaires, une évaluation physique, urbaine et technique a été élaborée dans le chapitre 5. L'analyse a fourni le facteur d'utilisation dans le secteur résidentiel pour les installations PV sur les toits résidentiels permettant ainsi d'évaluer le niveau de performance actuel de la pratique courante dans différentes typologies résidentielles. Elle nous a permis, par ailleurs, de mesurer son potentiel pour atteindre l'objectif d'énergie zéro. La dissémination des résultats dans les plates-formes a permis d'élaborer de cartes du potentiel géographique et technique qui se sont avérées extrêmement utiles pour la planification de l'énergie solaire.

Le processus d'intégration de l'énergie photovoltaïque dans les contextes climatiques chaud comprend de multiples défis. Dans le chapitre 6, nous avons concentré notre attention sur l'évaluation de la performance solaire énergétique et de la qualité environnementale en fonction des paramètres morphologiques afin d'identifier les interrelations entre les typologies résidentielles, le confort extérieur et le potentiel solaire dans un contexte climatique du sud algérien.

Cette approche paramétrique a permis d'obtenir de nouvelles idées dans la conception des typologies résidentielles à travers l'investigation d'un compromis entre un bilan énergétique et des considérations nécessaires de la qualité environnementale. Par ailleurs, les parties analytiques effectuées via les outils numériques dans cette partie montrent la manière dont

nous pouvons examiner les paramètres de design urbain et les considérations de conception des bâtiments afin d'obtenir un impact positif en termes de performance énergétique et de qualité environnementale.

En conclusion, cette étude a contribué à élargir les connaissances existantes en matière de corrélation entre le climat, la forme urbaine et la performance environnementale, ainsi que sur les compromis entre la protection solaire et la performance environnementale. Les résultats sont réunis dans un Dashboard interactif qui sert d'un outil d'aide à la décision et peut donc aider les concepteurs urbains à obtenir non seulement une production énergétique permettant de satisfaire la demande énergétique mais également des orientations d'aménagement pour améliorer le confort thermique.

Conclusion générale.

Conclusion Générale

Pour conclure cette thèse, il convient de dresser un bilan des travaux établis. Tout d'abord, un retour aux sources de la réflexion et aux hypothèses qui ont guidées le parcours de recherche est établi. Ensuite, nous récapitulons l'approche et la démarche adoptées pour mettre en exergue les principaux résultats obtenus. Enfin, nous soulignons les limites de cette thèse et nous esquissons des éventuelles perspectives.

1. Retour aux sources de réflexion

1.1. Rappel de la problématique

Les systèmes PV distribués attirent de plus en plus l'attention des experts puisqu'ils sont privilégiés et présentés dans le monde entier comme moyen opérationnel destinés à réduire la consommation croissante d'électricité. Néanmoins, leur intégration dans la ville est principalement confrontée à des barrières de planification et, plus particulièrement, au manque de sensibilisation des acteurs à leurs ressources locales. Le déploiement réussi des systèmes PV sur les toitures nécessite ainsi un engagement plus important par le biais d'outils d'évaluation qui aident à planifier et gérer leurs applications dans les zones urbaines.

Par ailleurs, pour que l'énergie solaire se concrétise pleinement en milieu urbain, notre recherche doctorale s'est attachée à forger de nouveaux liens entre la planification spatiale (urbaine et architecturale) et énergétique en tenant compte des spécificités du contexte local. L'approche que nous proposons vise à déterminer l'impact de la morphologie urbaine sur le potentiel solaire du secteur de l'habitat au Sud de l'Algérie, et ce, afin de soutenir l'intégration de l'énergie photovoltaïque et de proposer des scénarios de gestion en fonction du bilan énergétique entre d'une part, la demande énergétique et d'autre part, la production photovoltaïque.

La particularité de notre approche a surgi de son caractère local. Le postulat que nous adopterons dans ce travail est que la morphologie urbaine des villes du sud a le potentiel de développer de l'énergie solaire en site urbanisé tolérant mieux que d'autres un système de distribution décentralisé. Ainsi son intégration imposerait une adaptation et conduirait à de nouvelles organisations urbaines et techniques pour atteindre l'objectif net-zéro énergie.

1.2. La vérification des hypothèses de départ

La démarche adoptée a pu valider l'ensembles des hypothèses :

« Les villes du sud auraient le potentiel de développer des énergies renouvelables en site urbanisé et toléreraient mieux que d'autres un système de distribution décentralisé à une échelle urbaine. »

A travers la revue de la littérature relative à l'intégration de l'énergie solaire dans la ville, nous avons mis en évidence un grand nombre de travaux de recherches relatif à l'amélioration du potentiel solaire en milieu urbain qui ont été appliquées selon de multiples échelles d'étude variant de l'échelle de la ville à celle des blocs résidentiels. L'examen des différentes approches méthodologiques indique que même si le potentiel est élevé, son intégration varie fortement en fonction des caractéristiques de chaque ville. La densité de la population, les perspectives de croissance et les profils de la demande énergétique dans les climats froids ou chauds sont autant de facteurs qui déterminent les stratégies visant à introduire les énergies renouvelables. En conséquence, les feuilles de route doivent relever des défis de leur particularité et formuler des politiques spécifiques adaptées aux options technologiques et aux cadres politiques de chaque ville.

Effectivement, les villes du Sud algériennes, dont la croissance démographique varie entre 100.000 et 500.000 habitants, sont mieux placées pour déployer des techniques d'efficacité énergétique et d'énergie renouvelable visant à atteindre le net zéro énergie. De plus, l'âge, l'état et les caractéristiques morphologiques du secteur de l'habitat influent également sur les profils de consommation énergétique qui sont à leur tour conditionnée par la zone climatique et dominée par le besoin en électricité pour la climatisation. Pour l'habitat existant, nous suggérons le solaire sur les toitures comme solution économique et efficace, et le BIPV pour les conceptions futures.

« L'intégration de l'énergies solaire photovoltaïque en milieu urbain constituerait une opportunité de passer aux réseaux intelligents et attendre le net-zéro énergie ».

L'évaluation du potentiel solaire technique à Laghouat a démontré que les bâtiments résidentiels pourraient désormais être des producteurs et consommateurs. Bien que les résultats aient révélé que pas toutes les typologies sont capables d'atteindre le net zéro, l'agrégation à l'échelle urbaine grâce aux technologies du stockage distribué, a démontré qu'elle se présente comme une solution innovante pour équilibrer l'offre et la demande d'électricité à des moments divergents et atteindre ainsi l'objectif irréalisable à l'échelle d'un seul bâtiment.

Ainsi, cette intégration photovoltaïque consiste non pas simplement à remplacer une forme d'énergie par une autre, mais à repenser l'ensemble du système énergétique avec toutes les interactions et utilisations qui y sont liées. Cela implique une conception des systèmes énergétiques urbains intelligents et intégrés, capables de gérer l'énergie variable produite entre les typologies résidentielles et de tirer parti de cette synergie où l'énergie est un facteur déterminant.

Ceci nous mène à confirmer notre première hypothèse en proposant la mise en œuvre d'un modèle de partage intelligent qui gère les typologies résidentielles dans la même unité urbaine ou entre les unités de manière interactive en fonction de leur potentiel de production solaire. Elle implique l'optimisation des interrelations complexes entre l'offre et la demande d'énergie entre les typologies résidentielles, grâce à des techniques intelligentes, un processus de gestion et une prise de décision locale.

« L'intégration des énergies renouvelables imposerait une adaptation et conduirait à de nouvelles organisations morphologiques. »

Le terme « adaptation » fait référence à deux caractères : « configurable », qui décrit sa capacité de pouvoir être finement personnalisée ; et « contrôlable », qui caractérise la capacité d'exploiter efficacement ses données favorables et défavorable.

Pour procéder à la vérification de cette hypothèse, nous avons mené l'approche paramétrique où notre attention est consacrée à l'influence des paramètres morphologiques, les mesures de performances énergétiques et environnementales en

fonction des données climatiques de Laghouat. Le but est de chercher un équilibre entre les considérations énergétiques et environnementales quantitatives dans la conception des typologies résidentielles afin de guider les conceptions futures.

Pour y arriver, nous avons développé un tableau de bord (Dashboard) interactif qui permet d'approfondir et de filtrer les outputs de nos simulations solaires et énergétiques en fonction des données morphologiques et urbaines. Cet outil offre un aperçu significatif pour les acteurs impliqués dans la prise de décision puisqu'il leur permet de visualiser de manière plus détaillée les différentes possibilités de scénarios de planification solaire destinés à améliorer l'efficacité énergétique à l'échelle du bâtiment ou même celle des projets résidentiels à NZE.

