
Forme urbaine et potentiel de développement des énergies renouvelables

Jeremy Christine

PROJET SIG | LICENCE GÉOGRAPHIE ET AMÉNAGEMENT - 2025

Remerciements

Je souhaite particulièrement remercier madame Maud HAFFNER pour sa disponibilité, ses conseils méthodologiques et son suivi tout au long de ce travail. Son expertise et ses remarques pertinentes m'ont permis de pouvoir avancer avec confiance et sérénité.

Je remercie également l'ensemble des enseignants : Xavier GIRARDET, Hélène HOUOT, François Pierre TOURNEUX et Jean-Christophe FOLTÊTE pour leurs connaissances apportées en SIG et la qualité de la formation reçue au cours de ces années. Sans oublier l'ensemble de l'équipe pédagogique m'ayant apporté des connaissances complémentaires essentielles pour appréhender les dynamiques territoriales et enrichir ma réflexion durant de ce parcours.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Méthodologie	4
2.1 Définition de la zone d'étude	4
2.2 Unité d'analyse.....	5
2.3 Choix des indicateurs.....	5
2.4 Acquisition des données	6
2.5 Calcul des indicateurs	7
2.5.1 Densité bâtie.....	7
2.5.2 Densité de végétation.....	7
2.5.3 Hauteur moyenne du bâti résidentiel.....	7
2.5.4 Écart-type des hauteurs du bâti résidentiel.....	8
2.5.5 Part du bâti résidentiel.....	8
2.5.6 Nombre de parcelles.....	8
2.5.7 Longueur des routes	8
2.6 Calcul du potentiel solaire	9
2.7 Application statistique.....	11
3. Résultats.....	12
3.1 Identification des tissus urbains	12
3.2 Évaluation du potentiel solaire.....	17
3.2.1 Scénario standard de référence	17
3.2.2 Scénario standard corrigé par coefficient de faisabilité.....	19
3.2.3 Scénarios basse et forte inclinaison	21
3.3 Tableaux récapitulatifs	22
4. Discussion et limites de l'étude	24
5. Conclusion	26
6. Bibliographie.....	27

Table des figures

FIGURE 1 - CARTE DE LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE	4
FIGURE 2 - TABLEAU DES INDICATEURS MORPHOLOGIQUES.....	5
FIGURE 3 - SCHEMA CONCEPTUEL DES INDICATEURS.....	6
FIGURE 4 - TABLEAU DES SCENARIOS.....	10
FIGURE 5 - TABLEAU DES COEFFICIENTS DE FAISABILITE	10
FIGURE 6 - MATRICE DES CORRELATIONS	12
FIGURE 7 - ÉBOULIS DES VALEURS PROPRES	13
FIGURE 8 - CERCLE DES CORRELATIONS	13
FIGURE 9 – PROJECTION DES 6 CLASSES SUR LE NUAGE DE POINTS	14
FIGURE 10 - TABLEAU DES CARACTERISTIQUES DES INDICATEURS PAR TYPE DE TISSU URBAIN	14
FIGURE 11 - REPARTITION SPATIALE DES MAILLES DE TISSUS URBAINS	16
FIGURE 12 - STATISTIQUES ET BOXPLOTS DU SCENARIO 1	17
FIGURE 13 - TEST ANOVA SCENARIO 1	18
FIGURE 14 - CARTE PAR ANAMORPHOSE DU POTENTIEL SOLAIRE SELON LES TISSUS URBAINS A PARTIR DU SCENARIO 1	19
FIGURE 15 - STATISTIQUES ET BOXPLOTS DU SCENARIO 2.....	20
FIGURE 16 - TEST ANOVA SCENARIO 2	20
FIGURE 17 - CARTE PAR ANAMORPHOSE DU POTENTIEL SOLAIRE SELON LES TISSUS URBAINS A PARTIR DU SCENARIO 2	21
FIGURE 18 - TEST ANOVA SCENARIO 3	22
FIGURE 19 - TEST ANOVA SCENARIO 4	22

1. Introduction

Face au dérèglement climatique et l'urbanisation croissante de notre société, la nécessité de repenser nos modes de production et de consommation d'énergie est urgent pour le bien des générations futures. Un levier d'action possible réside en la réduction des émissions de gaz à effet de serre et le développement des énergies renouvelables. L'espace urbain apparaît alors comme un lieu stratégique pour le développement de solutions énergétiques durables.

C'est à partir de cette réflexion que le choix du sujet relatif au potentiel de développement des énergies renouvelables en fonction des formes urbaines m'a semblé très pertinent à étudier. Parmi les territoires d'études proposés, l'agglomération de Montpellier Méditerranée Métropole est celle présentant d'après moi la situation géographique la plus favorable au sujet d'étude et donc le meilleur potentiel de développement, en raison d'un fort ensoleillement mais aussi d'une exposition régulière au vent du fait de sa proximité avec la mer.

La forme urbaine, porte d'entrée centrale dans l'étude, peut se définir à la configuration spatiale du bâti, de la voirie et dents creuses résultant de processus historiques, sociaux, économiques et culturels reflétant l'usage de l'espace. Mais le concept de forme urbaine est un objet d'étude à la fois souple et difficile à délimiter, polymorphe et polysémique (Fusco, 2018). En effet, polymorphe du fait de la diversité des échelles d'observation et des éléments qui la composent, et polysémique car elle renvoie à des significations multiples selon les disciplines et approches méthodologiques (Levy, 2005). Albert Levy rend compte de la complexité des formes urbaines à travers cinq registres complémentaires, parmi lesquels la forme bioclimatique et la forme des tissus urbains sont particulièrement intéressants dans le cadre de cette étude. La forme bioclimatique renvoie à « l'espace urbain étudié dans sa dimension environnementale » c'est-à-dire l'adaptation de l'organisation urbaine aux conditions environnementales locales. La forme des tissus urbains renvoie quant à elle à la structure fine des éléments composant l'espace urbain : parcelles, îlots, trame viaire, quartiers, etc...

Afin de mieux comprendre le potentiel de développement des énergies renouvelables dans le contexte urbain, il est essentiel de savoir ce qu'est une énergie renouvelable ainsi que les avantages et défis spécifiques relatifs à ces sources énergies.

On distingue six filières d'énergies renouvelables selon leur source : le solaire, l'hydraulique, l'éolien, la géothermie, la biomasse et l'énergie marémotrice. Ces énergies reposent sur des flux, naturellement renouvelés à l'échelle d'une vie humaine par opposition aux énergies fossiles reposant elles sur des stocks établis sur un temps plus long (Collard, 2015).

Dans le cadre de cette étude, j'ai choisi de m'intéresser uniquement à l'énergie solaire à travers la production d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques laissant de côté les panneaux solaires thermiques et les autres sources d'énergies en raison d'une méthodologie plus facile à mettre en œuvre et de mes compétences relativement limitées pour le traitement de données raster dans un SIG.

La production d'énergie solaire photovoltaïque a connu une croissance notable au cours de ces dernières années en France représentant 5% de la consommation électrique française en 2024.¹ Ces installations sont majoritairement installées dans des parcs solaires en périphérie urbaine malgré un développement croissant du photovoltaïque sur toiture utilisé à plus petite échelle pour l'autoconsommation. Le Plan Climat Air Energie Territorial solidaire (PCAETs) de la métropole de Montpellier affiche un objectif de 44% de la consommation énergétique du territoire issue d'énergies renouvelables, dont 61% de photovoltaïque à l'horizon 2050.²

La forme urbaine définie précédemment joue un rôle clé dans le développement de l'énergie solaire en milieu urbain. L'architecture, la densité, la hauteur du bâti, largeur des rues et autres indicateurs morphologiques influencent directement la quantité d'ensoleillement disponibles sur les toitures et façades (Cheng et al., 2006; Kanter & Horvat, 2012). Le tissu urbain peut également renforcer ou limiter l'exposition solaire à travers les jeux d'ombrage, les orientations et volumes des bâtiments (Compagnon, 2004). La configuration des différents tissus urbains conditionne donc la faisabilité technique de l'installation de panneaux photovoltaïques mais aussi leur efficacité et leur rendement.

¹ Source : Ministères de l'aménagement du territoire et de la transition écologique

² Source : Plan Montpellier Solaire 2050

Dans cette optique, je prends le parti de me concentrer uniquement sur la forme physique et d'omettre la forme sociale de la ville pour analyser le potentiel solaire. La problématique qui se posera alors sera de déterminer si les tissus urbains ont un impact sur le potentiel photovoltaïque avec un exemple d'application sur la métropole de Montpellier.

Ce mémoire s'organisera dans un premier temps avec la présentation de la méthodologie appliquée, à travers le choix et le calcul des indicateurs, l'acquisition des données ainsi que la méthode statistique utilisée. Ensuite une partie sera consacrée à l'analyse des résultats et l'identification des types de tissus urbains les plus favorables au développement du solaire photovoltaïque, puis une dernière partie sera destinée à la discussion de ces résultats, les limites de l'étude et une conclusion générale.

2. Méthodologie

Afin de répondre à la problématique posée et d'évaluer le potentiel solaire en lien avec les tissus urbains, une méthodologie combinant des traitements spatiaux avec SIG, des scénarios techniques ainsi que des analyses statistiques factorielles et bivariées mixtes a été mise en place.

