

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

تلمسان-جامعة أبي بكر بلقايد

Université Abou bakr Belkaïd– Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THÈSE

Présentée pour l'obtention de diplôme de doctorat

En: Architecture

Spécialité: Patrimoine architectural urbain et paysager

Par: BOUDALIA Chahrazede

Sujet

La ville algérienne face aux défis du développement durable: l'impact de la compacité urbaine sur la qualité de l'air - Cas de la ville d'Oran -

Soutenue publiquement, le 11/02/2024, devant le jury composé de:

Mr. Djedid Abdelkader	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr. ALILI Abedessamad	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur de thèse
Mr. KASMI M.Amine	MCA	Université de Tlemcen	Co-Directeur de thèse
Mr. BOURDIM Sidi Mohammed Al Amine	Professeur	Centre universitaire de Maghnia	Examineur 1
Mr. HAMMA Walid	MCA	Université de Tlemcen	Examineur 2

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude envers Mr. ALILI et Mr. Kasmi pour leur inestimable contribution à la réalisation de cette thèse. Je suis honorée d'avoir eu la chance de travailler sous leur tutelle et je suis profondément reconnaissante pour l'environnement de travail stimulant, leur patience et leur ouverture d'esprit. Leur expertise, leur dévouement et leur mentorat ont été des piliers essentiels de ce projet de recherche.

Je souhaite également remercier chaleureusement les membres de mon jury, pour leur temps, leur expertise, ainsi que pour leur contribution essentielle à la validation de mon travail. Leurs évaluations ont été une étape cruciale de mon parcours académique, et je suis profondément reconnaissante de leur participation à cette réalisation.

DEDICACES

En dédiant ces mots , je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers les personnes qui ont fait de ce voyage académique une réalité enrichissante.

À mon mari,

Pour ta patience infinie, ton soutien inébranlable, cette thèse est autant la tienne que la mienne. Merci pour être une source infinie de soutien tout au long de ce chemin académique.

À mon fils bien-aimé "Khalil",

Que cette thèse soit un témoignage de l'importance de la persévérance, de l'apprentissage et de la poursuite des rêves. Merci de m'avoir inspiré à être la meilleure version de moi-même, tout en jonglant avec les rôles de mère et de chercheuse.

À mes chers parents et mes frères,

Votre soutien indéfectible, votre foi en moi et votre encouragement constant ont été les fondations sur lesquelles repose cette réalisation.

À ma belle-famille,

Votre compréhension, votre patience et votre soutien m'ont permis de consacrer le temps nécessaire à cette thèse. Une spéciale dédicace à la sœur que Dieu ne m'a pas donnée, merci pour ton soutien inestimable.

RÉSUMÉ

Dans la littérature, il existe un consensus commun que la forme urbaine compacte est le modèle idéal pour une ville durable favorable à l'environnement et donc à la santé des habitants. En effet, comparé à l'étalement urbain, la compacité peut améliorer la durabilité grâce à plusieurs facteurs, notamment : la réduction de la consommation des sols et de l'énergie, la réduction des déplacements motorisés en favorisant la proximité et l'accessibilité et donc la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la mixité fonctionnelle et donc la diversité sociale, l'augmentation de l'activité physique en favorisant les déplacements actifs et donc une moindre dépendance à la voiture. Cependant, la ville compacte fait aussi l'objet de nombreuses controverses scientifiques qui peuvent également affecter la santé des habitants par : le surpeuplement, le manque d'espaces verts qui peut réduire les possibilités d'activités favorables à la santé telles que l'activité physique en plein air et les loisirs qui réduisent le stress, une forte exposition au bruit et à la pollution atmosphérique.

L'objectif de cette thèse est d'examiner l'effet de la compacité urbaine sur la qualité de l'air. Nous faisons l'hypothèse que " La forme urbaine affecte la qualité de l'air, ce qui constitue un facteur de risque pour la santé des habitants". Nous testons cette hypothèse sur la ville d'Oran en se basant sur l'approche de l'analyse quantitative de son tissu urbain par l'utilisation des indicateurs paysagers à travers l'application du processus de télédétection et d'utilisation des outils SIG pour convertir les données satellitaires en image raster afin de pouvoir calculer lesdits indicateurs. Cette méthodologie nous permet d'identifier le degré de compacité de chaque zone d'Oran. Par la suite, nous superposons le résultat du calcul sur la donnée de la qualité de l'air qui indique la concentration du polluant de l'oxyde d'azote (NOx).

Le résultat de cette étude montre que les zones les plus compactes sont associées à une forte concentration de polluants atmosphériques qui dépasse le seuil des recommandations de l'OMS sur la qualité de l'air ce qui a des effets directs sur la santé respiratoire des habitants.

Mots-clés

Compacité urbaine, qualité de l'air, concentration en NOx, santé des habitants, analyse quantitative, indicateurs paysagers, télédétection.

ملخص

في البحث العلمي، هناك إجماع مشترك على أن الشكل الحضري المدمج هو النموذج المثالي لمدينة مستدامة صديقة للبيئة وبالتالي لصحة السكان. في الواقع، بالمقارنة مع الزحف العمراني، يمكن للاكتناز أن يحسن الاستدامة بفضل عدة عوامل، أبرزها: الحد من استهلاك الأراضي والطاقة، والحد من السفر الآلي من خلال تعزيز القرب وإمكانية الوصول وبالتالي الحد من انبعاثات غازات الدفيئة، وتحسين التنوع الوظيفي وبالتالي التنوع الاجتماعي، وزيادة النشاط البدني من خلال تعزيز السفر النشط وبالتالي تقليل الاعتماد على السيارة. ومع ذلك، فإن المدينة المدمجة هي أيضاً موضوع العديد من الخلافات العلمية التي يمكن أن تؤثر أيضاً على صحة السكان من خلال: الاكتظاظ، ونقص المساحات الخضراء التي يمكن أن تقلل من إمكانيات الأنشطة المعززة للصحة مثل الأنشطة البدنية والترفيهية في الهواء الطلق التي تقلل من التوتر، وارتفاع ضغط الدم. التعرض للضوضاء وتلوث الهواء

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير الاكتناز الحضري على جودة الهواء. نحن نفترض أن "الشكل الحضري يؤثر على جودة الهواء، مما يشكل عامل خطر على صحة السكان". قمنا باختبار هذه الفرضية على مدينة وهران اعتماداً على منهج التحليل الكمي لنسيجها الحضري من خلال استخدام مؤشرات المناظر الطبيعية من خلال تطبيق عملية الاستشعار عن بعد واستخدام أدوات نظم المعلومات الجغرافية لتحويل البيانات الفضائية إلى صورة نقطية في من أجل حساب المؤشرات المذكورة. نتيج لنا هذه المنهجية التعرف على درجة الاكتناز لكل منطقة من وهران. وبعد (NOx) ذلك، قمنا بتركيب نتيجة الحساب على بيانات جودة الهواء التي تشير إلى تركيز أكسيد النيتروجين الملوث

تظهر نتيجة هذه الدراسة أن المناطق الأكثر اكتظاظاً ترتبط بتركيزات عالية من ملوثات الغلاف الجوي تتجاوز عتبة توصيات منظمة الصحة العالمية بشأن جودة الهواء، مما له آثار مباشرة على صحة الجهاز التنفسي للسكان.