2. Les principaux résultats

Dans le cadre de cette thèse, nous avons souhaité par cette démarche scientifique et analytique de poser les fondements d'un processus d'intégration du potentiel solaire à l'échelle urbaine résidentielle comme l'une des branches phares de la transition énergétique, ayant pour but la promotion d'une planification énergétique durable à l'échelle certaines villes du Sud algériennes aux potentiels inépuisables. Son originalité, comme l'indique le titre, s'exprime à travers le terme « processus » qui réfère à l'analyse du potentiel solaire existant, lequel une fois identifié, permet de prédire et même de proposer des outils et des scénarios de gestion. Il sert également à établir un changement grâce à l'innovation qui se traduit à travers les conceptions futures. Suivant ce raisonnement, les résultats principaux de cette thèse se déclinent en trois principaux points :

- **Le facteur d'utilisation (FU) : un ratio d'estimation**

L'estimation du potentiel solaire sur les toits urbains est une tâche complexe, notamment en raison du manque de ressources et de l'absence de données. À cet égard, notre thèse propose une approche ascendante basée sur une méthode combinée d'ingénierie et de statistique afin de déterminer la surface effective pour la production d'électricité PV sur les toitures que nous avons nommée « *le facteur d'utilisation* ».

Le facteur d'utilisation déterminé prend en considération l'adéquation architecturale et solaire des toitures. L'adéquation architecturale dépend de l'occupation des

éléments structurels et équipements situés sur la surface des toits qui la rendent indisponible à des installations PV, comme les cages d'escaliers, les gaines d'aération, les réservoirs d'eau, les antennes paraboliques ...etc. Tous ces obstacles spatiaux possibles ont été résumés et catégorisés en fonction de leur nature et leur surface moyenne. De plus, puisque chacun de ces éléments génère des pertes de surface dues à l'ombre reçue. Une analyse des heures d'ensoleillement a été réalisée afin d'identifier le taux de pertes d'ombres sur les toits résultant de ces éléments ainsi que de leur voisinage. La simulation solaire est exécutée sur chaque typologie pour déterminer des fractions d'ombre.

L'adéquation solaire relative aux considérations techniques liées à l'installation des panneaux solaires, leur orientation et l'espacement minimal des panneaux, l'angle d'inclinaison et les séparations entre les rangées pour éviter l'auto-ombrage. La latitude et le climat sont des facteurs cruciaux pour choisir ces dispositions appropriées permettant un meilleur rendement et efficacité. À travers notre approche, nous avons déterminé l'inclinaison optimale, qui met en relation les performances du système PV avec l'intensité du rayonnement solaire.

À l'issue de ces étapes, le facteur d'utilisation des toitures de l'habitat individuel à Laghouat est égal à 18% et à 35% pour les toits des bâtiments collectifs et semi-collectifs. Ce résultat représente une contribution considérable puisqu'aucune des recherches antérieures n'ont été faites dans ce contexte spécifique en Algérie. De plus, il pourrait être facilement reproduit dans d'autres communes ayant les mêmes typologies résidentielles afin d'estimer leur potentiel solaire technique.

- **La cartes du potentiel solaire urbain et technique : un outil de gestion et de planification**

Le but de l'estimation d'un potentiel solaire technique est d'offrir une vision analytique, qui aiderait à développer une politique énergétique. Le plan directeur proposé pour Laghouat représente un outil crucial pour révéler l'avantage de la production PV distribuée aux acteurs de la ville. Il permet d'informer les actions stratégiques dans le processus d'intégration de l'énergies solaire pour assurer un équilibre énergétique et promouvoir des quartiers à bilan énergétique NZE.

Tout d'abord, en matière de gestion énergétique, les résultats suggèrent la mise en œuvre d'un modèle de partage intelligent entre les typologies résidentielles dans la même unité urbaine ou entre les unités de manière interactive pour gérer les interrelations complexes entre l'offre et la demande d'énergie en fonction de leur potentiel de production solaire.

En matière de planification future, nos résultats suggèrent un modèle intéressant de quartier net-zéro. Le modèle promeut, techniquement et socialement, une combinaison optimale de typologies résidentielles partageant et en appariant l'énergie, un quartier composé de 14 % de résidentiel du type 1 (MS1), 14 % de résidentiel du type 2 (MS2) et 71 % de maisons individuelles pourraient être autosuffisants. En effet, ce modèle intelligent offre la possibilité de partager l'énergie photovoltaïque entre les bâtiments résidentiels. Ce scénario devrait permettre d'améliorer l'efficacité énergétique et d'optimiser le contrôle de l'énergie entre les bâtiments interconnectés afin de parvenir à un voisinage NZE.

- **Le tableau de bord (Dashboard) interactif : un outil d'aide à la conception**

Sur la base d'une batterie d'outils numériques, les interrelations entre la morphologie urbaine, l'exposition solaire nécessaire pour la production énergétique et ses effets environnementaux sur le confort extérieur ont été étudiés, en mettant l'accent sur la particularité du contexte climatique de Laghouat.

L'étude paramétrique a porté sur l'évaluation des mesures de performances énergétiques et environnementales exécutées pour trois (3) typologies résidentielles sous de multiples paramètres architecturaux et urbains. L'objectif global était d'expérimenter une approche locale pour intégrer l'énergies solaire et parvenir à un compromis entre les considérations solaires énergétiques et environnementales dans la conception des typologies pour guider les conceptions futures à travers des indications fiables. Pour cette évaluation, deux mesures de performances ont été retenues. Il s'agit de l'indicateur de correspondance des charges Lm % et l'indice du confort thermique extérieur Otc %. L'indice Lm % reflète le taux de correspondance temporelle de la demande totale d'énergie et la production d'énergie renouvelable. Il est utilisé pour permettre une meilleure interprétation de la capacité d'autoconsommation dans un intervalle horaire. Ainsi, l'intensité de la synchronisation énergétique ou la capacité de

la typologie d'atteindre le NZE peut être efficacement indiquées. Quant à l'indice *Otc* %, il est défini par le pourcentage d'heures durant une semaine typique d'été extérieur, entre 08:00h-18:00h, pendant lesquelles la température se situe dans la plage « entre 18 et 26°C ».

Les résultats de cette approche sont communiqués dans un tableau de bord (Dashboard) interactif. Ce dernier établi aide à identifier un équilibre approprié de scénarios de conception afin d'atteindre des performances énergétiques et environnementales élevées et équilibrées. Ce tableau de bord constitue un outil original et efficace pour communiquer les résultats et donner des indications, des considérations morphologiques, ainsi que des considérations énergétiques et environnementales à l'échelle urbaine. Il aide à guider les concepteurs dans la création des villes adaptatives et résilientes dans un contexte de changements climatiques. À travers des indications fiables et efficaces sur les niveaux de performances énergétiques et environnementales des projets dans le contexte climatique du sud d'Algérie.

Ces résultats originaux contribueront considérablement à guider la planification et les futures conceptions dans la mesure où ils permettent de réduire la consommation énergétique par le recours à un potentiel local, renouvelable dans un secteur énergivore par définition, le secteur de l'habitat.

3. Les limites de la recherche

Bien que nous ayons pu atteindre nos objectifs, certaines limites ont surgi au fur et à mesure que nous avançons dans notre recherche.

- **Les limites théoriques**

Dans cette thèse, nous avons fixé depuis le début l'objectif d'aborder la problématique de l'intégration de l'énergie solaire dans le milieu résidentiel urbain selon les volets spatiaux (urbain et architectural) et techniques. Cependant, le long de notre recherche bibliographique, il s'est avéré que la capacité d'action des villes est aussi limitée par les ressources budgétaires et réglementaires. En général, les politiques de soutien et les incitations fiscales et les contrats d'achat d'électricité sur certains marchés, jouent un rôle primordial dans la promotion de l'intégration du photovoltaïque. Or, en Algérie une telle réglementation n'est pas encore établie, à l'exception des installations industrielles. Dans

ce sens, il sera également intéressant à mettre l'accent sur les politiques financières et réglementaires pour accélérer la transition énergétique.

- **Les limites liées au manque des données**

Les limites d'accès aux données ont été annoncées tout au long de la thèse. Elles sont principalement liées à la problématique de pénurie des données relatives d'une part à la consommation énergétique et d'autre part, à l'accès aux cartographies altimétriques de ville de Laghouat, et ce à cause de la présence de zones militaires protégées à l'échelle de la ville. Toutefois, il nous semble que ces contraintes ont contribué à pousser notre réflexion pour établir une approche contextualisée.

- **Les échelles d'intervention et les niveaux de détails**

Le passage de l'échelle la commune à celle de l'îlot urbain jusqu'à l'échelle du bâtiment et vice versa s'est effectué à travers une simplification théorique qui pourrait parfois réduire la précision des résultats. À titre d'exemple, dans l'approche d'évaluation du potentiel solaire dans l'étape 1 de l'approche méthodologique. Nous avons eu recours à la simplification de la géométrie et la configuration des toitures de l'habitat individuel suite aux manques de données satellitaires. Dans l'étude paramétrique (étape 3) de la méthodologie, la correspondance des charges $L_m\%$ à l'échelle des typologies résidentielles a été calculée sur une base horaire le long de l'année reflétant ainsi un niveau de détail pertinent pour l'évaluation de l'objectif NZE. Or, dans l'approche d'agrégation urbaine (étape 2), notre estimation de la correspondance des charges et l'équilibre recherché s'est limitée à un calcul sur une base annuelle qui pourrait être trop simplifiée. Dans l'étape 3, la simulation des besoins énergétique dans les typologies par la stratégie de zonage thermique des masses (zones internes et périmétriques) pourrait s'avérer trop simplifiée à cette échelle, mais qui s'est imposée pour réduire le temps.