2.1 Définition de la zone d'étude

Bien que dans l'introduction j'ai nommé l'agglomération de Montpellier Méditerranée Métropole en tant que territoire d'étude, l'analyse s'est en réalité concentrée sur un périmètre couvrant l'aire d'attraction de la ville de Montpellier. La métropole couvre une superficie de 438 km², tandis que son aire d'attraction s'étend elle sur 2 517 km². Par conséquent, cela a pu permettre de recueillir un plus grand nombre de données pour établir la typologie des tissus urbains.

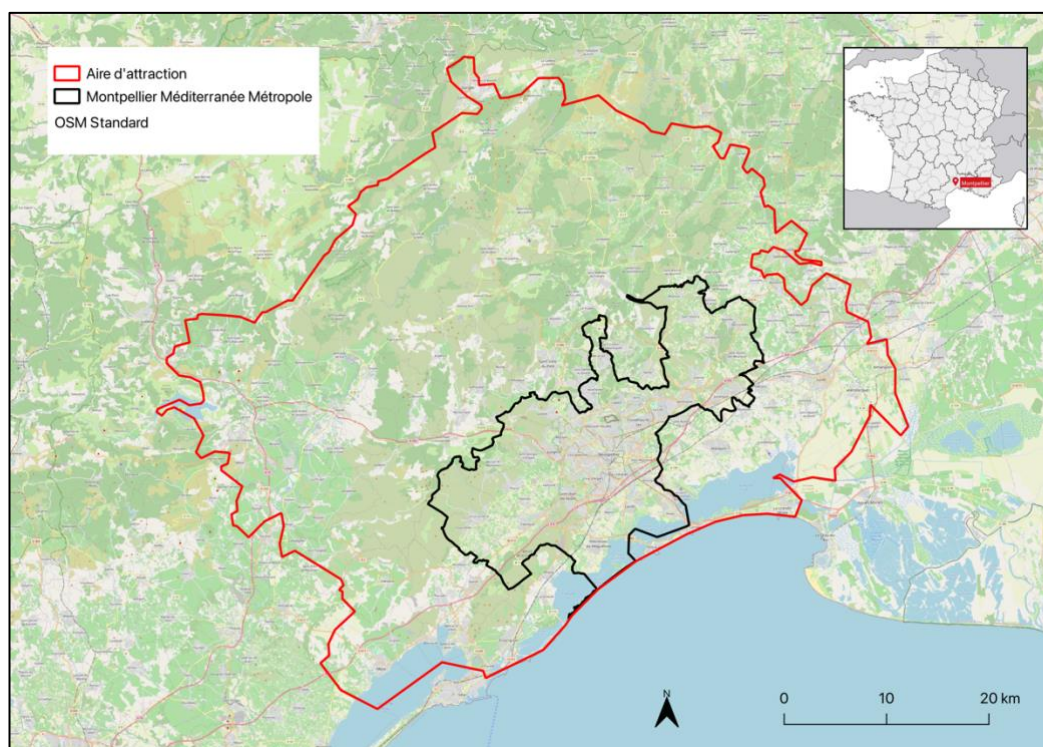


Figure 1 - Carte de localisation de la zone d'étude

2.2 Unité d'analyse

Le choix d'une maille de 250x250m comme unité d'analyse spatiale repose sur un compromis entre précision géographique et lisibilité des dynamiques urbaines. J'ai pu faire le test avec des mailles de 200x200 et 500x500 mais elles s'avéraient soit trop fines et donc nécessiterait une capacité de calcul informatique assez important pour les étapes suivantes soit trop grande et l'analyse de la forme urbaine se retrouverait altéré. Avec une résolution de 250x250 il est donc possible de capter des variations significatives de la forme urbaine. La maille de 250x250 constitue alors une résolution intermédiaire cohérente pour l'analyse morphologique des tissus urbains (Haffner, 2022).

2.3 Choix des indicateurs

En se basant sur les nombreux travaux déjà réalisés pour établir l'identification des tissus urbains à partir d'indicateurs morphologiques (Haffner, 2022 ; Sahraoui et al., 2014) j'ai retenu sept indicateurs.

Indicateurs	Description	Définition
dens_bati	Densité bâti	Surface au sol des bâtiments dans la maille rapporté à la surface totale de la maille en m ² /ha
dens_vege	Densité de végétation	Surface végétalisée dans la maille rapportée à la surface totale de la maille
hauteur_moy_batresid	Hauteur moyenne du bâti résidentiel	Hauteur moyenne des bâtiments résidentiels intersectant la maille
hauteur_stddev	Ecart-type des hauteurs du bâti résidentiel	Ecart-type des hauteurs des bâtiments résidentiels intersectant la maille
part_batresid	Part du bâti résidentiel	Pourcentage du bâti résidentiel par rapport au bâti total contenu dans la maille
nb_parcel	Nombre de parcelles	Nombre de parcelles intersectant la maille
route_longueur	Longueur des routes	Somme des longueurs des routes intersectant la maille

Figure 2 - Tableau des indicateurs morphologiques

La diversité de ces indicateurs permet de croiser différentes dimensions de la morphologie urbaine afin de caractériser au mieux la variété des tissus présents sur le territoire étudié.

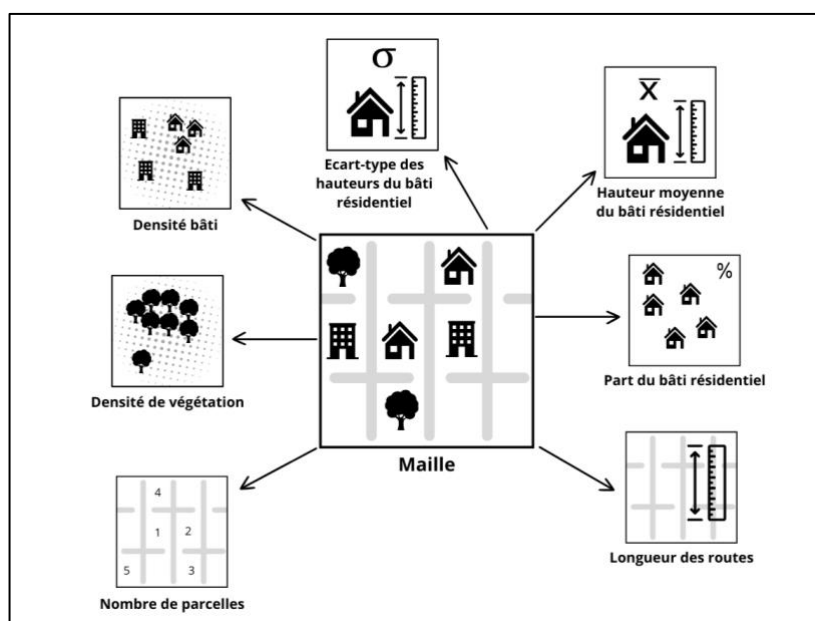


Figure 3 - Schéma conceptuel des indicateurs

2.4 Acquisition des données

L'acquisition des données constitue une étape essentielle dans la mise en œuvre de l'étude dans la mesure où la précision et la disponibilité des données nécessaires conditionnent fortement l'analyse et les résultats obtenus. Les données mobilisées pour le calcul des indicateurs proviennent majoritairement de la BDTOPO sur le site de l'IGN. Notamment des couches Bâtiment, Zone de végétation et Tronçon de route. La base de données Parcellaire Express également disponible sur le site de l'IGN m'a été utile pour calculer l'indicateur relatif au nombre de parcelles par mailles. A partir du site de l'INSEE j'ai également pu télécharger l'aire d'attraction de la ville de Montpellier. Dans une logique de croisement des données entre caractéristiques morphologiques des tissus urbains et potentiel de production photovoltaïque, j'ai pu trouver les données en accès libre du cadastre solaire de Montpellier Méditerranée Métropole³ afin d'évaluer l'irradiation solaire et les surfaces de toitures exploitables qui seront mises en lien avec les typologies urbaines identifiées.

³ <https://data.montpellier3m.fr/dataset/cadastre-solaire-de-montpellier-mediterranee-metropole>

2.5 Calcul des indicateurs

Le calcul de chaque indicateur morphologique a tout d'abord nécessité un traitement préalable afin que les données sources soient localisées uniquement dans l'aire d'attraction. Une sélection par localisation des mailles contenant du bâti a également été effectué en amont afin d'exclure les zones non construites et donc se concentrer sur les mailles utiles pour le cas d'étude. Les mailles contenant une densité de bâti inférieur à 2% ont été exclues, considérant qu'elles n'étaient pas assez représentatives pour être intégrées à l'analyse des tissus.

2.5.1 Densité bâtie

Après avoir effectué l'intersection entre les mailles et le bâti et calculé la surface de bâti en m² dans chaque maille avec la fonction « \$area » j'ai utilisé l'outil Statistiques par catégories pour connaître la somme des surfaces bâties dans chaque maille grâce au champ « sum ». Une fois cette opération effectuée il a fallu réaliser une jointure attributaire entre le champ « sum » des statistiques par catégories et la couche maille grâce à l'id de chacune d'entre elles. Une fois la jointure réalisée, dans la calculatrice de champ j'ai pu calculer la densité du bâti en pourcentage par rapport à la surface totale de la maille qui est de 250x250=62500 m².