الكلمات المفتاحية

الاكتناز الحضري، جودة الهواء، تركيز أكاسيد النيتروجين، صحة السكان، التحليل الكمي، مؤشرات المناظر الطبيعية، الاستشعار عن بعد.

ABSTRACT

In the literature, there is a common consensus that the compact urban form is the ideal model for a sustainable city that is favourable to the environment and therefore to the health of its inhabitants. Indeed, compared with urban sprawl, compactness can improve sustainability through a number of factors, including: reduced land and energy consumption; reduced motorised travel by encouraging proximity and accessibility, and therefore reduced greenhouse gas emissions; improved functional mix and therefore social diversity; increased physical activity by encouraging active travel and therefore less dependence on the car. However, the compact city is also the subject of a great deal of scientific controversy, and can also affect the health of its inhabitants through: overcrowding, a lack of green spaces that can reduce opportunities for health-promoting activities such as outdoor physical activity and stress-reducing leisure pursuits, and high levels of exposure to noise and air pollution.

The aim of this thesis is to examine the effect of urban compactness on air quality. We hypothesise that "urban form affects air quality, which constitutes a risk factor for the health of inhabitants". We are testing this hypothesis on the city of Oran, based on the approach of quantitative analysis of its urban fabric using landscape indicators through the application of the remote sensing process and the use of GIS tools to convert satellite data into raster images in order to calculate the said indicators. This methodology enables us to identify the degree of compactness of each area of Oran. The result of the calculation is then superimposed on the air quality data, which indicates the concentration of the pollutant nitrogen oxide (NO_x).

The results of this study show that the most compact areas are associated with high concentrations of atmospheric pollutants that exceed the threshold of WHO air quality recommendations, with direct effects on the respiratory health of residents.

Keywords

Urban compactness, air quality, NO_x concentration, health of inhabitants, quantitative analysis, landscape indicators, remote sensing.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIERE PARTIE : ELABORATION DU CADRE THEORIQUE : CONCEPTS ET OUTILS	13
Introduction de la première partie	14
Chapitre I : Urbanisme et santé : petits pats, grands changements	15
Chapitre II: Le concept de la ville compacte depuis son origine jusqu'à aujourd'hui	35
Chapitre III: Polluants atmosphériques et qualité de l'air en milieu urbain.....	68
Conclusion de la partie I.....	88
DEUXIEME PARTIE : La ville d'Oran, compacité urbaine et qualité de l'air	89
Introduction de la deuxième partie.....	90
Chapitre I: Evolution urbaine d'Oran, héritage multiple et influences épidémiologiques	91
Chapitre II: Les SIG comme outil incontournable à l'analyse de la compacité urbaine	113
Chapitre III:.....	175
Résultat et discussion	175
Conclusion de la deuxième partie	190
Conclusion générale	191
Table des matières.....	219

Index des sigles et acronymes

ONU	Organisation des Nations Unies
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ODD	Les Objectifs du Développement Durable
MNT	Maladies Non Transmissibles
SIG	Systèmes d'Information Géographique
GPS	Global Positioning System
E	champs électrique
M	champs magnétique
UV	l'UltraViolet
NIR	NearInfrared
IR	l'Infra-Rouge
HRS	Haute Résolution Spatiale
THRS	Très Haute Résolution Spatiale
RVB	Rouge Vert Bleu
IP	indices paysagers
SHAPE-SI	Indice de forme
LSI	Indice de forme du paysage
ED	densité de lisières
CERCLE	L'indice du cercle circonscrit
PD	Densité des patchs
LPI	L'indice du plus grand patch
GYRATE	Rayon de giration
AI	L'indice d'agrégation
SIEI	L'indice d'équitabilité de Simpson
SHDI	L'indice de diversité de Shannon
USGS	United States Geological Survey
SWIR	Short-WaveInfrared
MNS	les modèles numériques de surface
SCP	Semi-Automatic Classification Plugin
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
UFS	L'urbanisme favorable à la santé
EIS	L'évaluation d'impact sur la santé
HIA	Health Impact Assessment

COS	Coefficient d'Occupation du Sol
CES	SCoefficient d'Emprise au sol
TOD	Transit-orienteddevelopment

Index des figures

Figure 1: Mandala de la santé (Hancock & Perkins, 1985).....	22
Figure 2: les déterminants de santé et du bien-être à travers le prisme de l'aménagement du territoire- <i>Healthmap for urbanplanners</i>	28
Figure 3 : Une même densité avec des formes urbaines différentes..	40
Figure 4 : Carte d'intensité urbaine du territoire de Puy-de-Dôme, France.	42
Figure 5: Attestation de demande du devis des données LIDAR.	63
Figure 6: Pourcentage de la population urbaine exposée à des concentrations de polluants atmosphériques supérieures aux lignes directrices de l'OMS en 2020.....	72
Figure 7: les molécules des oxydes d'azote.	76
Figure 8: représentation des pathologies associées à la pénétration du NOx dans l'organisme	79
Figure 9: . Biotransformation des oxydes d'azote dans l'organisme.....	80
Figure 10: Les seuils de référence des recommandations de l'OMS concernant directrices mondiales relatives à la qualité de l'air	85
Figure 11: Les différentes techniques de mesure de la qualité de l'air.	89
Figure 12: Représentation schématique de l'implantation de la vieille ville d'Oran	96
Figure 13: Oran durant la période Espagnole	97
Figure 14: Carte du vieil Oran (BNF)	98
Figure 15: vieille casbah, la Blanca, quartier israélite et quartier de la marine à Oran	98
Figure 16: Carte représentant l'évolution historique de la ville d'Oran.....	101
Figure 17: Carte schématique de l'évolution urbaine de la ville d'Oran selon les différentes phases	104