- **La robustesse climatique et urbaine**

Dans les évaluations du confort thermique, il est plus recommandé de se baser sur les données climatiques urbaines qui estiment la température et l'humidité horaires de l'air des canopes urbaines. Ces données peuvent être modélisées de manière numérique, analytique ou empirique. Chaque catégorie a des exigences différentes pour représenter la surface

urbaine et définir les conditions initiales et limites. Cependant, les analyses menées dans cette thèse se sont appuyées sur le calcul de l'indice du confort thermique $O_{tc}\%$ en se référant à des données de l'Année Météorologique Typique (TMY) issus des stations météorologiques des aéroports.

4. Les perspectives et les futurs développements

Plusieurs perspectives de poursuite future des recherches ont pu être identifiées à partir des limites de la thèse et des complications rencontrées au cours des investigations empiriques. Elles se présentent par des thématiques connexes :

- **Une évaluation complémentaire du potentiel socio-économique des énergies renouvelables.**

En effet l'évaluation hiérarchique du potentiel solaire comprend 5 niveaux : il s'agit du potentiel physique, urbain technique, économique et sociale. Dans cette thèse nous ne nous sommes concentré que sur les trois premiers niveaux à savoir le physique / urbain et technique. Or, le niveau socio-économique dans l'intégration du PV dans le contexte algérien est aussi peu investigué et pourtant ils comportent de multiples défis que l'on cherche à relever. Par conséquent, les recherches futures pourraient se concentrer sur les implications économiques et sociales des installations PV sur les toits résidentiels

- **Investiguer finement les synergies locales et la mise en réseau des énergies renouvelables entre différents secteurs dans la ville**

Ce point fait référence à la notion des smart-grids et les systèmes énergétiques urbains intégrés explorés dans la littérature. Cela implique la gestion des flux injectés et les flux consommés dans le réseau urbain. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont essentielles à ce niveau pour synchroniser cette interaction. Cette perspective peut faire des énergies renouvelables un système d'intermédiation entre plusieurs secteurs de la ville.

- **Développement d'une plateforme Web**

Il y a eu lieu de s'intéresser à différentes perspectives autant théoriques qu'opérationnels. Une des principales perspectives est de créer une Plateforme Web à partir d'un environnement SIG qui permet de visualiser et gérer la performance énergétique au niveau municipal et pourrait jouer un rôle important dans l'intégration des préoccupations des énergies solaires dans la planification énergétique. En effet, la visualisation de la

production potentielle d'énergie solaire et des modèles de consommation d'énergie existants dans l'environnement bâti a conduit les décideurs et les planificateurs à définir le développement énergétique durable comme une priorité. De plus, il constituerait une interface accessible pour sensibiliser le grand public à la nécessité de réduire la consommation d'énergie et pour promouvoir la désinstallation des appareils électriques.

Références Bibliographiques.

A-Ressources académiques

Abdul-Rahman, A., & Pilouk, M. (2007). The Conceptual Design. In *Spatial Data Modelling for 3D GIS* (pp. 87–108). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74167-1_5

Amado, M., & Poggi, F. (2014). Solar energy integration in urban planning : GUUD model, 00, 0–7.

Amado, M., Poggi, F., Amado, A. R., & Breu, S. (2017). A cellular approach to Net-Zero energy cities. *Energies*, 10(11), 1826. <https://doi.org/10.3390/en10111826>

Assouline, D., Mohajeri, N., & Scartezzini, J.-L. (2018). Estimation of Large-Scale Solar Rooftop PV Potential for Smart Grid Integration: A Methodological Review. In *Sustainable Interdependent Networks. Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 145, pp. 173–219). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74412-4_11

Adam, K., Hoolohan, V., Gooding, J., Knowland, T., Bale, C. S. E., & Tomlin, A. S. (2016). Methodologies for city-scale assessment of renewable energy generation potential to inform strategic energy infrastructure investment. *Cities*, 54, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2015.10.015>.

Alhamwi, A., Medjroubi, W., Vogt, T., & Agert, C. (2018). Modelling urban energy requirements using open source data and models. *Applied Energy*, 231, 1100–1108. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.164>.

Alhamwi, A., Medjroubi, W., Vogt, T., & Agert, C. (2019). Development of a GIS-based platform for the allocation and optimisation of distributed storage in urban energy systems. *Applied Energy*, 251, 113360. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113360>.

Blanchard, O. & Menanteau, P. (2012). Quels systèmes énergétiques pour les écoquartiers en Europe? Un essai de typologie. In *1ères Journées Internationales de la Sociologie de l'Energie*. Toulouse

Bouvier G., 2005. Les collectivités locales et l'électricité – Territoires, acteurs et enjeux autour du service public local de l'électricité en France, Thèse de doctorat, Paris : Université de Paris 8 – Vincennes-SaintDenis.

Bremer, M., Mayr, A., Wichmann, V., Schmidtner, K., & Rutzinger, M. (2016). A new multi-scale 3D-GIS-approach for the assessment and dissemination of solar income of digital city models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.02.007>.

Bizjak, M., & Lukač, N. (2015). Design and layout optimisation of a pair of buildings regarding their solar potential, (November), 8–12.

Burke, M. J., & Stephens, J. C. (2018). Political power and renewable energy futures: A critical review. *Energy Research and Social Science*, 35(October 2017), 78–93. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.018>

Byrne, J., et al. (2015). "A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41: 830-844.

Cambini, C., Congiu, R., Jamasb, T., Llorca, M., & Soroush, G. (2020). Energy Systems Integration: Implications for public policy. *Energy Policy*, 143, 111609. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111609>

Carneiro, C., Morello, E., Desthieux, G., & Golay, F. (2010). Urban environment quality indicators: application to solar radiation and morphological analysis on built area. *ADVANCES in VISUALIZATION, IMAGING and SIMULATION Urban*, (January 2015), 141–148. Retrieved from <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Faro/VIS/VIS-23.pdf>.

Cajot, S., Peter, M., Bahu, J.-M. M., Guignet, F., Koch, A., & Maréchal, F. (2017). Obstacles in energy planning at the urban scale. *Sustainable Cities and Society*, 30, 223–236. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2017.02.003>.

Castro, A. B., & Alvarado, R. G. (2017). BIM-Integration of solar thermal systems in early housing design. *Revista de La Construcción*, 16(2), 323–338. <https://doi.org/10.7764/RDLC.16.2.323>.

Cajot, S., Peter, M., Bahu, J.-M. M., Guignet, F., Koch, A., & Maréchal, F. (2017). Obstacles in energy planning at the urban scale. *Sustainable Cities and Society*, 30, 223–236. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2017.02.003>

CDER, Centre de développement des énergies renouvelables, [en ligne], disponible sur <https://portail.cder.dz/>

Cerezo Davila, C., Reinhart, C. F., & Bemis, J. L. (2016). Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets. *Energy*, 117, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.057>

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>

Coelho, S., Russo, M., Oliveira, R., Monteiro, A., Lopes, M., & Borrego, C. (2018). Sustainable energy action plans at city level: A Portuguese experience and perception. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1223–1230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.247>

Certu. (2010b). Schémas régionaux de raccordement au réseau électrique des énergies renouvelables. *Décryptage Grenelle Energie et Climat*,.

Chanard, C. (2011). *Territoire et énergie : politiques locales, échelles d' intervention et instruments de mobilisation, de connaissance et d'action*. Thèse: géographie. Université de Franche-Comté.

Clastres, C. (2011). Smart grids: Another step towards competition, energy security and climate change objectives. *Energy Policy*. doi:10.1016/j.enpol.2011.05.02 .

Compagnon, R. (2004). "Solar and daylight availability in the urban fabric." *Energy and Buildings* 36(4): 321-328

Coutard, O. & Rutherford, J. (2013). Vers l'essor des villes "post-réseaux": infrastructures, innovation sociotechnique et transition urbaine en Europe. In J. Forest & A. Hamdouch (Eds.), *L'innovation face aux défis environnementaux de la ville contemporaine*. Presses Polytechniques Universitaires Romandes.

Collaço, F. M. de A., Simoes, S. G., Dias, L. P., Duic, N., Seixas, J., & Bermann, C. (2019). The dawn of urban energy planning – Synergies between energy and urban planning for São Paulo (Brazil) megacity. *Journal of Cleaner Production*, 215, 458–479. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.013>

Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, 36(4), 321–328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.009>

Coste, A., Guillot, X., Dubus, N., Pernet, A., Ruchon, M., Chamodot, M., & Mazel, I. (2014). Spatialiser la transition énergétique: vers la production d'« écosystèmes énergétiques territoriaux » en milieu rural. *Ensag*, 406.

Chow, A., Li, S., & Fung, A. S. (2016). Modeling urban solar energy with high spatiotemporal resolution: A case study in Toronto, Canada. *International Journal of Green Energy*, 13(11), 1090–1101. <https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1170686>

Desjardins, X. & Llorente, M. (2009). Revue de la littérature scientifique sur le lien entre les formes d'organisation territoriale, les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre. Quelle contribution de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire.

Eicker, U., et al. (2018). "New 3D model based urban energy simulation for climate protection concepts." *Energy and Buildings*.

Glaser B., Strauss A., 2010. *La découverte de la théorie ancrée – Stratégie pour la recherche qualitative*, Paris :Armand Colin .