2.5.2 Densité de végétation

Pour le calcul de la densité de végétation j'ai suivi le même protocole de calcul que pour la densité bâtie. Cet indicateur est également exprimé en pourcentage.

2.5.3 Hauteur moyenne du bâti résidentiel

Le calcul de cet indicateur a tout d'abord nécessité d'identifier les bâtiments ayant un usage principal comme étant résidentiel. Alors dans la couche de bâti résultant de l'intersection avec les mailles j'ai sélectionné tous ceux avec un usage1 = Résidentiel. J'ai exporté ces résultats dans une nouvelle couche puis utilisé l'outil Statistiques par catégories pour connaître la hauteur moyenne de tous les bâtiments résidentiels dans chaque maille. Puis j'ai réalisé une jointure attributaire du champ « mean » avec la couche contenant les mailles.

2.5.4 Écart-type des hauteurs du bâti résidentiel

Cet indicateur s'inscrit dans la même logique que le calcul de la hauteur moyenne du bâti, il est exprimé par « stddev » dans la table des statistiques par catégories. Il a permis de mesurer la variabilité verticale en mettant en évidence les contrastes de hauteur entre les bâtiments résidentiels au sein d'une maille. Son calcul est apparu comme déterminant pour identifier le tissu collectif haut discontinu car lors d'une première analyse sans cet indicateur il n'était pas possible de l'identifier.

2.5.5 Part du bâti résidentiel

Le pourcentage de bâti à usage résidentiel a été calculé afin de caractériser la vocation dominante du bâti au sein d'une maille. Il a été calculé dans le but d'identifier par la suite lors de la classification un tissu urbain à vocation plus commerciale et/ou industrielle. Le calcul a consisté à rapporter la surface au sol cumulée du bâti résidentiel dans chaque maille à la surface bâtie totale. Certaines mailles ne contenaient aucun bâti résidentiel et la cellule était vide, j'ai alors utilisé la formule « coalesce » pour remplacer les cellules vides par un 0. Le ratio permet alors d'évaluer la part relative du résidentiel dans l'occupation au sol du bâti.

2.5.6 Nombre de parcelles

L'aire d'attraction de Montpellier se trouve pour une petite partie dans le département du Gard. Il a donc fallu fusionner les couches Parcellaire express des départements de l'Hérault et du Gard pour couvrir toute la surface d'étude. Une fois cela fait, j'ai réalisé une sélection par localisation des parcelles qui intersectaient les mailles d'analyse. Une fois l'intersection faite entre les parcelles et les mailles j'ai utilisé l'outil statistiques par catégories pour joindre le champ « count » à la couche des mailles qui permet de connaître le nombre de parcelles contenues dans les mailles.

2.5.7 Longueur des routes

Le calcul de la longueur des routes dans chaque maille doit permettre d'évaluer la structure viaire du tissu urbain. Une forte densité du réseau routier peut refléter une forte fragmentation parcellaire et donc un tissu urbain dense, à l'inverse une faible densité du

réseau routier reflétera un tissu plus lâche, caractéristique de zones résidentielles peu denses. Pour calculer cet indicateur j'ai d'abord sélectionné uniquement les routes permettant une circulation automobile (Importance 1 à 5) puis fais une intersection avec les mailles. Ensuite pour avoir la valeur relative à la longueur des routes dans une maille, j'ai utilisé dans la calculatrice de champ la fonction « \$length ». Ensuite comme pour les autres indicateurs j'ai obtenu les statistiques par catégories pour connaître la somme des longueurs des routes par mailles puis fait une jointure attributaire de ce champ avec la couche contenant les mailles.

2.6 Calcul du potentiel solaire

Les données concernant les surfaces de toiture exploitables en m^2 ainsi que l'irradiation solaire incidente moyenne exprimée en $kWh/m^2/an$ sur ces surfaces étant déjà disponibles dans le cadastre solaire de l'agglomération, j'ai dans un premier temps créé un champ (energy_bat) pour calculer le potentiel solaire brut de chaque bâtiment en multipliant ces deux variables et en divisant le résultat par 1000 pour obtenir une unité en MWh. Ensuite j'ai réalisé un résumé de jointure spatiale en intersectant le cadastre solaire et les mailles, en joignant la somme des surfaces exploitables ainsi que la somme du champ energy_bat pour chaque maille. Étant donné que plusieurs bâtiments se trouvent à cheval sur 2 mailles, j'ai calculé un nouveau champ pour avoir une irradiation moyenne pondérée de chaque maille en divisant le champ energy_bat par la somme des surfaces exploitables. Ensuite, en multipliant les surfaces de toitures exploitables par l'irradiation moyenne pondérée j'ai pu obtenir le potentiel de production solaire brut par mailles exprimé en MWh/an.

Afin d'enrichir l'analyse, à partir des données disponibles dans le cadastre solaire et en m'appuyant sur des caractéristiques contextuelles de chaque tissu urbain j'ai réalisé 4 scénarios (Figure 4) permettant de comparer différentes hypothèses et de mieux appréhender la variabilité du potentiel solaire selon les tissus urbains.

	Scénario	Description	Intérêt principal
1	Standard	Potentiel brut basé sur une irradiation solaire incidente moyenne sur la partie exploitable de la toiture	Référence théorique
2	Corrigé	Potentiel standard ajusté avec un coefficient de faisabilité par tissu urbain	Intègre des contraintes de développement
3	Basse inclinaison	Potentiel calculé à partir d'une irradiation incidente sur un plan incliné à 15° et orienté plein sud	Représentativité de bâti industriel et commercial
4	Forte inclinaison	Potentiel calculé à partir d'une irradiation incidente sur un plan incliné à 60° et orienté plein sud	Observer les différences avec une inclinaison plus faible

Figure 4 - Tableau des scénarios

Dans le cadre du scénario 2, les coefficients de faisabilité attribués à chaque type de tissu urbain (Figure 5) sont dans le but d'ajuster le potentiel solaire en fonction de contraintes susceptibles d'entraver ou de faciliter l'installation de panneaux photovoltaïques. Ils ont été définis de manière qualitative et visent à refléter plus fidèlement le potentiel solaire réellement mobilisable pour chaque tissu.

Tissu urbain	Coefficient de faisabilité	Justification
Centre urbain	0.2	Fortes contraintes techniques et réglementaires liées à l'accessibilité aux toitures en milieu dense et protection patrimonial
Tissu mixte et dense	0.5	Hétérogénéité forte du bâti et coexistence de plusieurs usages pouvant limiter le développement photovoltaïque
Collectif haut discontinu	0.8	Bâti accessible avec des toitures plates ou faiblement inclinées, potentiel mobilisable élevé
Résidentiel dense	0.7	Faisabilité pouvant être limitée par des facteurs d'orientation ou de coût d'installation mais incitation des pouvoirs publics
Résidentiel épars	0.75	Peu de contraintes techniques, idem que le résidentiel dense
Zones d'activités	0.95	Toitures larges facilement équipables, obligations réglementaires (loi EnR)

Figure 5 - Tableau des coefficients de faisabilité

2.7 Application statistique

En raison de la taille et du volume des données à traiter, l'analyse statistique des indicateurs s'est effectuée au dépend de Jamovi ; dans RStudio, qui constitue un environnement plus adapté au traitement de jeux de données volumineux. Après nettoyage du tableau de données pour garder uniquement l'ID des mailles et les indicateurs morphologiques, il a fallu procéder à une standardisation (centrage-réduction) des variables afin de rendre les indicateurs comparables entre eux.

La méthodologie statistique mise en œuvre repose sur la réalisation d'une analyse factorielle, d'une analyse en composantes principales (ACP) afin de mesurer la contribution de chaque variable aux axes principaux, puis d'une classification à l'aide de la méthode de partitionnement k-means dans le but d'identifier les typologies de tissus urbains du territoire d'étude.

La classification par la méthode des nuées dynamiques (Bernabé et al., 2013) a permis de regrouper les individus (mailles) en un nombre de classes homogènes avec des profils morphologiques similaires. J'ai pu analyser différents résultats avec cinq, six et sept classes mais c'est une classification à six classes que j'ai retenue. Une classification en cinq groupes s'est révélée trop réductrice car en analysant visuellement les différents tissus urbains je distinguais trop de différences de trame urbaine entre les mailles d'une même classe. A l'inverse, une classification en sept groupes introduisait une classe aux effectifs très réduits (classe qu'on pouvait identifier comme étant le centre urbain) et peu significative. Les noms attribués aux tissus urbains ont été choisis en s'appuyant sur les référentiels proposés dans les travaux de Bernabé et al. (2013) et Haffner (2022), afin d'en faciliter l'identification et la lecture.

La classification des tissus urbains étant faite, il faut croiser ces données qualitatives avec le potentiel solaire des toitures calculé en MWh/an qui représente des données quantitatives. Une analyse bivariée mixte a donc été réalisée dans Jamovi avec le module ANOVA grâce à une méthode non paramétrique dite de Kruskal-Wallis afin de tester si les différences de potentiel solaire entre les types de tissus urbains sont statistiquement significatives et de mesurer l'ampleur de cet effet. Cette méthode a été privilégiée plutôt qu'un test ANOVA paramétrique à un facteur car les conditions de normalité n'étaient pas respectées pour 5 classes sur 6 après visualisation du test de Shapiro-Wilk.