Figure 18: Les données sur la qualité de l'air à Oran.	111
Figure 19: Graphique synthétisant le processus de télédétection.....	121
Figure 20: Différence entre la télédétection passive et active.	122
Figure 21: Les composantes d'une onde électromagnétique.	123
Figure 22: La longueur d'onde et la fréquence d'une onde électromagnétique.....	124
Figure 23 : les domaines du spectre électromagnétique	124
Figure 24 : Fréquences et longueurs d'ondes des couleurs.	125
Figure 25 : la grandeur de réflectance..	126
Figure 26 : Schématisation graphique représentant la signature spectrale de l'eau, la végétation et le sol nu..	127
Figure 27 : Les 4 types de résolution spatiale avec des exemples de capteurs.	129
Figure 28 : image illustrant différents capteurs avec différentes résolution spatiales...	129
Figure 29 : les bandes spectrales de l'image satellitaire.	130
Figure 30 : le graphique gauche représente un capteur à 4 bandes couvrant. Sur le second graphique, plusieurs bandes sont enregistrées.....	131
Figure 31 : Composition colorée vraies couleurs.....	132
Figure 32 : Composition colorée fausses couleurs.....	132
Figure 33 : Classification d'une image spatiale (à gauche : l'image satellite, à droite : le résultat de classification)..	134
Figure 34 : A gauche : Image numérique comportant les valeurs de réflectance. A droite : image classifiée obtenue après le regroupement des pixels.....	134
Figure 35: L'espace caractéristique représentant graphiquement toutes les valeurs des pixels de 2 bandes spectrales.	135
Figure 36 : Le processus de la classification numérique supervisée de l'image.....	136

Figure 37 : Le principe du classificateur à distance minimale.	138
Figure 38 : Représentation simplifiée (unidimensionnelle) de la classification par maximum de vraisemblance avec deux classes	139
Figure 39 : Représentation bidimensionnelle de la classification par maximum de vraisemblance avec deux bandes et trois classes.	139
Figure 40 : dans la classification non supervisée, les groupes de pixels sont créés sur base de leur similarité.	140
Figure 41 : Frise chronologique décrivant le développement des approches de classification des images.....	142
Figure 42: la première illustration représente une image satellitaire, la deuxième représente une image segmentée. La troisième illustration est une image classifiée.....	142
Figure 43 : Les deux modes des données géographiques :en haut les images en mode vecteur, en bas les images en mode raster	145
Figure 44 : L'interface d'utilisateur de l'outil FRAGSTATS	146
Figure 45: L'utilisation du portail de données géospatiales USGS Earth Explorer.....	158
Figure 46 :Représentation des positions des bandes spectrales du satellite Sentinel-2.	160
Figure 47 : Le fichier des données Sentinel-2	162
Figure 48 : La description du fichier des données Sentinel-2 acquises sur la région d'Oran.....	162
Figure 49 : La chaîne de production et les étapes du traitement systématique des images Sentinel-2	163
Figure 50 : L'interface utilisateur du plugin SCP pour QGIS.	165
Figure 51: Le processus de la phase du prétraitement de la classification des données satellitaires.	169
Figure 52 : Résultat de la classification avant la phase du post-traitement.....	170

Figure 53: Evaluation de la distance spectrale des différentes classes créées et rectification des signatures spectrales similaires.....	171
Figure 54 : Résultat final de la classification.....	172
Figure 55 : Matériel utilisés pour le calcul des indices paysagers de l'image Raster sur FRAGSTATS.....	174
Figure 56: Délimitation de la ville d'Oran en zone de POS.....	175
Figure 57 : Délimitation des 18 zones d'étude.	176
Figure 58 : Les histogrammes de chaque indice paysager calculé sur FRAGSTATS pour chacune des 18 zones d'études.....	191

Index des tableaux

Tableau 1 : Les cibles de l'ODD11-villes et communautés durables, et l'ODD3-bonne santé et bien-être en relation avec l'environnement urbain.....	30
Tableau 2 : Référentiel sur les objectifs visés pour un UFS pour les 15 Déterminants de santé.....	35
Tableau 3: Contribution de la ville compacte à la durabilité urbaine	52
Tableau 4: Les indicateurs pour l'évaluation de la performance de la compacité urbaine	56
Tableau 5: estimation des flux de véhicules en veh.Km.h-1	112
Tableau 6: Densité d'émission de NOx par habitant par an à Oran	112
Tableau 7: Les valeurs des indicateurs de densité urbaine pour chacune des 18 zones	113
Tableau 8: Nombre de mortalité respiratoire dans les zones avec une concentration en NOx supérieure à 40 ug/m ³	115
Tableau 9 : Description détaillée des indices paysagers utilisés dans l'analyse de la compacité urbaine de la ville d'Oran.....	156
Tableau 10 : Caractéristiques des bandes spectrales de Sentinel-2.....	161
Tableau 11 : Caractéristiques de chacune des 4 unités centrales utilisées.	174
Tableau 12 : Résultats des indices paysagers calculés sur le logiciel FRAGSTATS des 18 zones d'étude de la ville d'Oran pour l'analyse de la compacité urbaine.	187
Tableau 13: Classification des zones en fonction du niveau de compacité selon les résultats du calcul des indices.	188
Tableau 14: Concentration de polluant atmosphérique dans chacune des 18 zones d'études	192

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Introduction

Selon les projections de l'ONU, la population urbaine mondiale devrait passer de 7.2 à 9.6 milliards d'ici 2050(ONU, 2015). Cela signifie que le taux de la population vivant en ville devrait avoisiner les 70%(Sodiq et al., 2019). D'autre part, les Nations Unies ont lancé un appel mondial à agir pour "sauver le monde" et se sont engagées sur 17 objectifs mondiaux appelés les Objectifs du Développement Durable (ODD) fixés dans l'agenda 2030(UN, 2018).

D'un autre côté, en 2016, l'Organisation mondiale de la Santé a déclaré que " la santé est l'un des indicateurs les plus efficaces pour la réussite du développement durable d'une ville."(OMS, 2017). Aujourd'hui il y a un consensus croissant sur le fait que l'environnement urbain exacerbe ou atténue les effets en matière de santé et de bien-être et qu'il est un déterminant important de la santé publique.