Grenier, A. (2007). "Ville et énergie. Spécificité et complexité de la question en France." *Les Annales de la Recherche Urbaine*: 128-136.

Guen, M. L., et al. (2018). "Improving the energy sustainability of a Swiss village through building renovation and renewable energy integration." *Energy and Buildings* 158: 906-923.

Ibrahim K., De Sède-Marceau M-H., 2005. Modèle d'analyse locorégional des systèmes énergétiques, 7ème Rencontres ThéoQuant, 26-28 janvier 2005, Besançon, France.

De Jaeger, I., Reynders, G., Callebaut, C., & Saelens, D. (2020). A building clustering approach for urban energy simulations. *Energy and Buildings*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109671>.

Dominković, D. F., Bačeković, I., Sveinbjörnsson, D., Pedersen, A. S., & Krajačić, G. (2017). On the way towards smart energy supply in cities: The impact of interconnecting geographically distributed district heating grids on the energy system. *Energy*, 137, 941–960. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.162>.

Dubayah, R., & Rich, P. M. (1995). Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4), 405–419. <https://doi.org/10.1080/02693799508902046>.

Erdélyi, R., Wang, Y., Guo, W., Hanna, E., & Colantuono, G. (2014). Three-dimensional Solar Radiation Model (SORAM) and its application to 3-D urban planning. *Solar Energy*, 101, 63–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.023>

Farzaneh, H., Doll, C. N. H., & Puppim de Oliveira, J. A. (2016). An integrated supply-demand model for the optimization of energy flow in the urban system. *Journal of Cleaner Production*, 114, 269–285. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.05.098>

Ferrari, S., Zagarella, F., Caputo, P., & Bonomolo, M. (2019). Assessment of tools for urban energy planning. *Energy*, 176, 544–551. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.04.054>

Fichera, A., Inturri, G., La Greca, P., & Palermo, V. (2016). A model for mapping the energy consumption of buildings, transport and outdoor lighting of neighbourhoods. *Cities*. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.03.011>

Florio, P., Munari Probst, M. C., Schüler, A., Roecker, C., & Scartezzini, J.-L. (2018). Assessing visibility in multi-scale urban planning: A contribution to a method enhancing social acceptability of solar energy in cities. *Solar Energy*, 173, 97–109. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.07.059>

Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2015). Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Applied Energy*, 142, 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.068>

Gagnon, P., Margolis, R., Margolis, R., Gagnon, P., Melius, J., Phillips, C., & Elmore, R. (n.d.). Using GIS-based methods and lidar data to estimate rooftop solar technical potential in US cities Using GIS-based methods and lidar data to estimate rooftop solar technical potential in US cities.

Ghosh, S., & Vale, R. (2006). The potential for solar energy use in a new zealand residential neighbourhood: A case study considering the effect on co2 emissions and the possible benefits of changing roof form. *Australasian Journal of Environmental Management*, 13(4), 216–225. <https://doi.org/10.1080/14486563.2006.10648689>

Good, C. S., Lobaccaro, G., & Hårklau, S. (2014). Optimization of solar energy potential for buildings in urban areas - A Norwegian case study. In *Energy Procedia* (Vol. 58, pp. 166–171). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.424>

Grassi, S. (2015). Bristol to generate as much solar energy as an average nuclear power station. Retrieved from <http://www.bristolisopen.com/bristol-to-generate-as-much-solar-energy-as-an-average-nuclear-power-station-2/>

Guen, M. Le, Mosca, L., Perera, A. T. D. D., Coccolo, S., Mohajeri, N., & Scartezzini, J.-L. L. (2018). Improving the energy sustainability of a Swiss village through building

renovation and renewable energy integration. *Energy and Buildings*, 158, 906–923. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.057>

Harish, V. S. K. V., & Kumar, A. (2016). A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1272–1292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>

Heeter, J., Speer, B., & Glick, M. B. (2019). International Best Practices for Implementing and Designing Renewable Portfolio Standard (RPS) Policies. National Renewable Energy Laboratory. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72798.pdf>

Hofierka, J., & Zlocha, M. (2012). A New 3-D Solar Radiation Model for 3-D City Models. *Transactions in GIS*, 16(5), 681–690. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2012.01337.x>

Huld, T. (2017). PVMAPS: Software tools and data for the estimation of solar radiation and photovoltaic module performance over large geographical areas. *Solar Energy*, 142, 171–181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.014>

Huang, Z., Mendis, T., & Xu, S. (2019). Urban solar utilization potential mapping via deep learning technology: A case study of Wuhan, China. *Applied Energy*, 250, 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.113>.

Jakubiec, J. A., & Reinhart, C. F. (2012). Towards validated urban photovoltaic potential and solar radiation maps based on lidar measurements , gis data , and hourly daysim simulations. In *SimBuild 2012. Fifth National Conference of IBPSA-USA Madison, Wisconsin August 1-3, 2012* (p. 10). <https://doi.org/10.1093/intqhc/mzm043>

Kämpf, J. H., & Robinson, D. (2010). Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms. *Energy and Buildings*, 42(6), 807–814. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.019>

Kanters, J., & Horvat, M. (2012). Solar Energy as a Design Parameter in Urban Planning. In *Energy Procedia (SHC 2012)* (Vol. 30, pp. 1143–1152). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.127>

Kanters, J., Wall, M., & Dubois, M. (2014). Typical Values for Active Solar Energy in Urban Planning, 00.

Karteris, M., Slini, T., & 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>

Keirstead, J., & Shah, N. (2013). Urban energy systems: An integrated approach. *Urban Energy Systems: An Integrated Approach*, (October 2013), 1–314. <https://doi.org/10.4324/9780203066782>

Kodysh, J. B., Omitaomu, O. A., Bhaduri, B. L., & Neish, B. S. (2013). Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society*, 8, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.002>

Kristensen, M. H., Hedegaard, R. E., & Petersen, S. (2018). Hierarchical calibration of archetypes for urban building energy modeling. *Energy and Buildings*, 175, 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.030>

Kumar, L., Skidmore, A. K., & Knowles, E. (1997). Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5), 475–497. <https://doi.org/10.1080/136588197242266>

Laigle, L. & Matthys, A. (2012). Vers une approche dynamique des interactions entre formes urbaines, mobilité et GES. In ASPECT 2050 (Ed.), *Etat de l'art en Europe : apports et limites des plans climats à l' aune des connaissances scientifiques* CSTB; Université Paris-Est

Lee, D., & Cheng, C.-C. (2016). Energy savings by energy management systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 760–777. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.11.067>

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>

Li, C., et al. (2018). "Urban form and household electricity consumption: A multilevel study." *Energy and Buildings* 158: 181-193.

Li, Y., & Liu, C. (2017). Estimating solar energy potentials on pitched roofs. *Energy and Buildings*, 139, 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.070>.

Littlefair, P. (1998). Passive solar urban design : Ensuring the penetration of solar energy into the city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(3), 303–326. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(97\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(97)00009-9)

Mainzer, K., Fath, K., Mckenna, R., Stengel, J., Fichtner, W., & Schultmann, F. (2014). A high-resolution determination of the technical potential for residential-roof-mounted photovoltaic systems in Germany. *Solar Energy*, 105, 715–731. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.015>

Marion, B., Anderberg, M., George, R., Gray-Hann, P., & Heimiller, D. (2001). PVWATTS version 2 – enhanced spatial resolution for calculating grid-connected PV performance. NCPV Program Review Meeting, (October), 0–3. <https://doi.org/DE-AC36-99-GO10337>

Marique, A.F., Penders, M., Reiter, S. (2013). From Zero Energy Building to Zero Energy Neighbourhood. Urban form and mobility matter. PLEA 2013 - 29th Conference , Sustainable Architecture for a Renewable Future, (September), 1–6.

Menanteau, P., & Blanchard, O. (2013). L ' énergie dans les écoquartiers : quels systèmes énergétiques et quels acteurs ? Une comparaison France -. Cahier de Recherche EDDEN N° 5.

Mohajeri, N., Upadhyay, G., Gudmundsson, A., Assouline, D., Kämpf, J., & Scartezzini, J.-L. L. (2016). Effects of urban compactness on solar energy potential. *Renewable Energy*, 93, 469–482. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.053>

Moghadam, S. T., Mutani, G., Lombardi, P., & Torino, P. (2016). GIS-Based Energy Consumption Model at the Urban Scale for the Building GIS-Based Energy Consumption

Model at the Urban Scale for the Building Stock Interuniversity Department of Regional and Urban Studies and Planning , (March).

Monteiro, C. S., Costa, C., Pina, A., Santos, M. Y., & Ferrão, P. (2018). An urban building database (UBD) supporting a smart city information system. *Energy and Buildings*, 158, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.009>

Niemi, R., Mikkola, J., & Lund, P. D. (2012). Urban energy systems with smart multi-carrier energy networks and renewable energy generation. *Renewable Energy*, 48, 524–536. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.05.017>

Ordóñez, J., Jadraque, E., Alegre, J., & Martínez, G. (2010). Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2122–2130. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.001>

Pereira, F. O. R., Silva, C. A. N., & Turkienikz, B. (2001). A methodology for sunlight urban planning: A computer based solar and sky vault obstruction analysis. *Solar Energy*. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00094-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00094-3)

Perez, R., Seals, R., & Michalsky, J. (1993). All-weather model for sky luminance distribution-Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50(3), 235–245. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90017-I](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90017-I)

Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2003.12.007>

Peronato, G., Rastogi, P., Rey, E., & Andersen, M. (2018). A toolkit for multi-scale mapping of building energy potential in urban environments under uncertainty, 861–874.