3. Résultats

A la suite de la trame méthodologique détaillée précédemment, cette partie présente les résultats issus de l'analyse croisée entre forme urbaine et potentiel solaire. Elle commence par l'identification des tissus urbains à partir des indicateurs morphologiques sélectionnés puis termine par l'examen de la distribution du potentiel solaire selon les tissus identifiés sur le territoire d'étude.

3.1 Identification des tissus urbains

Afin d'explorer les relations entre les différents indicateurs morphologiques, la matrice des corrélations (Figure 6) constitue un outil essentiel permettant d'identifier les éventuelles oppositions ou complémentarités entre les variables.

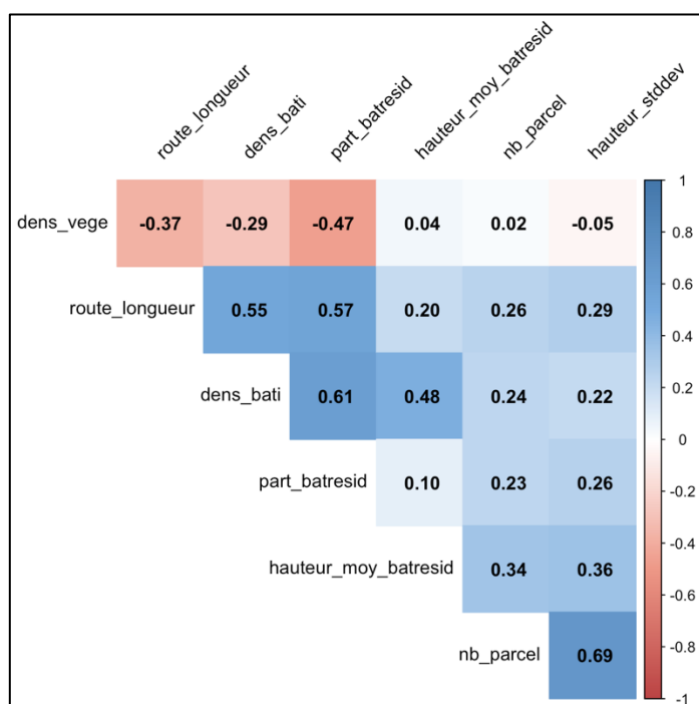


Figure 6 - Matrice des corrélations

Elle met en évidence certaines corrélations positives et négatives notables. La longueur du réseau routier est assez bien corrélée positivement à la densité bâtie ($r=0.55$) et à la part du bâti résidentiel ($r=0.57$), ce qui suggère que les tissus résidentiels denses sont structurés par un réseau routier important. A l'inverse, la densité de végétation présente des corrélations négatives avec plusieurs indicateurs, traduisant une opposition claire entre les espaces végétalisés et les espaces

urbanisés. On observe également la corrélation positive la plus forte entre le nombre de parcelles et l'écart-type des hauteurs du bâti résidentiel ($r=0.69$), ce qui signifie que les

mailles présentant une forte fragmentation parcellaire tendent aussi à afficher une grande hétérogénéité des hauteurs de bâtiment à vocation résidentielle, et inversement.

Le graphique des valeurs propres permet d'identifier le nombre de dimensions pertinentes à retenir pour l'analyse (Figure 7). Dans ce cas, les deux premiers axes expliquent à eux seuls plus de 60% de la variance totale, c'est pourquoi lors de l'analyse en composantes principales (ACP), l'interprétation se concentrera principalement sur ces deux dimensions.

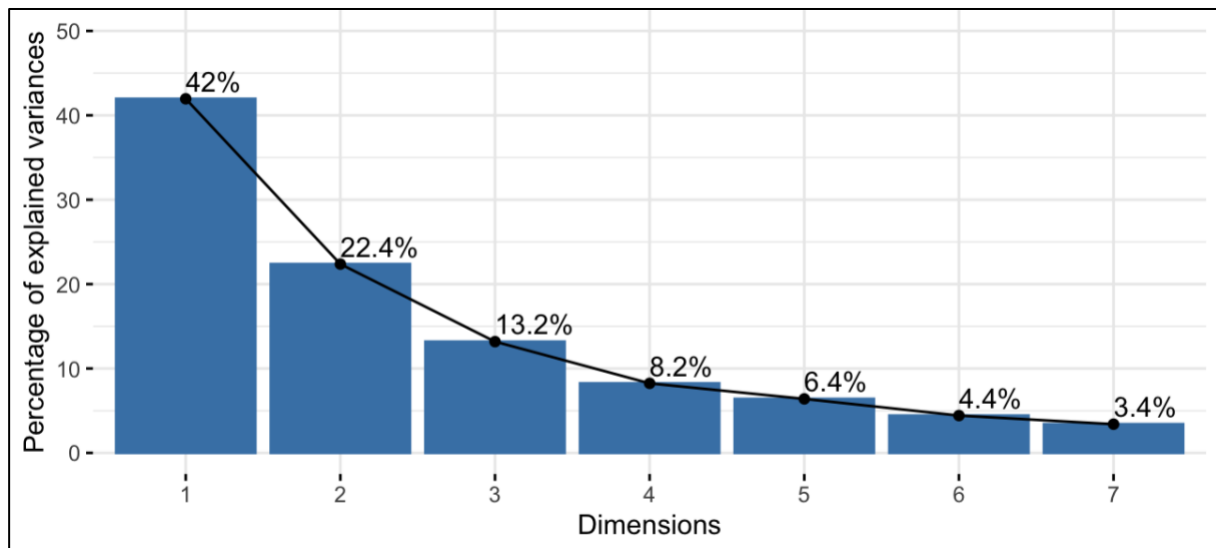


Figure 7 - Éboulis des valeurs propres

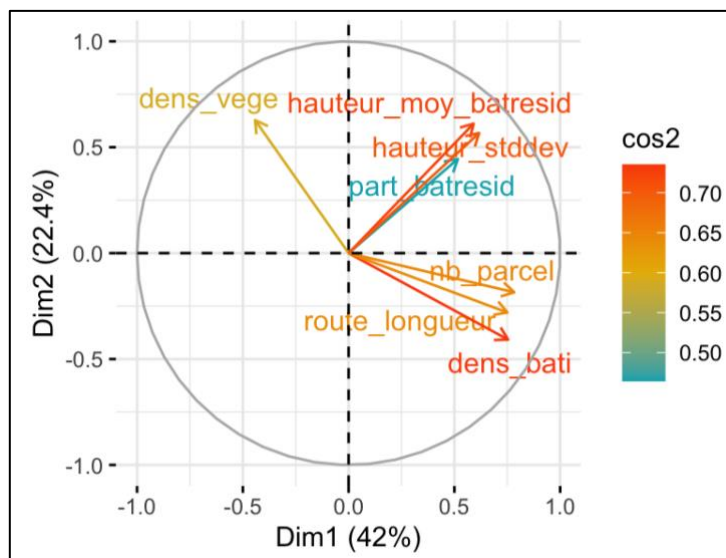


Figure 8 - Cercle des corrélations

Le cercle des corrélations met en évidence 3 axes majeurs : un axe qu'on pourrait qualifier de densité urbaine, opposé à un axe végétalisé puis un axe plutôt lié à une fonction résidentielle dominante. On constate une forte contribution à la dimension 1 des variables de densité bâtie, d'écart-type et de hauteur moyenne du bâti résidentiel.

Comme vu précédemment pour la matrice des corrélations, la densité de végétation apporte une contribution modérée mais tout de même significative à la dimension 2.

La méthode de classification k-means a permis ensuite de regrouper en six classes les mailles présentant des profils morphologiques similaires. Le nuage de points projeté dans le plan factoriel illustre la répartition spatiale de ces classes selon les deux dimensions de l'ACP (Figure 9). Le tableau des caractéristiques morphologiques (Figure 10) permet de comparer les valeurs moyennes et médianes pour chaque tissu urbain issu de la classification et contribue à les identifier plus facilement.