L'urbanisme n'étant pas seulement l'affaire des urbanistes, la santé publique n'est pas aussi seulement celle des médecins. Il ne s'agit pas seulement de fournir des services sanitaires à ceux qui sont malades, mais d'abord, nous devons réfléchir aux facteurs des risques qui les rendent malades, et par conséquent, il est vital de réfléchir aux conditions de vie y compris les conditions de l'environnement urbain. Il est à noter que de nombreux aspects de la planification urbaine dans le monde nuisent à la santé et au bien-être, de plusieurs manières, nous intégrons en profondeur des conditions insalubres aux établissements humains en raison de l'exposition au trafic, du bruit, de la pollution de l'air, de la ségrégation sociale, des îlots de chaleur, du manque d'espaces verts, de la faible activité physique et des modes de vie sédentaires(Sallis et al., 2016). Ces dernières années, les chercheurs s'intéressent particulièrement aux implications des caractéristiques de l'espace urbain pour déterminer la santé et le bien-être de la communauté. Hugh Barton -admis comme le leader international dans le domaine d'urbanisme, de santé et de durabilité- soutient l'idée que le premier but de l'urbanisme est la santé, le bien-être et la qualité de vie durable des habitants et insiste pour passer de la rhétorique de nombreuses politiques visant à promouvoir la santé et le bien-être en ville aux actions concrètes(Barton, 2009, 2016; Barton, Grant, & Guise, 2006; Barton, Thompson, Burgess, & Grant, 2015).

Depuis les années 2000, on commence à voir des signes positifs de changement, la réalisation

du mouvement Villes-santé¹ de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), soutient considérablement l'idée de «healthyurban planning»(Barton, Mitcham, & Tsourou, 2003).De nouvelles préoccupations sont apparues concernant l'impact potentiel de l'environnement urbain contemporain sur la santé de la population, en particulier l'impact de l'aménagement du territoire sur les modes de vie pour tenter de faire des villes une base pour des modes de vie sains, des villes résilientes et respectueuses du climat (W. W. H. Organization, 2019). Cependant, il existe encore peu de recherches explorant la capacité des politiques urbaines à répondre à l'aspiration de créer des villes saines et vivables et consolidant les principes clés nécessaires pour intégrer la santé dans les villes(Lowe et al., 2020). Par conséquent, des recherches scientifiques sont nécessaires pour explorer cette préoccupation.

En 2018, l'OMS a publié le profil de l'Algérie pour les maladies non transmissibles et a estimé que ces dernières sont à l'origine de 76% de tous les décès dont 39% sont liées aux affections respiratoires et cardiovasculaires chroniques(OMS, 2018). L'un des facteurs de risque causant ces morbidités est la pollution de l'air.

D'autre part, le bureau de l'OMS en Algérie en collaboration avec le ministère de la santé, de la population et de la réforme hospitalière ont développé un outil d'évaluation et d'intervention en matière de santé en milieu urbain appelé "urbanhealth" dont lequel c'est écrit "L'Algérie contemporaine vit une transition épidémiologique caractérisée par le double défi de faire face aux problèmes de santé liés à l'hygiène du milieu et aux maladies non transmissibles, ceci dans un contexte marqué par de profondes mutations démographiques, socio-économiques, culturelles et comportementales, particulièrement dans les centres urbains qui ont subi une forte expansion au cours des 50 dernières années. De ce fait, l'urbanisation constitue en Algérie, un déterminant majeur de santé publique. Il faut souligner que cette urbanisation a été rapide et anarchique dans les régions côtières et autour des grandes villes ce qui n'a pas été sans conséquences sur l'état sanitaire des populations[...] L'essor des centres urbains dans des conditions mal maîtrisées, sous l'effet d'une démographie galopante, soit propre à la ville elle-même, soit du fait de l'exode rural. Si bien que la ville, lieu d'épanouissement et de créativité, du fait d'une urbanisation rapide, a conduit à une dégradation de l'environnement du fait de carences dans la gestion urbaine. Elle est, alors

¹Le mouvement des Villes-Santé a été développé par l'OMS pour agir en faveur de la santé de tous, réduire les inégalités et améliorer la qualité de l'environnement(Barton & Tsourou, 2004c).

devenue synonyme d'insalubrité et d'inconfort. Le manque de l'hygiène, la prolifération de bidonvilles en périphéries des villes sont les déterminants de cet état de fait. Les retombées sur l'état sanitaire s'en est ressenti, les maladies liées à l'hygiène du milieu, au stress, sont le lot de ces populations''(l. m. d. l. s. OMS, de la population et de la réforme hospitalière 2019).

2. Problématique

Si l'on veut résumer quelque vingt ans de débat scientifique sur l'interaction entre la forme urbaine compacte et la santé des habitants, on peut établir que :

Dans la littérature, Le consensus commun est que les villes les plus compactes et plus denses sont plus durables et donc plus favorable à la santé(Burton, Jenks, & Williams, 2003; Dantzig, Dantzig, & Saaty, 1973; M. Jenks, E. Burton, & K. Williams, 1996; P. G. Newman & Kenworthy, 1989; L. Thomas & W. J. Cousins, 1996). La forme urbaine compacte est toujours considérée comme la solution pour une ville durable. En effet, comparé à l'étalement urbain, la compacité peut améliorer la durabilité grâce à plusieurs facteurs, notamment : la réduction de la consommation des sol et de l'énergie, la réduction des déplacement motorisés en favorisant la proximité et l'accessibilité et donc la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la mixité fonctionnelle et donc la diversité sociale, l'augmentation de l'activité physique en favorisant les déplacements actifs et donc une moindre dépendance à la voiture. En 1973, Dantzig et Saaty ont publié un ouvrage intitulé "*Compact City: A Plan for a LiveableUrbanEnvironment*" dans lequel ils ont développé le terme de la ville compacte(Dantzig et al., 1973) et ont écrit "*Le modèle de la ville compacte est la meilleure solution pour la conception d'une forme urbaine durable*". Motivés par la volonté de promouvoir une utilisation plus efficace des ressources, les auteurs ont tenté de s'opposer aux phénomènes de ville diffuse², de périurbanisation ou d'étalement urbain, signalant ainsi le gaspillage d'espace, la pollution générée par l'urbanisation, la forte consommation des ressources et d'énergie, l'atteinte au patrimoine naturel, à la biodiversité et à la qualité des paysages. Cette idée a reçu l'appui deJenks et al. et Thomas & Cousinsqui

² La ville diffuse est un concept caractérisant une évolution urbaine non planifiée, couvrant parfois des surfaces importantes, dans un stade extrême du mitage rural. Morphologiquement, l'habitat se superpose à la fonction agricole antérieure sans l'effacer complètementSelonGrosjean (2012),.

considèrent la ville des courtes distances comme le prototype idéal d'une vie urbaine plus vivable, plus sociable et plus interactive, une ville qui promeut la durabilité environnementale, sociale et globale en augmentant la densité de la zone bâtie et de la population résidentielle, en intensifiant les activités économiques, sociales et culturelles urbaines et en manipulant la taille, la forme et la structure urbaine(M. Jenks et al., 1996; L. Thomas & W. J. Cousins, 1996).