Quan, S. J., Li, Q., Augenbroe, G., Brown, J., Yang, P. P.-J., Jige, S., ... Pei-ju, P. (2015). A GIS-based Energy Balance Modeling System for Urban Solar Buildings. *Energy Procedia*, 75, 2946–2952. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.07.598>

Quan, S. J., Li, Q., Augenbroe, G., Brown, J., & Yang, P. P. J. (2015). Urban data and building energy modeling: A GIS-based urban building energy modeling system using the urban-EPC engine. In *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* (Vol. 213, pp. 447–469). https://doi.org/10.1007/978-3-319-18368-8_24

Rakovec, J., & Zakšek, K. (2012). On the proper analytical expression for the sky-view factor and the diffuse irradiation of a slope for an isotropic sky. *Renewable Energy*, 37(1), 440–444. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.042>

Ram, M., Abhishek Pratap, G., Anand Prabhu Pathanjali, G., & Abhishek Pratap, M. (2013). *Rooftop Revolution: Unleashing Delhi's Solar Potential*. Retrieved from <http://www.greenpeace.org/india/Global/india/report/2013/Rooftop-Revolution.pdf>

Ratti, C., & Richens, P. (2004). Raster analysis of urban form. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(2), 297–309. <https://doi.org/10.1068/b2665>.

Redweik, P., Catita, C., & Brito, M. (2013). Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, 97, 332–341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.036>

Reinhart, C., & Wienold, J. (2009). and Annual Daylight Glare Probability Schedules (Part 1) ' Validation ' Validation of Daylight Factor Formula, (Part 1).

Rich, P.M.;Hetreick, W. A. ;Saving S. C. (1996). modeling topographic influences on solar radiation : a manual for the SOLARFLUX Model. New Mexico.

Robinson, D., & Stone, A. (2005). A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(4), 271–284. <https://doi.org/10.1097/00006231-200503000-00013>

Roudsari, M. S., & Pak, M. (2013). Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In *13th Conference of the International Building Performance Simulation Association* (pp. 3128–3135). Chambrery ,France.

Rutherford, J., & Coutard, O. (2014). Urban Energy Transitions: Places, Processes and Politics of Socio-technical Change. *Urban Studies*, 51(7), 1353–1377. <https://doi.org/10.1177/0042098013500090>.

Rylatt, M., Gadsden, S., & Lomas, K. (2001). GIS-based decision support for solar energy planning in urban environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 25(6), 579–603. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(00\)00032-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0198-9715(00)00032-6).

Salat, S., Nowacki, C. (2010). De l'importance de la morphologie dans l'efficience énergétique des villes. *Liaison Énergie-Francophonie*, 86, 141–146.

Salat, S., Bourdic, L., & Labbe, F. (2013). Réussir la transition énergétique dans les territoires, 274.

Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero energy buildings : A consistent definition framework. *Energy & Buildings*, 48, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>

Schallenberg-Rodríguez, J. (2013). Photovoltaic techno-economical potential on roofs in regions and islands: The case of the Canary Islands. Methodological review and methodology proposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 219–239. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.078>.

Schiefelbein, J., Rudnick, J., Scholl, A., Remmen, P., Fuchs, M., & Müller, D. (2019). Automated urban energy system modeling and thermal building simulation based on OpenStreetMap data sets. *Building and Environment*, 149, 630–639. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.025>.

Schöttl, P., Ordóñez Moreno, K., van Rooyen, D. W., Bern, G., & Nitz, P. (2016). Novel sky discretization method for optical annual assessment of solar tower plants. *Solar Energy*, 138, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.049>.

Šúri, M., Huld, T. A., & Dunlop, E. D. (2005). PV-GIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. *International Journal of Sustainable Energy*, 24(2), 55–67. <https://doi.org/10.1080/14786450512331329556>.

Šúri, M., Huld, T. A., Dunlop, E. D., & Ossenbrink, H. A. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81(10), 1295–1305. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.007>.

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*, 119, 362–369. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.039>.

Tampakis, S., Arabatzis, G., Tsantopoulos, G., & Rerras, I. (2017). Citizens' views on electricity use, savings and production from renewable energy sources: A case study from a Greek island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.036>.

Temby, O., Kapsis, K., Berton, H., Rosenbloom, D., Gibson, G., Athienitis, A., & Meadowcroft, J. (2014). Building-integrated photovoltaics: Distributed energy development for Urban sustainability. *Environment*, 56(6), 4–16. <https://doi.org/10.1080/00139157.2014.964092>.

Thebault, M., Clivillé, V., Berrah, L., & Desthieux, G. (2020). Multicriteria roof sorting for the integration of photovoltaic systems in urban environments. *Sustainable Cities and Society*, 60(March), 102259. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102259>.

Tooke, T. R., Coops, N. C., Christen, A., Gurtuna, O., & Prévot, A. (2012). Integrated irradiance modelling in the urban environment based on remotely sensed data. *Solar Energy*, 86(10), 2923–2934. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.026>.

Vartholomaios, A. (2017). A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city. *Sustainable Cities and Society*, 28, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.006>.

Vermeulen, T., Knopf-Lenoir, C., Villon, P., & Beckers, B. (2015). Urban layout optimization framework to maximize direct solar irradiation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.01.001>.

Waibel, C., Evins, R., & Carmeliet, J. (2019). Co-simulation and optimization of building geometry and multi-energy systems: Interdependencies in energy supply, energy demand and solar potentials. *Applied Energy*, 242, 1661–1682. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.177>.

Wang, B., Cot, L. D., Adolphe, L., Geoffroy, S., & Sun, S. (2017). Cross indicator analysis between wind energy potential and urban morphology. *Renewable Energy*, 113, 989–1006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.057>.

Ward, G. J. (1994). The RADIANCE lighting simulation and rendering system. *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1994*, 459–472. <https://doi.org/10.1145/192161.192286>.

Whitaker, C. M., Townsend, T. U., Razon, A., Hudson, R. M., & Vallvé, X. (2011). PV Systems. In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (pp. 841–895). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch19>.

Wu, D., & Ning, S. (2018). Dynamic assessment of urban economy-environment-energy system using system dynamics model: A case study in Beijing. *Environmental Research*, 164, 70–84. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2018.01.029>

Yamamura, S., Fan, L., & Suzuki, Y. (2017). Assessment of Urban Energy Performance through Integration of BIM and GIS for Smart City Planning. *Procedia Engineering*, 180, 1462–1472. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.04.309>.

Yuan, J., Farnham, C., Emura, K., & Lu, S. (2016). A method to estimate the potential of rooftop photovoltaic power generation for a region. *Urban Climate*, 17, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.03.001>.

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*, 240, 513–533. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.033>.

Zheng, X., Qiu, Y., Zhan, X., Zhu, X., Keirstead, J., Shah, N., & Zhao, Y. (2017). Optimization based planning of urban energy systems: Retrofitting a Chinese industrial park as a case-study. *Energy*, 139, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.139>.

Zuccalà, M., & Verga, E. S. (2017). Enabling Energy Smart Cities through Urban Sharing Ecosystems. *Energy Procedia*, 111(September 2016), 826–835. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.245>.

B- Livres et rapports institutionnels.

(ACEEE), american C. for an E.-E. E. (n.d.). Local Government Energy Management Goals_ Best Practices and Platforms _ ACEEE. Retrieved May 12, 2021, from <https://www.aceee.org/toolkit/2015/01/local-government-energy-management-goals-best-practices-and-platforms>.

(EREF), (Energy Watch Group), (ISEP), (Nordic Folkecenter), (BCG), (Renewable Energy Institute), (WBA), (ISES), (ASU), (ISES), (WFC), (Global 100 RE), & (IRENA). (2019). Towards 100% Renewable Energy: Status, Trends and Lessons Learned. Retrieved from https://coalition.irena.org/-/media/Files/IRENA/Coalition-fo>Action/IRENA_Coalition_100percentRE_2019.pdf

C40 Cities, A. (2017). Focused acceleration: A strategic approach to climate action in cities to 2030. A strategic approach to climate action in cities to 2030 (The McKins).

C40 Cities, A. (2018). Comment les villes vont relever le défi?

EnergyCities. (2018). Local Energy and Climate Roadmaps.

Global Covenant of Mayors. (2018). Implementing climate ambition, 1–6.

IEA, IRENA, UNSD, WB, W. (2019). The energy progress report SDG7: The energy progress report. Retrieved from www.worldbank.org

International Energy Agency(IEA). (2020). Global Energy Review 2019. Global Energy Review 2019. OECD. <https://doi.org/10.1787/90c8c125-en>

International Energy Agency (IEA). (n.d.). Data & Statistics - Electricity final consumption by sector, Algeria 1990-2018. Retrieved November 3, 2020, from <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=ALGERIA&fuel=Electricity and heat&indicator=ElecConsBySector>

International Energy Agency (IEA). (2018). World Energy Outlook 2018: Highlights. International Energy Agency (Vol. 1). Retrieved from https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2018/executive-summary_weo-2018-2-en

International Energy Agency (IEA). (2019a). Renewables: Analysis and Forecast to 2024. Retrieved from www.iea.org/renewables2019

International Energy Agency (IEA). (2019b). Renewables 2019 – Analysis and forecast to 2040- IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>.