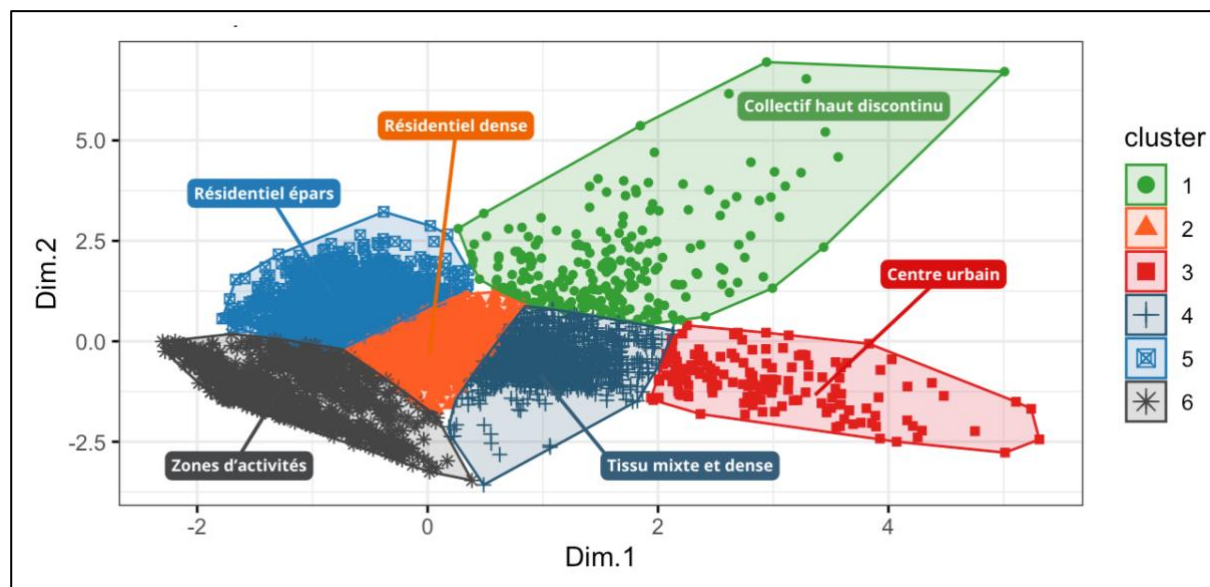


Figure 9 – Projection des 6 classes sur le nuage de points

Characteristic	1 N = 241 ¹	2 N = 1,851 ¹	3 N = 149 ¹	4 N = 1,449 ¹	5 N = 1,826 ¹	6 N = 1,129 ¹
hauteur_moy_batresid	12.53 (10.87) (5.18)	5.55 (5.31) (1.30)	9.34 (8.65) (2.44)	5.98 (5.63) (1.60)	5.90 (5.62) (1.48)	1.79 (0.00) (2.35)
part_batresid	60 (64) (21)	58 (65) (26)	68 (69) (10)	67 (73) (20)	58 (64) (25)	3 (0) (7)
nb_parcel	54 (47) (36)	67 (67) (26)	247 (240) (83)	114 (114) (37)	41 (40) (19)	23 (21) (14)
dens_bati	18 (18) (6)	11 (10) (5)	41 (39) (10)	20 (20) (6)	5 (4) (2)	9 (6) (10)
dens_vege	27 (23) (17)	24 (22) (15)	10 (8) (7)	14 (12) (10)	55 (56) (21)	25 (19) (21)
route_longueur	1,294 (1,249) (502)	955 (932) (281)	1,906 (1,870) (353)	1,337 (1,307) (277)	597 (589) (235)	706 (619) (424)
hauteur_stddev	5.41 (4.91) (2.32)	1.50 (1.41) (0.53)	2.28 (2.16) (0.66)	1.80 (1.59) (0.75)	1.42 (1.39) (0.71)	0.12 (0.00) (0.32)
¹ Mean (Median) (SD)						

Figure 10 - Tableau des caractéristiques des indicateurs par type de tissu urbain



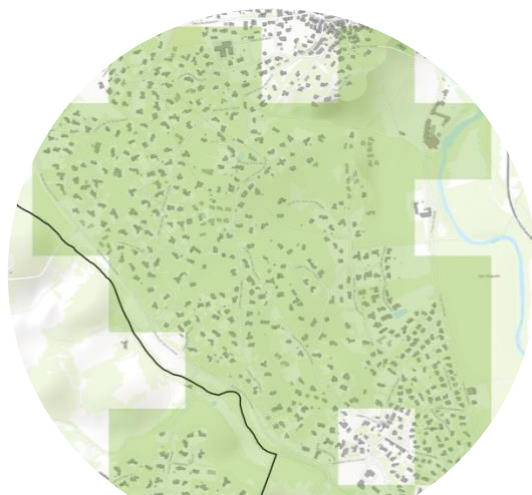
Centre urbain



Résidentiel dense



Tissu mixte et dense



Résidentiel épars



Collectif haut discontinu



Zones d'activités

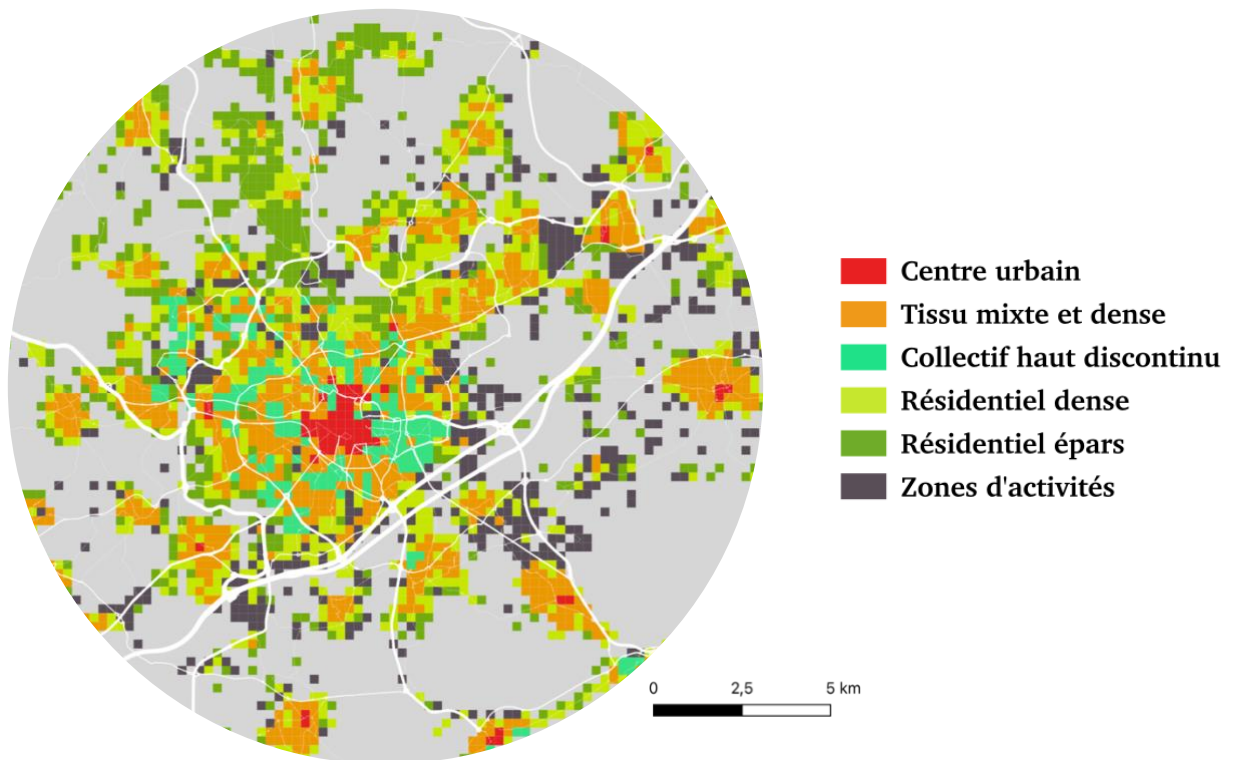


Figure 11 - Répartition spatiale des mailles de tissus urbains

Suite à l'analyse spatiale fine des différents tissus urbains, il est possible de caractériser Montpellier comme une ville polycentrique hiérarchisée (Haffner, 2022), structurée autour d'un centre urbain dense et compact mais également marquée par la présence de plusieurs pôles secondaires tels que Mauguio, Pérols ou Palavas-les-Flots. Ils marquent une transition entre la ville-centre et le littoral méditerranéen, séparés par l'autoroute A9.

3.2 Évaluation du potentiel solaire

Après avoir identifié et caractérisé les différents tissus urbains, l'analyse se poursuit par l'évaluation du potentiel solaire réalisé sur 2637 mailles localisées uniquement dans l'agglomération de Montpellier Méditerranée Métropole et non plus l'aire d'attraction. Cette étape consiste à estimer le potentiel théorique des toitures à produire de l'électricité photovoltaïque en fonction des caractéristiques morphologiques des mailles, de l'irradiation solaire et des scénarios envisagés.

3.2.1 Scénario standard de référence

Le scénario 1 correspond au calcul du potentiel solaire brut, obtenu en multipliant la surface de toiture exploitable par l'irradiation solaire incidente moyenne pondérée.