Dans l'ouvrage le plus cité sur l'urbanisme dépendant de la voiture “ *Cities and automobile dependence: An international sourcebook*”, Newman et Kenworthy prônent la forme urbaine compacte et la considèrent comme une forme urbaine optimale et durable(P. G. Newman & Kenworthy, 1989), mettant en avant le fait que ce modèle de ville favorise l'utilisation des transports publics, permet une bonne accessibilité aux services et réduit les distances parcourues et donc une moindre dépendance aux déplacements motorisés. L'automobile a accru les effets du changement climatique. Le transport motorisé est une cause majeure des émissions de gaz à effet de serre qui menacent la santé humaine. Les expositions et les pratiques liées au transport urbain sont associées à une charge importante de morbidité et de mortalité prématurée. C'est pour cette raison que la quête d'un développement urbain durable s'est traduite d'abord dans les politiques de transport en passant de “l'adaptation de la ville à l'automobile” des années 1960-1980 à un objectif de réduction de la place de l'automobile dans les déplacements urbains à partir des années 1990.

Le développement urbain durable s'est aussi traduit dans la quête d'une forme urbaine optimale ce qui a débouché, dans la littérature scientifique internationale, sur la formulation du modèle de la ville compacte(M. Jenks et al., 1996; L. Thomas & W. J. Cousins, 1996), très exploré dans la littérature des années 1990. Elle s'affiche donc bien comme l'antonyme de l'étalement urbain(Gordon & Richardson, 1997). Ce modèle a inspiré de nombreuses politiques d'urbanisme comme le mouvement de la “reconstruction de la ville sur elle-même”(Theys & Emelianoff, 2001) et le “nouvel urbanisme³” aux États-Unis (Ouellet, 2006).

Il a été démontré que la forme urbaine compacte favorise une meilleure santé urbaine

³Le nouvel urbanisme appelé aussi néo-urbanisme, est un courant urbanistique qui s'est développé depuis les années 1980 aux États-Unis, il reprend les principes traditionnels de l'urbanisme et de la morphologie urbaine tout en s'abstenant à reproduire des styles architecturaux traditionnels(Dupuis, 2009).

(Gleeson, 2012). Une forte compacité urbaine diminue les distances parcourues et produit une ville des courtes distances qui favorise le report vers les modes de déplacement alternatifs et doux comme la marche et le vélo ce qui non seulement participe à la réduction des émissions des gaz à effet de serre jugés très nocifs pour la santé, mais aussi augmente l'activité physique qui est très recommandée pour la bonne santé (Burton et al., 2003; Cervero & Kockelman, 1997; L. Thomas & W. J. Cousins, 1996). En outre, les zones les plus compactes et denses sont plus faciles à desservir par les transports en commun (Kenworthy & Laube, 1999).

Toutefois, bien que 69% des recherches dans la littérature font état d'effets positifs associés à la forme urbaine compacte et la plupart des politiques urbaines mènent sa promotion (Ahlfeldt, Pietrostefani, Schumann, & Matsumoto, 2018) et que la densification soit considérée comme une figure consensuelle de l'action publique urbaine pour un urbanisme favorable à la santé, la ville compacte fait aussi l'objet de nombreuses controverses scientifiques et ce sur différents aspects qui concernent son efficacité, son acceptabilité ou encore le modèle de qualité de vie et d'équité urbaine qu'elle sous-tend. Une forte densité urbaine ou compacité urbaine peut également affecter la santé des habitants par : le surpeuplement, le manque d'espaces verts qui peut réduire les possibilités d'activités favorables à la santé telles que l'activité physique en plein air et les loisirs qui réduisent le stress, une forte exposition au bruit et à la pollution atmosphérique, l'effet d'îlot de chaleur ainsi qu'une forte congestion urbaine et donc un niveau élevé de stress. Des niveaux élevés de compacité sont associés à de forts niveaux de congestion urbaine et nuisances sonores, ce qui n'est pas sans conséquence sur la santé. En effet, l'OMS pointe les trois principaux effets sanitaires associés aux bruits de l'environnement et qui sont : troubles du sommeil, problèmes cardio-vasculaires et gêne psychologique (WHO, 2018). Le postulat de son efficacité en matière d'effets sur la mobilité est contesté par de nombreux chercheurs parce que les variables socio-économiques ne sont pas pris en compte dans la plupart des recherches qui préconisent la ville compacte et dense alors qu'elles ont une influence considérable dans la détermination des schémas de mobilité (Nessi, 2010). De surcroît, Jean-Pierre Orfeuil et Danièle Soleyret ont observé un "effet barbecue"⁴ dans les zones les plus denses en

⁴ L'effet barbecue est énoncé par Jean-Pierre Orfeuil et Danièle Soleyret en 2002 qui ont démontré que les habitants des zones urbaines denses et ayant au quotidien un mode de vie avec une grande efficacité énergétique, seraient finalement plus énergivores en raison d'une mobilité occasionnelle ayant un fort impact. L'effet barbecue remet en question les vertus attribuées à la ville dense en matière de mobilité (Massot & Orfeuil, 2005).

démontrant que les habitants du centre-ville, qui manquent d'espaces verts, ont tendance à voyager plus loin et donc effectuer des déplacements à longues distances que ceux qui résident dans les espaces périphériques (Orfeuil & Soleyret, 2002).