International Energy Agency (IEA). (2019c). Solar Energy: Mapping the road ahead. Retrieved September 25, 2020, from <https://webstore.iea.org/solar-energy-mapping-the-road-ahead>.

International Energy Agency (IEA). (2019d). Status of Power System Transformation 2019: Power system flexibility. Retrieved September 25, 2020, from https://www.oecd-ilibrary.org/energy/status-of-power-system-transformation-2019_7c49400a-en.

International Energy Agency (IEA). (2019e). Summary for Policymakers. In Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), Climate Change 2013 - The Physical Science Basis (pp. 1–30). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

International Energy Agency (IEA). (2020a). Global Energy Review 2020. Global Energy Review 2020. OECD. <https://doi.org/10.1787/a60abbf2-en>.

International Energy Agency (IEA). (2020b). Sustainable Recovery: World Energy Outlook Special Report. World Energy Outlook. Retrieved from [https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery%0Ahttps://webstore.iea.org/download/direct/4022?fileName=Energy Technology Perspectives 2020](https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery%0Ahttps://webstore.iea.org/download/direct/4022?fileName=Energy_Technology_Perspectives_2020) _

International Energy Agency (IEA). (2021). Global Energy Review 2021. Global Energy Review 2021. OECD. <https://doi.org/10.1787/a60abfb2-en>.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2011). Renewable Energy Country Profiles for Africa. Retrieved from www.irena.org

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2015). Renewable Energy in Cities. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781782547884.00021>.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2018). Transformation énergétique mondiale : une feuille de route pour 2050, Résumé, 12. Retrieved from [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA Global Energy Transformation 2018 summary FR.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2018_summary_FR.pdf).

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019a). IRENA (2019), Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019b). Renewables in cities 2019 Global Status Report. Resources (Vol. 8).

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Rise of renewables in cities: Energy solutions for the urban future,. Retrieved from [https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Oct/IRENA Renewables in cities 2020.pdf](https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Oct/IRENA_Renewables_in_cities_2020.pdf).

Nations Unies. (2015). Accord de Paris. 21ème Conférence Des Parties, 1–18. Retrieved from https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf.

Renewable Now (REN 21). (2018). Global Status Report (GSR) Renewables 2018.

Renewable Now (REN 21). (2021). Renewables 2021 global status report.

Starke, L. (Ed.). (2007). STATE OF THE WORLD Our Urban Future : Our urban future (W . W . N). London.

C – Les sites officiels des logiciels

<https://www.rhino3d.com/>

<https://www.grasshopper3d.com/>

<https://www.ladybug.tools/>

<https://thread.thorntontomasetti.com/>

Les annexes

Annexe 1. Liste récapitulatif des méthodes et outils trouvés dans la littérature pour l'évaluation du potentiel solaire à l'échelle de la ville

	Title	Author	Methods	Tools	Scale
1	GIS-based decision support for solar energy planning in urban environments	M. Rylatt S.Gadsden K. Lomas	<ul style="list-style-type: none"> Filtering the the viability of dwellings Dwelling classification system targeting based on socio-economic factors : ownership of the property 2. income of occupants; 3. number of occupants; 4. floor area of dwelling; 5. value of dwelling; 6. type of dwellin detailed solar potential calculation The extended solar DHW method 	Map Info SEPDbapp's BREDEM-8	Urban Scale
2	A methodology for sunlight urban planning: a computer-based solar and sky vault obstruction analysis	Fernando oscar ruttkey pereira , *	<ul style="list-style-type: none"> Combining climatic conditions with psychophysiological requirementsp climatic conditions: represented by the external air temperature and solar radiation on vertical planes psycho-physiological requirements from people subjected to variable climatic conditions; Solar geometry and obstruction graphic method and computerbased analysis situation geometry: represented by the insolation and built environment geometric relations. 	MascaraW .	Urban Scale
3	Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape ,	P.Redweik . Catita , M. Brito	<ul style="list-style-type: none"> Urban relief model from LiDAR : The algorithm, named SOL data and a solar to calculate shadow maps and sky view factor both for roofs and facades at once. Solar radiation model : database Direct/ diffuse irradiation and shadow algorithm • Global radiation 	SOL	Urban scale

4	<p>Assessment of retrofitting measures and solar systems' potential in urban areas using Geographical Information Systems: Application to a Mediterranean city</p>	<p>figeneia Theodoridou ,n, Marinos Karteris , Georgios Mallinis , M. Papadopoulos , Manfred Hegger</p>	<ul style="list-style-type: none"> Buildings' classification . Energy efficiency of buildings and retrofit scenarios GIS analysis . Evaluation parameters RES implementation. Solar potential on roof-top areas . Energy outputs and demands . Building's envelope , • Green roofs . Opaque surfaces and openings • Built form and A/V ratio.. <p>3. Overall energy balance. .</p>	<p>Arc gis e-Cognition software</p>	<p>Large urban scale</p>
5	<p>Assessment of photovoltaic potential in urban areas using opensource solar radiation</p>	<p>Jaroslav Hofierka*,Ja'n Kan'uk Department</p>	<p>1.Creation of a 3-D city model implemented in a GIS database. digital elevation model building models with attributes influencing the utilization of solar energy</p> <p>2. Solar radiation modeling including the analysis of spatial and temporal variation in solar irradiance/irradiation using the r.sun solar radiation model.</p> <p>3.Calculation of potential electricity production using the PVGIS estimation utility with parameters derived from a GIS database.</p>	<p>Arc Gis r.sun solar radiation model The PVGIS</p>	<p>Large scale</p>
6	<p>PVMAPS: Software tools and data for the estimation of solar radiation and photovoltaic module performance over large geographical areas</p>	<p>Thomas Huld</p>	<p>2.1.1. Hourly solar radiation data .1.2. Data for calculating the interannual variability ofsolar radiation For 2. Ancillary climatic data The Terrain elevation and horizon data The Models for solar radiation and PV performance</p>	<p>PVMAPS</p>	<p>Large scale</p>
7	<p>A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul</p>	<p>John Byrne , Job Taminiau ,n, Lado Kurdgelashvili , Kyung Nam</p>	<ul style="list-style-type: none"> Estimating building stock roof area . Estimation of PV-suitable rooftop area From total rooftop area to suitable area 	<p>Arc gis</p>	<p>Large scale</p>

		Kim	<ul style="list-style-type: none"> From suitable area to PV system installment 		
8	Solar and daylight availability in the urban fabric	R. Compagnon*	<ul style="list-style-type: none"> final energy = urban solar and daylight availability ⊗ utilisation factors urban solar and daylight availability = sky model ⊗ 3D buildings model 	radiance	Urban scale
7	A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul	John Byrne , Job Taminiau ,n, Lado Kurdgelashvili , Kyung Nam Kim	<ul style="list-style-type: none"> Estimating building stock roof area . Estimation of PV-suitable rooftop area From total rooftop area to suitable area From suitable area to PV system installment 	Arc gis	Large scale
8	Solar and daylight availability in the urban fabric	R. Compagnon*	<ul style="list-style-type: none"> final energy = urban solar and daylight availability ⊗ utilisation factors urban solar and daylight availability = sky model ⊗ 3D buildings model 	radiance	Urban scale
9	Comparison of the solar energy utilisation potential of different urban environments	M Montavon, J- Scartezini, R Compagnon	<ul style="list-style-type: none"> Morphologic COMPARISON OF URBAN SITES .Simulation by ray tracing program , Solar performance indicators of urban sites. Solar performance indicators of urban sites. 	Radiance	Urban Scale
10	Solar Urban planning: a Parametric approach	Miguel Amado, Francesca Pogg*	<ul style="list-style-type: none"> Urban System Analysis • Parametric Urban Modeling. Photovoltaic Solar Electricity Potential Energy Consumption Prediction Urban Energy Balance Smart grid Conception 	Grasshopper ® and GECO® ecotect	Urban Scale