A l'issue des calculs, les résultats suivants ont été obtenus :

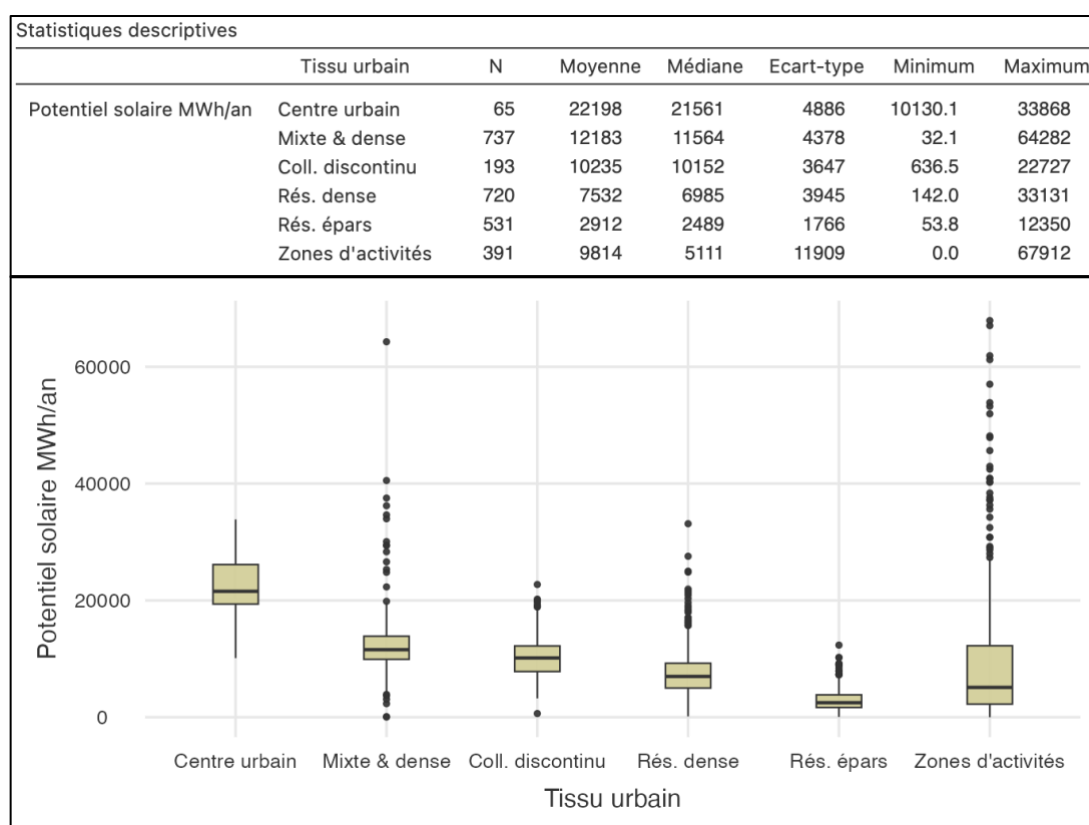


Figure 12 - Statistiques et boxplots du scénario 1

Malgré un nombre important de valeurs aberrantes, ce graphique permet d'observer que le centre urbain est le tissu présentant le plus grand potentiel solaire avec une moyenne de 22 198 MWh/an. Cela s'explique en partie par la forte densité de toitures contenues

dans ce tissu urbain. Les tissus résidentiels denses et épars affichent globalement le potentiel le plus faible, qui peut s'expliquer par une faible densité des toitures ainsi qu'une orientation peut-être moins exploitable. Le tissu des zones d'activités est celui affichant la plus forte dispersion des individus avec une médiane relativement faible par rapport au collectif haut discontinu ou au tissu mixte et dense mais un grand nombre de valeurs extrêmes élevées. On peut soumettre l'hypothèse selon laquelle les zones d'activités représentent un fort potentiel solaire localisé en raison de grandes surfaces de toitures mais ce potentiel est irrégulièrement réparti en fonction des configurations morphologiques propres à chaque secteur.

La consommation moyenne d'électricité pour un foyer français s'élève à 5000 kWh/an.⁴ Si l'on prend la valeur moyenne du potentiel solaire d'un tissu urbain tel que le collectif haut discontinu égale à 10 235 MWh/an, les installations photovoltaïques pourraient **théoriquement** alimenter environ 2047 foyers en électricité sur une année.

Le test de Kruskal-Wallis (Figure 13) démontre que le potentiel solaire varie significativement selon les types de tissus urbains ($p < 0.001$), ce qui confirme l'hypothèse selon laquelle la morphologie urbaine influence directement la ressource solaire exploitable. La taille de l'effet ($\epsilon^2 = 0.5$) suggère que 50% de la variabilité du potentiel solaire est expliquée par la typologie des tissus urbains.

Anova unidirectionnelle (non paramétrique)				
Kruskal-Wallis				
	χ^2	ddl	p	ϵ^2
Potentiel solaire MWh/an	1318	5	<.001	0.500

Figure 13 - Test ANOVA scénario 1

⁴ Source : www.fournisseurs-electricite.com

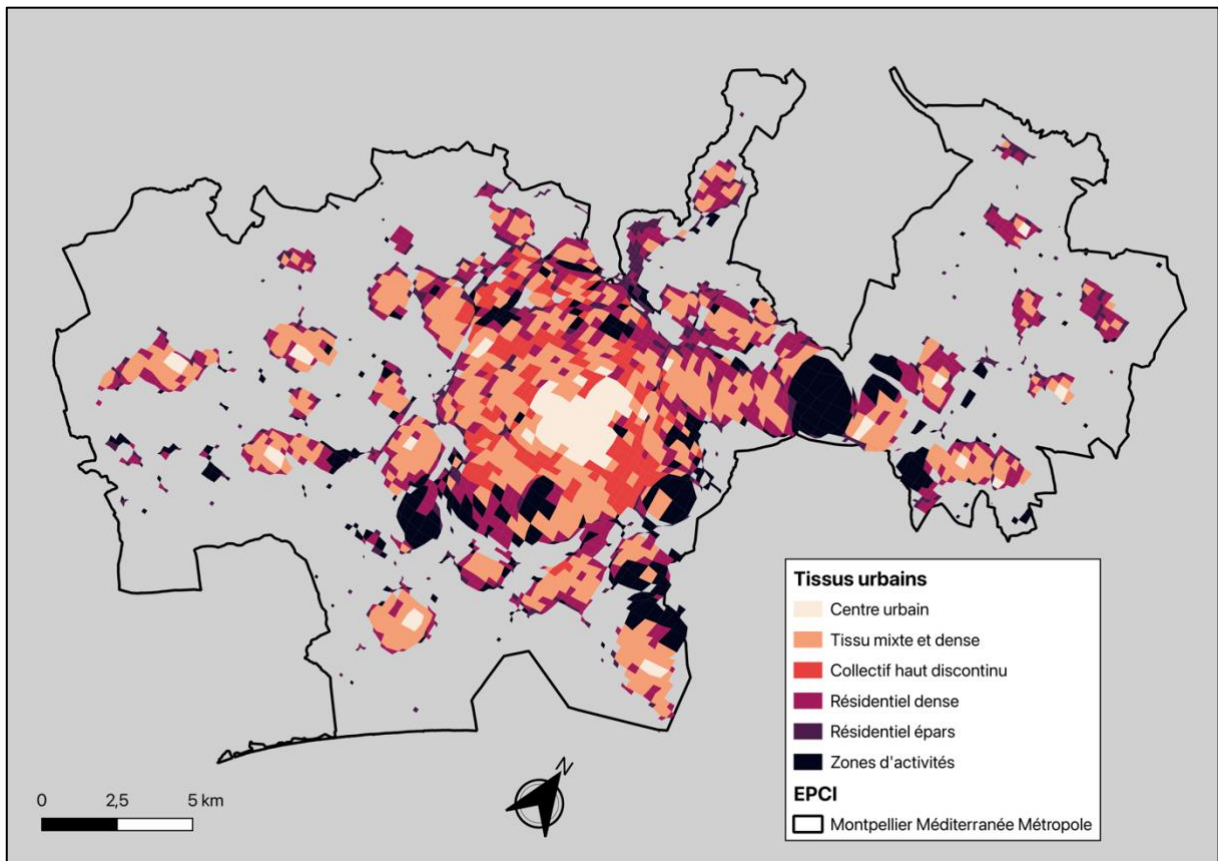


Figure 14 - Carte par anamorphose du potentiel solaire selon les tissus urbains à partir du scénario 1

La répartition spatiale du potentiel solaire brut révèle des zones pouvant être particulièrement propices au développement photovoltaïque selon les tissus urbains. C'est le cas notamment de la zone artisanale de Saint-Antoine que l'on voit caractérisée par le cercle noir au nord-est du centre de Montpellier.

3.2.2 Scénario standard corrigé par coefficient de faisabilité

Le scénario 2 vise à affiner l'estimation du potentiel solaire brut en intégrant un coefficient de faisabilité spécifique à chaque tissu permettant de mieux refléter les contraintes réelles susceptibles de limiter l'installation effective de panneaux photovoltaïques.