La forme urbaine compacte qui implique la mixité fonctionnelle et qui est censée améliorer la mixité et l'équité sociale (Burton et al., 2003), est contestée par de nombreux chercheurs qui soulèvent la question de l'acceptabilité sociale de la densification (Dempsey, 2010) en pointant l'opposition fréquente des habitants des zones que l'on souhaite densifier. D'autres déplorent la détérioration du cadre de vie. En effet, une ville compacte risque de générer une réduction des espaces de vie, pouvant être considérée comme néfaste à la qualité de vie et ne correspondant pas aux attentes des habitants. Une compacité élevée avec un nombre important d'habitants dans un espace limité peut influencer sur le taux de morbidité et de mortalité en raison des multiples nuisances qu'elle génère : pollution de l'air, pollution sonore, pollution lumineuse, augmentation des embouteillages, perte d'espaces verts, surpopulation (Burton, 2000). De ce fait, cette dernière a pour conséquence de générer des effets négatifs sur le bien-être entraînant l'anxiété, le stress et l'exclusion sociale (Churchman, 1999). La compacité morphologique peut affecter négativement la perception de l'espace en raison des ombres, du manque d'espaces ouverts et peut donner une impression visuelle de manque de proportion (Hitchcock, 1994). La mixité de l'espace entraîne des activités bruyantes dans les zones résidentielles, ce qui augmente les niveaux de stress (World Health, 2012).

Par ailleurs, une autre partie de la littérature a examiné le rapport entre la forme urbaine compacte et la qualité de l'air mais avec des résultats contradictoires. Si la grande vertu de la ville compacte est la réduction des émissions de polluants en limitant la demande de déplacements et en facilitant les économies d'énergie, une pollution est tout de même émise et la compacité risque d'en limiter la dispersion, augmentant l'exposition des populations résidentes à la pollution atmosphérique. L'exposition des populations aux polluants fait de la qualité de l'air un enjeu majeur de la santé publique. La pollution de l'air est devenue une véritable menace de la santé urbaine en raison des maladies cardiovasculaires et respiratoires qu'elle génère (Holgate, 2022; Kelly & Fussell, 2015). Les émissions des véhicules sont progressivement devenues l'une des principales sources de pollution de l'air dans les zones urbaines (OECD, 2014b). Nombreuses études ont donc exploré le lien entre la forme urbaine et la qualité de l'air. Certains chercheurs ont plaidé en faveur d'une forme

urbaine compacte caractérisée par une forte densité, une utilisation mixte des sols et une meilleure accessibilité, en raison des courtes distances et une meilleure accessibilité aux transports en commun, réduisant ainsi le nombre de kilomètres parcourus par les véhicules (KPV) (Hoffmann, 2019; Venkatram & Schulte, 2018) et minimisant donc les émissions des gaz à effet de serre ainsi que la concentrations des polluants dans l'air. Toutefois, d'autres études ont montré que le développement compact peut entraîner une augmentation des sources de pollution, la congestion et des concentrations plus élevées de polluants atmosphériques, réduisant ainsi la qualité de l'air (Cárdenas Rodríguez, Dupont-Courtade, & Oueslati, 2016; Yuan, Huang, Shen, & Li, 2018). En outre, une forme urbaine compacte peut provoquer des effets d'îlot de chaleur urbain, et une température de l'air plus élevée ce qui favorise la formation d'O₃ (ozone) et du NO_x (l'oxyde d'azote), des gaz irritants qui, à fortes concentrations, peuvent pénétrer jusqu'aux voies respiratoires et causer de graves problèmes sanitaires(Ulpiani, 2021; Wang, Guo, & Han, 2021).

La plupart des études empiriques traitant l'impact de la forme urbaine compacte sur la qualité de l'air et donc sur la santé des habitants, ont utilisé de simples indicateurs de densité urbaine, comme la densité de population (Borck & Schrauth, 2021; Carozzi & Roth, 2023; Yang, Ding, & Tian, 2021), la densité de construction et le coefficient d'occupation des sols (B. Jia, Liu, & Ng, 2021; Yuan, Yan, & Shan, 2021), la densité du trafic routier (Sharmilaa & Ilango, 2022; Sterling, 2018), la disponibilité des espaces verts (Jansson, 2014; Rezaei & Millard-Ball, 2023), la concentration des activités humaines et la mixité fonctionnelle (Chiquetto et al., 2020; Pouri, Momeni, & Rahimi, 2020). Cependant, peu d'études dans la littérature ont abordé le rapport entre la compacité urbaine et les maladies respiratoires avec une prise en compte de la structure spatiale du tissu urbain.

Nous prenons la ville d'Oran comme cas d'étude car :d'une part, lors du 09ème congrès international de pneumologie de l'association oranaise de santé respiratoire (AOSR), le chef de service de pneumologie de l'établissement hospitalo-universitaire (EHU), Pr LELLOU Saleh, a déclaré que *''Environ 8% de la population à Oran souffre de problèmes respiratoires aigus[...] et 10 cas de crises sévères de troubles respiratoires sont accueillis quotidiennement dans le service de pneumologie en plus de 30 à 40 contrôles''*(AOSR, 2017). Cela signale l'urgence de la prise en compte de ce fardeau dans les recherches dans tous les domaines à l'aune des facteurs de risques causant cette morbidité, y compris le domaine de l'urbanisme.

D'autre part, Vu la situation géographique de la ville d'Oran qui est limitée au nord par la mer Méditerranée, à l'est par le massif de Murdjadjo et au sud-ouest par la grande sebkha, et en raison du développement urbain et démographique considérable qu'a connu la ville depuis l'Indépendance en 1962, bien que l'extension urbaine d'Oran s'est faite vers le sud, le sud-est et surtout l'est (Benammar & sadika, 2001), son tissu urbain existant déjà compact et régulier et conçu selon la logique de la géométrie euclidienne n'a lui aussi pas échappé à une densification due à la croissance rapide qu'a connue la ville (Dagorne Andrée, 1995) pour atteindre aujourd'hui plus de 8.050 ha urbanisés pour un million d'habitants (Kadri & Madani, 2015). Ainsi, les quartiers jadis appelés quartiers périphériques sont aujourd'hui rattachés à la ville avec laquelle ils forment un ensemble compact.

De ce fait, Le développement urbain accéléré s'est exercé sur les emprises foncières libres autour du centre colonial, et plus particulièrement sur les terres agricoles et les espaces naturels ce qui a eu pour corolaire une grande consommation de réserve foncière (Lakjâa, 2008). Un certain nombre d'instruments d'urbanisme et de plans directeurs ont été mis en œuvre en vue d'assurer la gestion, la régulation et le contrôle de cette évolution et ses effets spatiaux. Cependant, des contributions montrent l'échec des différentes politiques urbaines mobilisés à Oran et l'impuissance du dispositif juridique et organisationnel mis en place. , incapables d'assurer le contrôle de la croissance urbaine et un développement urbain intégré et durable (Bendraoua, 2005; Kadri & Madani, 2015).