11	Photovoltaic potential and land use estimation methodology	Nuria MartínChivelet	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical, geographical and technical potentials Land use Calculating PV potentials and land use consum 		
12	3D URBAN SOLAR POTENTIAL MAPS - CASE STUDY OF THE iSCOPE PROJECT	Dragutin D. PROTIĆ , Milan S. KILIBARDA , Marina D. NENKOVIĆ- RIZNIĆ , Ivan Đ. Nestorov	<ul style="list-style-type: none"> Calculation of solar irradiation by using GRASS r.sun algorithm The DEM and DSM data Geometric Automated generation of 3D roof model High Urban Information Model The i-SCOPE solar service The i-SCOPE solar potential service aims to provide information on city roofs' characteristics that are related to solar energy. 	GRASS r.sun the i-SCOPE solar	Large scale
13	Urban morphology indicators for solar energy analysis	Michele Morgantia,, Agnese Salvatia, Helena Coch, Carlo Cecere	<p>1) gross space index, 2) floor space index, 3) façade-to-site ratio, 4) average building height, 5) volume-area ratio, 6) building aspect ratio and 7) sky factor of building façades .</p> <p>2/Finally, sky factor of façades (SF) is calculated as the mean value of the ratio of the solid angle of visible sky from each point of the façades to the sky vault. This</p>		Urban Scale
14	Improving the energy sustainability of a Swiss village through building renovation and renewable energy integration	Morgane Le Guen, Lucas Mosca, A.T.D. Perera, Silvia Coccolo, Nahid Mohajeri, Jean-Louis Scartezzini	<ul style="list-style-type: none"> Modelling 3D geometry on arc gis Generating 3D readable by City-SimPro Simulation heating demand and Pv production Designing and optimizing An energy hub 	Arc Gis Rhonoceros City Sim Pro Homer	Lrge scale

15	Photovoltaic potential and land use estimation methodology	Nuria Martín Chivelet	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical, geographical and technical potentials Land use Calculating PV potentials and land use consumption 		
15	Buildings roofs photovoltaic potential assessment based on LiDAR (Light Detection And Ranging) data	Niko Luka , Sebastijan Seme , Danijel Zlaus , Gorazd Stumberger , Borut Zalik .	<ul style="list-style-type: none"> Preparation of LiDAR data (Inclination and orientation, e spatio-temporal self-shadowing and shadowing from the surroundings) Automatic assessment of Solar irradiance estimation The Estimation of produced electrical energy and the PV potential This 	Automatic assessment (areas aerial/lidar)	largescale
16	Evaluation of the development potential of rooftop solar photovoltaic in Taiwan	Li Ko , Jen-Chun Wang , ChiaYon Chen . Hsing-Yeh Tsai	<ul style="list-style-type: none"> Input data items of modeling :GIS layers (including coordinate and stories), altitude and azimuth of the sun (Collection of graphical data related to city streets and buildings) Design of the Sun Shadow Model 	Arc Gis	Large scale

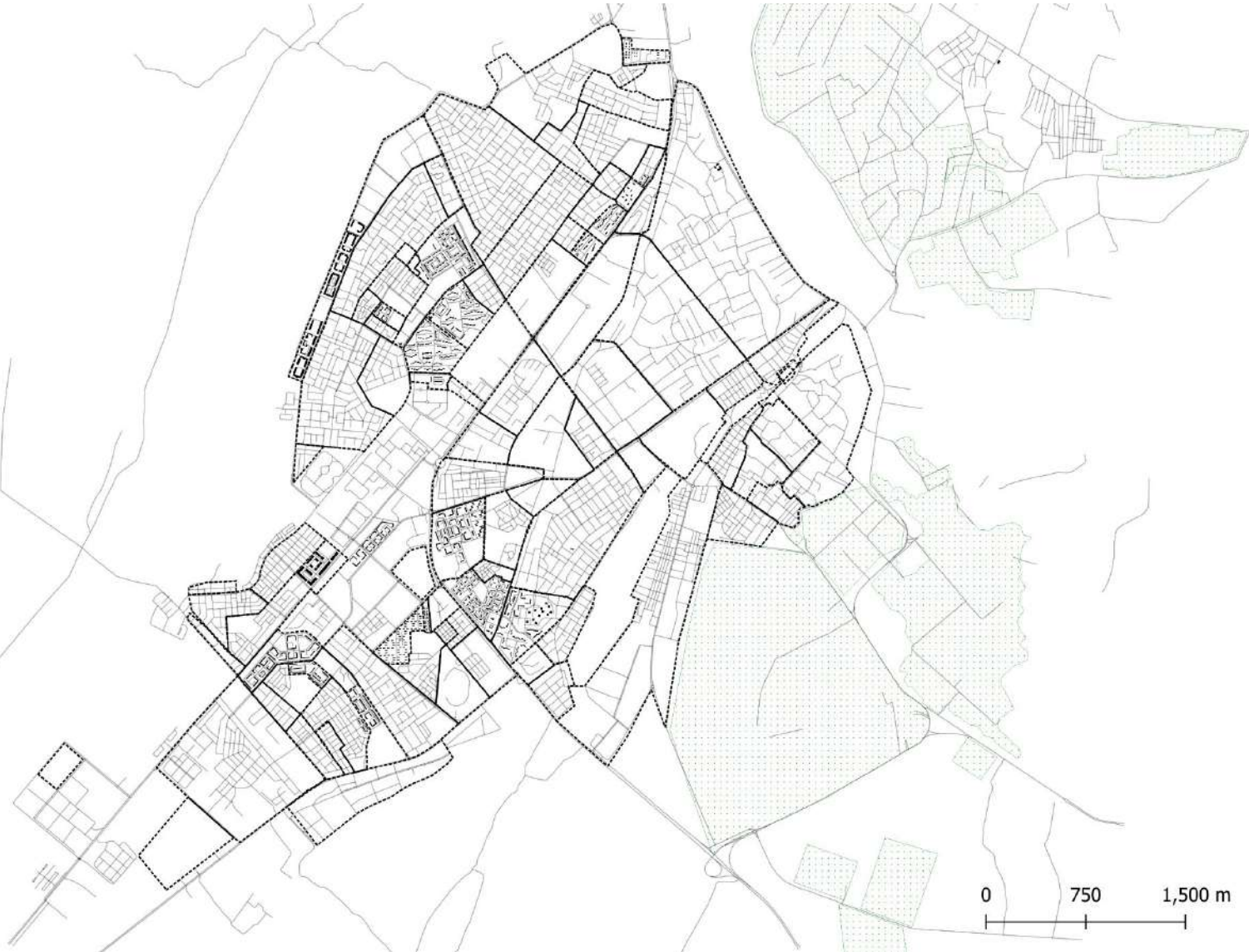
			<ul style="list-style-type: none"> Calculate The estimated installed power capacity potentials of rooftop solar photovoltaic Analysis of installed power capacity potential Energy efficiency assessment Energy Zoning Regional electrical supply 		
17	Assessment of rooftop photovoltaic potentials at the urban level using publicly available geodata and	Kai Mainzer a, Sven Killinger , Russell McKenna	<ul style="list-style-type: none"> Building footprint assessment Irradiance simulation (provided by the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAM)) 	/	Urban scale

	image recognition techniques	, Wolf Fichtner .	<ul style="list-style-type: none"> • calculate the sun's position at the location (the Algorithm) • Combine Sun position with irradiance data (direct and diffuse irradiance on a horizontal plane,) • Simulate the direct, diffuse and reflected irradiance components. • Calculate technical and economic assesement . 		
18	Combining solar resource mapping and energy system integration methods for realistic valuation of urban solar energy potential	Paulina Wegertseeder , Peter Lund , Jani Mikkola , Rodrigo García Alvarado .	<ul style="list-style-type: none"> • Sub-model of the urban solar resource assessment When Solar radiation resource • Urban losses of solar radiation • Typology of housing--- Map of resid typo in the city • Energy consumption patterns--map solar potential per ResidUnits whit season-time • Sub-model for energy system integration 	Arc Design builder Gis	Large Scle
19	Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: A machine learning approach	Dan Assouline , Nahid Mohajeri, Jean-Louis Scartezzini Solar	<ul style="list-style-type: none"> • Physical potential estimation • Estimation of weather variable • Estimation of monthly Gh,GD, and Goh • Geographical potential estimation • Pre-processing of urban features for SVR • Estimation of available roof area The • Estimation of shading factor • .Technical potential 	ArcGIS Machine learning method	Large scale
20	A city-scale roof shape classification using machine learning for solar energy applications	Nahid Mohajeri, Dan Assouline, Berenice Guiboud, Andreas Bill,	<ul style="list-style-type: none"> • Support Vector Machine for classification (SVMs). • Solar PV Electricity production on Rooftops : LiDAR point data, by SITG (Le système d'information du territoire à Genève in MATLAB using Ray anisotropic model for sky- diffuse radiation . 	LidarMATLAB	Urban Large scale

		Agust Gudmundsson, Jean-Louis Scartezzini	<ul style="list-style-type: none"> • Roof characteristics and solar potential • (a) Feature selection. • (b) Scaling of the dataset • (c) Data labelling • (d) SVM testing and training. 		
21	Using GIS-based methods and lidar data to estimate rooftop solar technical potential in US cities	Robert Margolis, Pieter Gagnon, Jennifer Melius, Caleb Phillips and Ryan Elmore	<ul style="list-style-type: none"> • Input data : US Department of Homeland Security (DHS) • Shading and Orientation (tilt and azimuth We determined the tilt for each square meter of roof area within our lidar data set • Application of suitability criteria we used the System Advisor Model (SAM) to calculate the number of hours a rooftop would need to be in sunlight to produce 80% of the energy produced by an unshaded system of the same orientation. • Roof simulation of PV productivity on suitable rooftop area 	Lidar	Large urban Scale
22	Identifying solar energy potentials and intensifying the climate-friendly use of photovoltaics within urban areas.	Institute for Geoinformatics and Remote Sensing,	<ul style="list-style-type: none"> • The data base A digital object model (DOM) • Roof Detection (Exposure of a roof's /Inclination of a roof's /Shading of a roof's side.) • Calculation of the solar potential • The web-based solar registerGIS are the "suitability" layer and the « solar calculator » • The calculation of the Solar insolation 	Web calculators	Urban scale
23	An Approach for Estimating Solar Photovoltaic Potential Based on Rooftop Retrieval from Remote Sensing Images	Xiaoyang Song , Yaohuan Huang , Chuanpeng Zhao Yongguo Chang 1 and Jie Yang	Study Area and Data Sources :DSM and satellite images obtained from Building Extraction Resultsusing the object-oriented classification method Rooftop Assessment (classification/feature parameters) Google Maps . Solar PV panels parameters(area, tilt angle, front) . Rooftop solar PV potential Figure		Urban scale