A l'issue des calculs, les résultats obtenus sont les suivants :

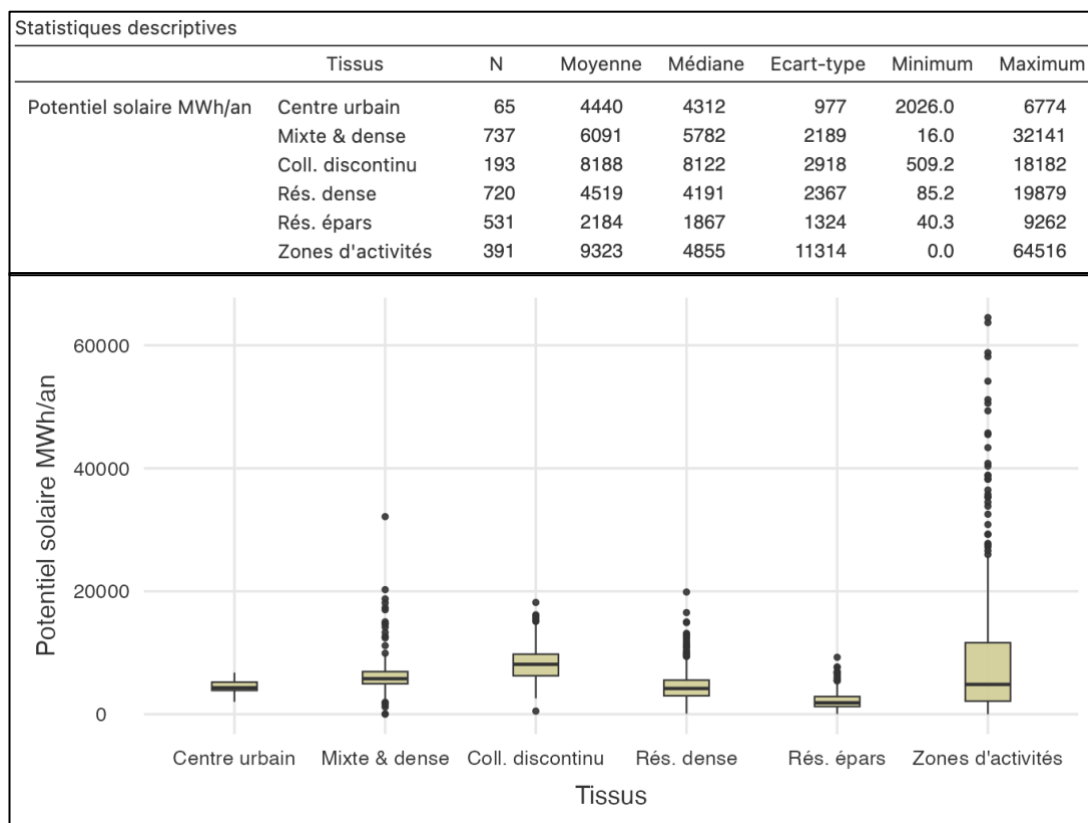


Figure 15 - Statistiques et boxplots du scénario 2

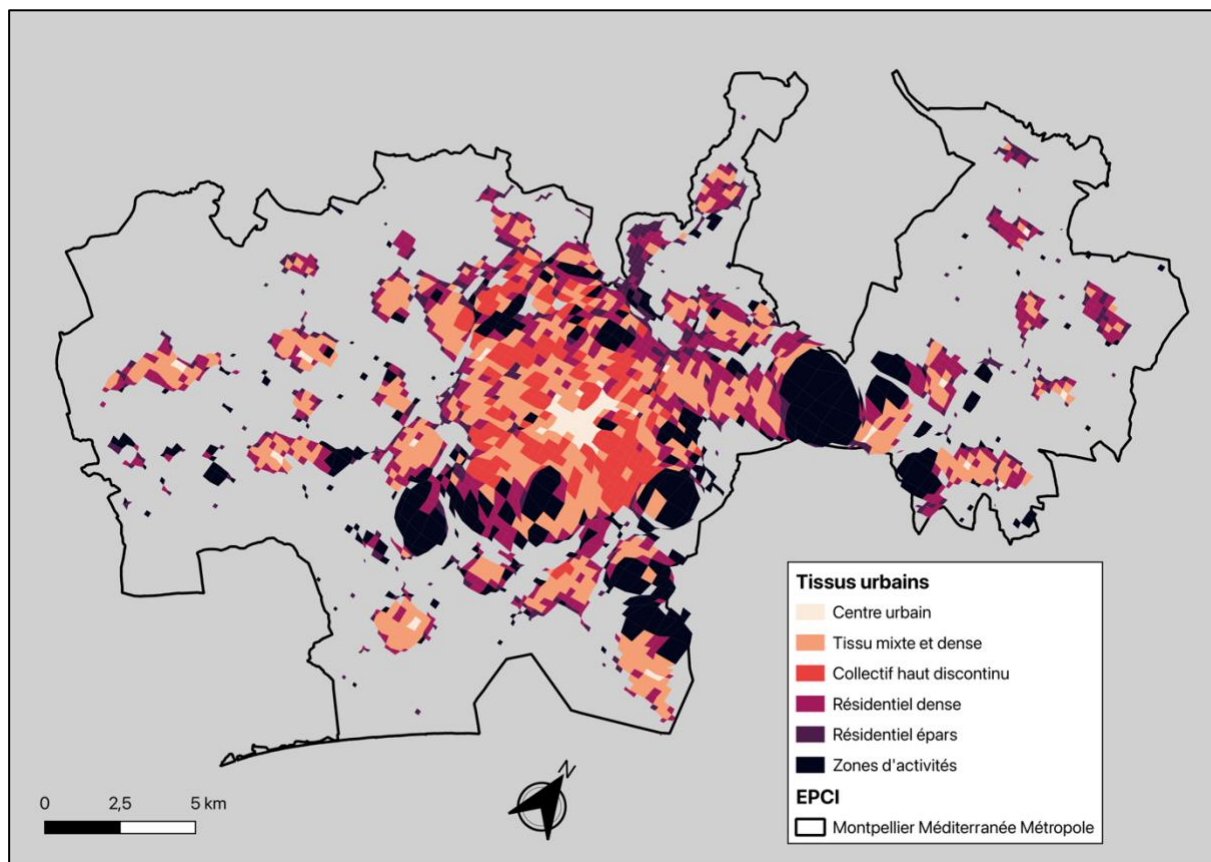
Avec l'ajout des coefficients, on observe logiquement une nette baisse de potentiel du centre urbain. Le collectif haut discontinu paraît alors comme le tissu urbain avec le meilleur potentiel avec une valeur médiane de 8188 MWh/an. Le tissu mixte et dense garde un bon potentiel malgré un coefficient à 0.5, s'expliquant en partie par le nombre important de mailles de ce tissu mais aussi par le fait qu'il combine une certaine densité bâtie avec une diversité de formes urbaines permettant d'exploiter une part significative des toitures.

Anova unidirectionnelle (non paramétrique)				
Kruskal-Wallis				
	χ^2	ddl	p	ϵ^2
Potentiel solaire MWh/an	1014	5	<.001	0.385

Figure 16 - Test ANOVA scénario 2

Le test de Kruskal-Wallis pour le scénario 2 révèle également une différence significative du potentiel solaire selon les tissus urbains. Les valeurs du chi-deux et ϵ^2 en baisse par rapport au scénario 1 témoignent de l'introduction des coefficients ayant contribué à

réduire les écarts et atténuer les disparités entre les classes avec une estimation plus réaliste du potentiel exploitable.



La carte du scénario 2 met en évidence la surexposition du tissu d'activités et du collectif haut discontinu par rapport au centre urbain bien visible sur la carte du scénario 1. On constate que les zones les plus étendues géographiquement (Figure 11) tels que le tissu résidentiel éparé ne sont pas celles ayant le meilleur potentiel mais plutôt celles réunissant des caractéristiques morphologiques optimales du bâti pour un développement photovoltaïque.

3.2.3 Scénarios basse et forte inclinaison

Les scénarios 3 et 4 visent à évaluer l'impact de l'inclinaison des panneaux photovoltaïques sur le potentiel solaire selon les tissus urbains, respectivement pour des plans inclinés à 15° et 60°. J'ai fait le choix de les regrouper dans une seule partie car les différences observées entre ces deux scénarios mais aussi avec le scénario 1 sont marginales à l'échelle des tissus urbains.

Anova unidirectionnelle (non paramétrique)				
Kruskal-Wallis				
	χ^2	ddl	p	ϵ^2
Potentiel solaire MWh/an	1300	5	<.001	0.493

Figure 18 - Test ANOVA scénario 3

Anova unidirectionnelle (non paramétrique)				
Kruskal-Wallis				
	χ^2	ddl	p	ϵ^2
Potentiel solaire MWh/an	1302	5	<.001	0.494

Figure 19 - Test ANOVA scénario 4

En témoigne le test de Kruskal-Wallis réalisé pour ces deux derniers scénarios, avec des valeurs du chi-deux quasi-similaires et de taille d'effet aussi très proches de celles du scénario 1.

Ces résultats peuvent confirmer une hypothèse selon laquelle l'inclinaison des panneaux photovoltaïques a peu d'influence sur le potentiel solaire selon la hiérarchie entre les tissus urbains établie lors du scénario standard. N'ayant pas révélé de différences significatives avec le scénario 1, on peut suggérer que dans un contexte climatique comme celui de l'agglomération de Montpellier jouissant d'un ensoleillement annuel favorable, l'inclinaison des panneaux photovoltaïques exercera une influence minime sur le potentiel solaire annuel à l'échelle de la forme urbaine. Ces degrés d'inclinaison seraient plus perceptibles à l'échelle du bâtiment selon sa morphologie et l'orientation de sa toiture ; au mieux à l'échelle de l'îlot.

3.3 Tableaux récapitulatifs

L'analyse de ces tableaux permet d'observer entre autres que pour tous les tissus urbains identifiés, la valeur médiane du scénario 4 est systématiquement supérieure bien que légère à celle du scénario 3. Cela résultat suggère que dans le contexte du territoire d'étude, une inclinaison des panneaux à 60° capte mieux l'irradiation solaire qu'une inclinaison à 15°. Une explication de ce résultat pourrait être liée à la latitude du territoire où une forte inclinaison (supérieure à 15°) des panneaux photovoltaïques est plus optimale pour capter un maximum d'énergie.