En résumé, si l'historique de la croissance urbaine de la ville d'Oran nous révèle qu'il y a une densification de certaines zones, pourquoi alors autant de taux de morbidité respiratoire chez les résidents d'une ville compacte censée être, dans 69% des recherches dans la littérature (Ahlfeldt et al., 2018), durable et favorable à la qualité de l'air et à la santé humaine ? C'est autour de cet antagonisme que gravitent essentiellement nos interrogations qui confrontent de nombreuses controverses scientifiques. Ainsi, notre problématique s'exprime à travers le questionnement suivant :

- Le modèle de la ville compacte est-il un bénéfice ou un préjudice pour la qualité de l'air et donc pour la santé respiratoire de ses habitants ?
- Les zones les plus compactes de la ville d'Oran offrent-elles une meilleure qualité de l'air ?

3. Hypothèses de recherche

Partant de cette problématique, les hypothèses sont formulées comme suit :

Hypothèse N°1: La forme urbaine affecte la qualité de l'air, ce qui constitue un facteur de risque pour la santé des habitants.

Hypothèse N°2: Les zones les plus compactes de la ville d'Oran sont associées à une concentration élevée de polluants atmosphériques et donc à un taux élevé de morbidité respiratoire.

-Une compacité physique élevée de la configuration et la composition spatiales des éléments bâtis est associée à des impacts négatifs sur la qualité de l'air et une concentration élevée de polluants atmosphériques, ce qui a pour conséquence d'affecter la santé des habitants.

4. Objectifs de la recherche

- ❖ Amonceler un savoir en analysant la structure spatiale du tissu urbain de la ville d'Oran et en quantifiant sa composition et sa configuration spatiale à travers l'utilisation du processus de télédétection et des outils SIG.
- ❖ Identifier la compacité urbaine des différentes zones et les classer en catégories (zones à faible compacité, zones compactes et zones très compactes)
- ❖ Superposer et comparer les résultats de la compacité urbaine des différentes zones et la donnée sur la qualité de l'air (concentration en NO_x).
- ❖ Déterminer les zones avec une compacité urbaine favorable à la qualité de l'air et respectueuse des recommandations internationales de l'OMS.

5. Méthodologie de travail: plan de travail

La méthodologie de ce travail s'est basée sur l'approche hypothético-déductive; c'est à dire en partant des hypothèses de recherches que nous s'attachons à corroborer tout au long de l'étude. C'est dans cette optique que les objectifs sont déterminés. Pour réaliser ce travail, nous procédons à l'évaluation de la compacité urbaine en se basant sur l'approche des indicateurs paysagers et l'utilisation des outils SIG. Cette approche se fonde sur l'application du

processus de télédétection pour convertir les données satellitaires en images raster afin de pouvoir effectuer le calcul des indices paysagers sur le logiciel FRAGSTATS.

Nous appliquons ce processus en utilisant les outils SIG sur notre cas d'étude en commençant par l'acquisition des données satellitaires, puis en appliquant l'approche de la classification supervisée pour classer les données satellitaires en classe du bâti et en classe du non bâti. Nous obtenons une donnée en sortie qui est une image raster qui va servir comme une donnée d'entrée sur le logiciel FRAGSTATS pour le calcul des indicateurs paysagers. Par la suite, nous classons les zones selon le niveau de compacité en se basant sur le résultat du calcul des indicateurs. Enfin, nous comparons les différentes zones et nous superposons les données sur la qualité de l'air pour vérifier l'hypothèse de recherche qui est "Les zones les plus compactes de la ville d'Oran sont associées à une concentration élevée de polluants atmosphériques et donc à un taux élevé de morbidité respiratoire".

6. Structure de la thèse: plan de rédaction

La structure de la thèse se compose de deux parties distinctes, chacune contribuant à l'exploration approfondie de la problématique de recherche. Chaque partie est conçue pour apporter une compréhension exhaustive des concepts en relation avec la problématique.

La première partie examine les concepts théoriques liés à la problématique et les principaux fondements de la recherche. Elle est divisée en trois chapitres, chaque chapitre explorant un aspect spécifique de la relation entre la santé, l'urbanisme et la compacité urbaine. Cette partie explore le lien entre la santé et l'urbanisme et se propose de clarifier le concept d'un urbanisme favorable à la santé à travers une rétrospective historique sur l'intégration de la santé dans la planification urbaine tout en mettant en lumière l'importance du rôle de la forme urbaine dans la création des environnements et des cadres de vie sains et favorables à la santé. De ce fait, nous avons opté pour la forme urbaine compacte qui est toujours considéré comme un modèle pour un développement urbain durable et favorable à la santé. Le deuxième chapitre se propose de clarifier le concept de la compacité urbaine et explore ses différentes méthodes de calcul, ce chapitre finit avec une revue de littérature abordant les avantages et les inconvénients de la compacité urbaine et son lien avec la qualité de l'air et la santé des habitants. Le troisième chapitre aborde une description détaillée sur les polluants atmosphériques et la qualité de l'air en milieu urbain.

La deuxième partie de la thèse se concentre sur l'application des concepts et des méthodes développés dans la première partie à la ville d'Oran. Cette partie est divisée en trois chapitres pour explorer en détail le cas d'étude. Le premier chapitre est consacré à la compréhension de l'évolution du tissu urbain d'Oran et les influences des grandes épidémies sur ce dernier. Dans la suite du chapitre, nous exposons les données sur la qualité de l'air à Oran . Dans le deuxième chapitre, nous abordons l'évaluation de la compacité urbaine en se basant sur l'approche des indices paysagers et l'utilisation des outils SIG. Nous expliquons en détail les notions fondamentales sur le processus de télédétection spatiale et les différentes méthodes de la classification numérique d'image et exposons une explication détaillée de chacun des 10 indicateurs paysagers. Par la suite, nous passons à l'application de ce processus sur notre cas d'étude en expliquant pas à pas toute les démarches. Le dernier chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus à l'issue de l'étude quantitative du tissu urbain de la ville d'Oran pour l'évaluation de la compacité urbaine de chacune des 18 zones à l'aide de l'utilisation des indices en y superposant les données sur la qualité de l'air (concentration en NOx), nous finissons par comparer ces deux données pour chaque zone.