--	--	--	--	--	--

Annexe 2. Les cartes thématiques du cas d'étude

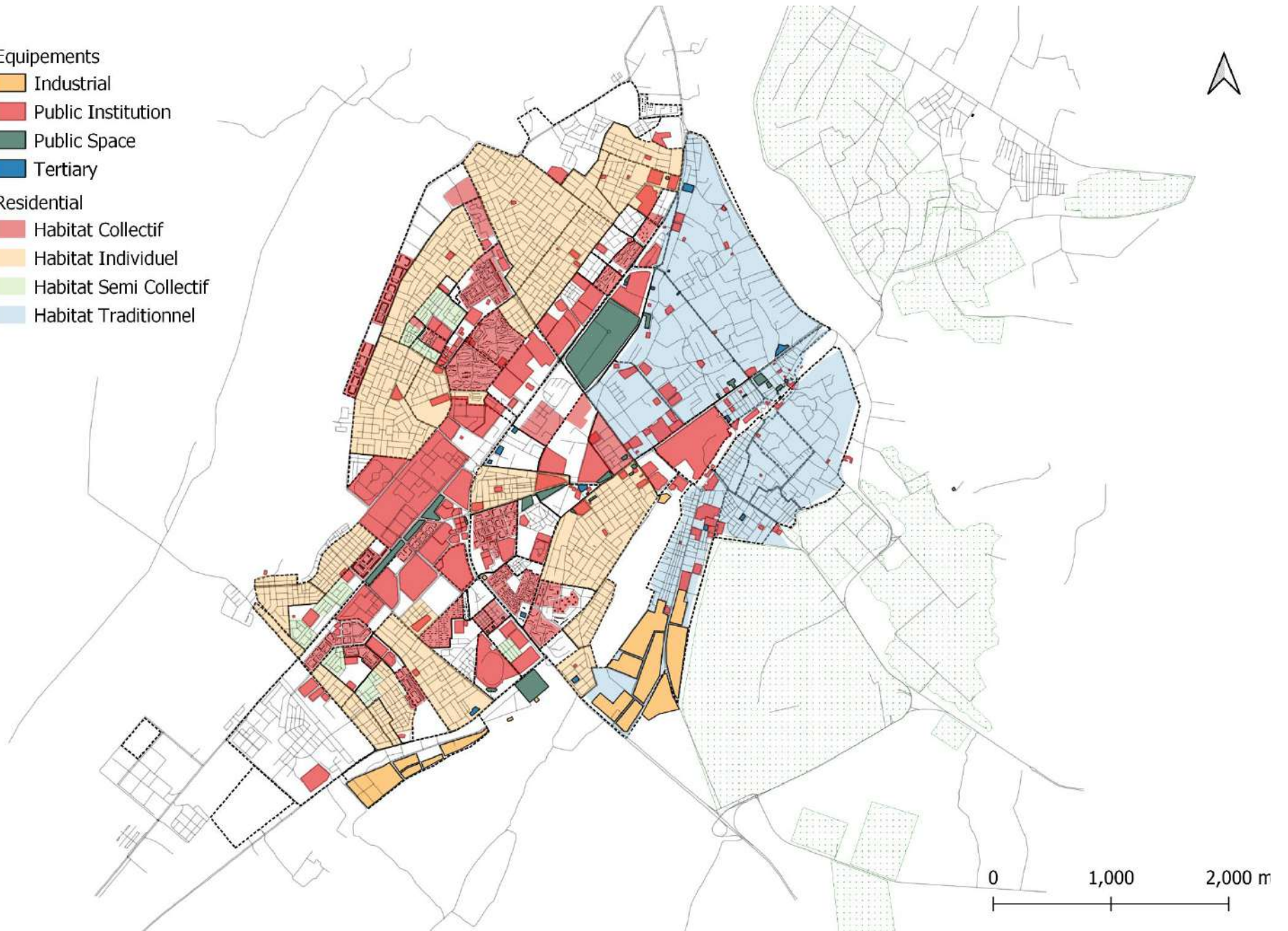


Equipements

- Industrial
- Public Institution
- Public Space
- Tertiary

Residential

- Habitat Collectif
- Habitat Individuel
- Habitat Semi Collectif
- Habitat Traditionnel



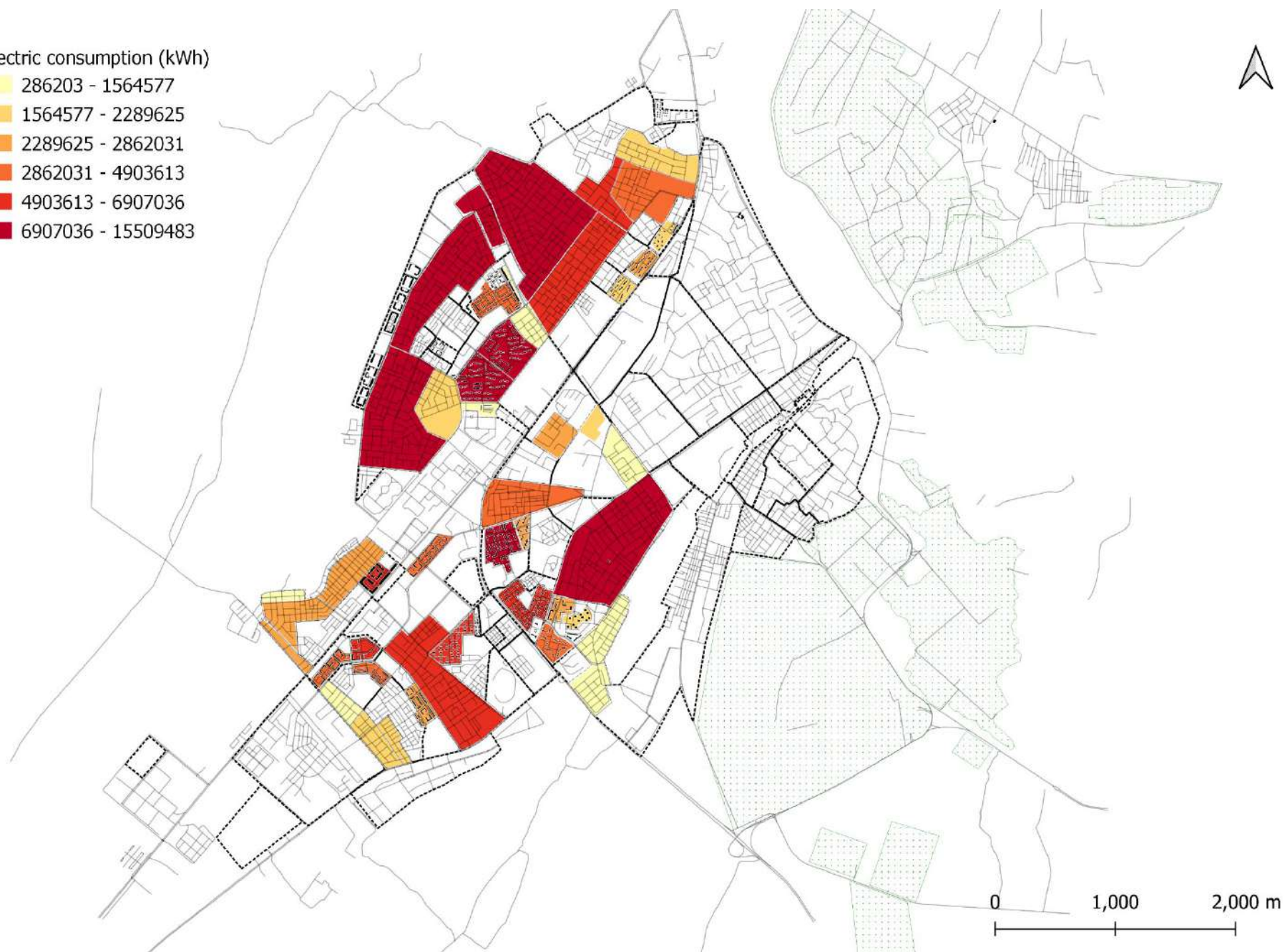
Population (inhabitant)

- 266 - 728
- 728 - 1232
- 1232 - 1694
- 1694 - 3010
- 3010 - 4200
- 4200 - 14550



Electric consumption (kWh)

- 286203 - 1564577
- 1564577 - 2289625
- 2289625 - 2862031
- 2862031 - 4903613
- 4903613 - 6907036
- 6907036 - 15509483



Annexe 3. Les algorithmes visuel de simulation