Centre urbain n=65	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Moyenne	22198	4440	23035	23682
Médiane	21561	4312	22376	22991
Écart-type	4886	977	4954	5116
Min - Max	10130.1 - 33868	2026 - 6774	10514.8 - 33968	10803.4 - 35236

Mixte & dense n=737	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Moyenne	12183	6091	12859	13187
Médiane	11564	5782	12106	12403
Écart-type	4378	2189	4751	4858
Min - Max	32.1 - 64282	16 - 32141	33.2 - 69715	34.2 - 71403

Coll. discontinu n=193	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Moyenne	10235	8188	10810	11094
Médiane	10152	8122	10641	10987
Écart-type	3647	2918	3878	3975
Min - Max	636.5 - 22727	509.2 - 18182	663.3 - 23860	689.5 - 24507

Rés. dense n=720	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Moyenne	7532	4519	8013	8211
Médiane	6985	4191	7402	7609
Écart-type	3945	2367	4309	4407
Min - Max	142 - 33131	85.2 - 19879	154.5 - 35896	157.6 - 36760

Rés. épars n=531	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Moyenne	2912	2184	3077	3155
Médiane	2489	1867	2601	2665
Écart-type	1766	1324	1897	1944
Min - Max	53.8 - 12350	40.3 - 9262	52.3 - 13541	52 - 13881

Zones d'activités n=391	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Moyenne	9814	9323	10738	10975
Médiane	5111	4855	5627	5742
Écart-type	11909	11314	13169	13454
Min - Max	0.0 - 67912	0.0 - 64516	0.0 - 76065	0.0 - 77660

4. Discussion et limites de l'étude

Les résultats obtenus notamment par la méthode de classification pour identifier les tissus urbains sont globalement satisfaisants car on distingue plutôt aisément les différentes formes urbaines attendues, mais certaines limites subsistent.

Le manque de données dans la BDTOPO fournie par l'IGN a pu biaiser la classification de certaines mailles. En effet, lors du calcul des indicateurs j'ai pu constater que pour beaucoup de bâtiments l'usage 1 est renseigné comme étant Indifférencié, ce qui a pu limiter l'identification de bâtiments à usage résidentiel. De plus, pour beaucoup de bâtiments la hauteur n'était également pas renseignée. Alors pour une analyse plus fine des tissus urbains il aurait été intéressant de calculer plus d'indicateurs morphologiques tels que l'espace entre les bâtiments, leur volume ou encore l'année de construction (là aussi très peu d'informations disponibles dans la BDTOPO).

Lors du calcul du potentiel solaire, les surfaces de toitures exploitables n'ont pas été directement calculées à l'intérieur de chaque maille, mais ont été pondérées à partir de l'intersection entre les bâtiments et les mailles. Cette méthode a sans doute introduit des imprécisions car lorsqu'un bâtiment est coupé entre deux mailles, la surface exploitable mais aussi les données liées à l'irradiation sont attribuées à chaque portion sans nécessairement refléter la réalité du potentiel effectif de chaque « morceau » de toiture dans les mailles concernées. Cela a pu notamment conduire à une surestimation du potentiel solaire comme on a pu voir dans les différents scénarios avec des valeurs aberrantes. Pour améliorer cette estimation, il serait préférable de calculer post-intersection l'irradiation solaire incidente de chaque toiture possiblement à l'aide de l'extension GRASS sur QGIS et de son modèle `r.sun.insoltime`. Cela permettrait d'obtenir une évaluation plus fidèle du potentiel solaire à l'échelle de la grille spatiale prédéfinie.

Les coefficients de faisabilité des tissus urbains sont aussi discutables car attribués de manière arbitraire en s'appuyant principalement sur des observations issues de la littérature non scientifique ou d'analyse spatiale sur Google Earth. Bien qu'ils permettent de mieux refléter certaines contraintes techniques ou réglementaires, ils ne reposent pas sur des données empiriques précises et donc leur robustesse est limitée. Une amélioration possible consisterait à affiner ces coefficients à partir de retours d'expérience sur des

projets photovoltaïques existants ou une enquête locale auprès de professionnels de l'immobilier ou de l'administration urbaine.

Concernant le test ANOVA non paramétrique selon la méthode Kruskal-Wallis, j'ai pris le parti de l'utiliser en dépit des recommandations du professeur qui préconisait le recours à une ANOVA à un facteur. Ce choix repose sur le fait que les données ne respectaient pas l'hypothèse de normalité, rendant l'utilisation d'un test paramétrique discutable. Il aurait peut-être été plus judicieux pour normaliser les données d'appliquer une transformation logarithmique mais cette option n'a pas été retenue afin d'éviter de complexifier l'interprétation des résultats.

La notion de « potentiel solaire » est également discutable, dans le cadre de l'étude je me suis basé uniquement sur des données techniques telles que la surface et l'irradiation mais le potentiel couvre un cadre bien plus large difficile à quantifier. A travers les coefficients de faisabilité j'ai essayé d'en rendre compte mais il y a tout un tas de contraintes réelles liées au développement d'infrastructures photovoltaïques parmi lesquelles l'entretien et le financement de ces installations. Le potentiel réel exploitable est bien souvent inférieur au potentiel théorique calculé car plusieurs facteurs entrent en jeu : la technologie utilisée (monocristallin, polycristallin, etc.), la puissance des panneaux exprimée en kilowatt-crête (kWc), la distance entre le réseau basse tension et le point de raccordement du bâtiment qui peut induire des pertes et bien d'autres. Puis la notion de potentiel peut revêtir aussi dans une moindre mesure certes mais une dimension politique car elle oriente les priorités d'aménagement et contribue à légitimer des choix de stratégies énergétiques à l'échelle territoriale.

5. Conclusion

Cette étude a proposé une approche croisée entre analyse morphologique des formes urbaines et estimation du potentiel photovoltaïque sur le territoire de Montpellier Méditerranée Métropole et de son aire d'attraction. Grâce à l'utilisation combinée des logiciels QGIS, RStudio et Jamovi il a été possible d'identifier différents types de tissus urbains puis d'en évaluer le potentiel solaire théoriquement exploitable.

Les résultats ont mis en évidence une forte influence des tissus urbain sur la distribution spatiale du potentiel solaire permettant de répondre à la problématique posée. L'introduction de différents scénarios a permis de rendre compte de la complexité de développement efficient de cette énergie renouvelable.

Ce travail met en lumière l'intérêt d'une approche intégrée pour mieux cerner les opportunités d'aménagement solaire à l'échelle locale mais des limites subsistent dans le traitement spatial des surfaces de toitures et la prise en compte de dimensions économiques, sociales ou réglementaires absentes de l'étude.

L'enjeu est ici de permettre une réflexion plus stratégique où des dimensions opérationnelles en lien avec les morphologies urbaines doivent amener à une gouvernance énergétique locale efficace afin d'atteindre les objectifs fixés par le Plan Montpellier Solaire 2050.

6. Bibliographie

- Aubry, E.** (2024). *Éolien—Solaire : Une révolution l Le Dessous des Cartes—ARTE - YouTube*. Consulté 9 janvier 2025, à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=r0YSJPHJlr0>
- Bernabé, A., Calmet, I., Musy, M., Bocher, E., & Andrieu, H.** (2013). *Classification automatique des tissus urbains par la méthode des nuées dynamiques*.
- Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., & Compagnon, R.** (2006). *Urban Form, Density and Solar Potential*.
- Collard, F.** (2015). Les énergies renouvelables. *Courrier hebdomadaire du CRISP*, 22522253(7), 5-72. <https://doi.org/10.3917/cris.2252.0005>
- Compagnon, R.** (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, 36(4), 321-328. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.009>
- EDF solutions solaires.** (2024). *Ensoleillement des panneaux solaires : Rendement et carte de France*. EDF solutions solaires. Consulté 18 mars 2025, à l'adresse <https://www.edf-solutions-solaires.com/guide-solaire/carte-ensoleillement-france/>
- ENGIE My Power.** (2023). *Quelle est la production d'un panneau solaire en kwh pour 1 m2 ?* <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/caracteristiques-panneaux-solaires/quelle-est-la-production-d-un-panneau-solaire-en-kwh-pour-1-m2.html>
- Fusco, G.** (2018). *Ville, complexité, incertitude. Enjeux de connaissance pour le géographe et l'urbaniste*.
- Haffner, M.** (2022). *L'impact des formes urbaines dans la mise en place des politiques de transition énergétique : Une approche par la modélisation* [These de doctorat, Marne-la-vallée, ENPC]. <https://theses.fr/2022ENPC0011>

- Kanters, J., & Horvat, M.** (2012). Solar Energy as a Design Parameter in Urban Planning. *Energy Procedia*, 30, 1143-1152. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.127>
- Levy, A.** (2005). Formes urbaines et significations : Revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*, 122(3), 25-48. <https://doi.org/10.3917/esp.122.0025>
- Montpellier Méditerranée Métropole.** (2023). *Cadastre solaire de Montpellier Méditerranée Métropole* / *Open Data—Montpellier Méditerranée Métropole*. <https://data.montpellier3m.fr/dataset/cadastre-solaire-de-montpellier-mediterranee-metropole>
- Sahraoui, Y., Lunardi, N., & Antoni, J.-P.** (2014). Essai de typologie des espaces résidentiels à partir d'indicateurs désagrégés à l'échelle du bâtiment. Application à Besançon et à Metz. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26431>