La conclusion générale rassemble les principaux résultats de la recherche et vérifie si les objectifs fixés ont été atteints. Elle réitère les hypothèses de recherche et souligne les implications de la recherche pour la planification urbaine durable.

**PREMIERE PARTIE : ELABORATION DU CADRE THEORIQUE :
CONCEPTS ET OUTILS**

Introduction de la première partie

Dans cette partie, nous expliquons d'abord le lien entre l'urbanisme et la santé en présentant une rétrospective historique sur l'intégration de la santé dans la planification urbaine, en mettant en évidence le lien entre la santé et la ville durable et en exposant les mouvements phares qui ont abordé la santé dans l'aménagement urbain comme l'approche de la Ville-Santé de l'OMS, le mouvement de l'Urbanisme Favorable à la Santé (UFS) ou encore l'outil d'Evaluation d'Impact sur la Santé (EIS). Au fil du temps et dans des contextes de détérioration de la santé humaine en milieu urbain, de nombreuses recherches et travaux ont été menés explorant les relations entre l'urbanisme et la santé qui devient aujourd'hui un défi. Nous soulignons l'importance du rôle de la forme urbaine dans la création des environnements et des cadres de vie sains et favorables à la santé.

Tout au long de cette partie, nous nous attachons à élucider le concept de la ville compacte et à bien comprendre ses caractéristiques. Il est judicieux de comprendre d'abord la différence entre densité, compacité et intensité avant de passer à l'historique de l'évolution de l'approche de compacité urbaine. En s'appuyant sur la littérature, nous expliquons comment la ville compacte peut contribuer à améliorer la durabilité urbaine et soulignons le besoin de la mise en œuvre de l'approche dans le contexte urbain actuel. Ensuite, nous exposons les différentes méthodes de calcul de la compacité urbaine. Une revue de littérature abordant les avantages et les inconvénients de la compacité urbaine et son lien avec la qualité de l'air et la santé des habitants est une partie inéluctable dans notre recherche.

Il est important de prendre en compte la qualité de l'air dans la planification urbaine. car il a été démontré que la plupart des habitants de la ville sont exposés à des concentrations de polluants atmosphériques supérieures à la valeur moyenne annuelle préconisée par l'OMS. De ce fait, nous exposons les différents polluants atmosphériques et leurs effets sur l'environnement et la santé humaine. Nous expliquons en détail l'oxyde d'azote NOx que nous abordons dans notre étude. Nous présentons également les lignes directrices mondiales de

l'OMS relatives à la qualité de l'air, les stratégies politiques de réduction de la pollution atmosphérique ainsi que les différents dispositifs de mesure de la qualité de l'air.

Chapitre I : Urbanisme et santé : petits pats, grands changements

Introduction

En l'heure d'une forte croissance urbaine et de nombreux problèmes que connaissent les villes, la santé et le bien-être de la population urbaine sont de plus en plus considérés comme un défi. Au fil du temps et dans des contextes de détérioration de la santé humaine en milieu urbain, de nombreuses recherches et travaux ont été menés explorant les relations entre l'urbanisme et la santé. Ce chapitre présente un aperçu sur l'historique de l'intégration de la santé dans les recherches urbaines depuis l'antiquité jusqu'à nos jours en passant par les événements marquants des XIIe et XXe siècles, ainsi que les mouvements, les démarches et les actions qui ont été menés pour tenter d'améliorer et de remédier aux problèmes de santé en milieu urbain. Ce chapitre souligne l'importance du rôle de l'urbanisme dans la création des environnements et des cadres de vie sains et favorables à la santé.

1. Intégration de la santé dans la planification urbaine : une histoire

La rétrospective historique est organisée selon les phases clés traçant l'histoire de l'intégration de la santé dans la planification urbaine, illustrant ainsi la réunion des efforts conjoints de ces deux disciplines pour l'amélioration des conditions de vie dans des villes polluées et insalubres.

1.1 Planification urbaine et santé : des rayons de lumière depuis l'antiquité

Bien que l'urbanisme basé sur la santé soit en général un nouveau domaine d'études, ce sujet remonte dans le temps. La forme urbaine, loin d'être étrangère aux questions sanitaires, entretient à travers l'histoire un lien étroit avec la santé publique. Déjà depuis l'antiquité, les fondateurs des villes étaient conscients des enjeux sanitaires. D'ailleurs, l'implantation des

viles dépendait de la disponibilité de bonnes ressources en eau à proximité et d'une bonne orientation par rapport au soleil et aux vents.

Hippodamos de Milet⁵, considéré comme le père de la planification urbaine, est le pionnier de l'idée de l'utilisation de la grille orthogonale pour le tracé des rues des villes. Il a beaucoup critiqué les rues sinueuses et étroites regroupées autour des équipements religieux et civiques qu'il considérait inefficaces et problématiques pour le bien-être des habitants. Son plan hippodamien dit aussi milésien, en damier, en échiquier, quadrillé, ou orthogonal beaucoup influencé la forme urbaine grecque et romaine. Plus tard, ses collègues ont mis la relation entre l'environnement et la santé plus explicite. Dans son traité *Des Airs, des eaux et des lieux*, Hippocrate⁶ a établi une corrélation entre la typo-morphologie urbaine et la santé, entre la configuration de la ville et son habitabilité. Le paradigme hippocratique a été renforcé par les récits de Platon, Aristote et plus tard par Vitruve qui accordaient tous une importance particulière à la salubrité des villes.

1.2 Les leçons tirées des grandes épidémies du XIX^e siècle : remodelage des villes

Les grandes épidémies du XIX^e siècle à savoir le choléra, la tuberculose et la peste, ont modelé nos villes et ont fortement contribué à structurer la forme urbaine. De surcroît, Ces épidémies ont débouché sur des politiques de santé publique, d'urbanisme et d'environnement. Le courant hygiéniste a justement fait son apparition pour juguler ces crises sanitaires. Basé sur l'air, la lumière et le soleil, ce courant remet totalement en cause la forme traditionnelle des villes avec ses ilots insalubres et tuberculeux. En 1853, les transformations urbaines de Paris sont essentiellement dues au choléra. Haussmann a fait l'objet de créer de nouvelles formes urbaines mieux adaptées aux contraintes de l'hygiène publique, notamment par la création de grandes percées, un système d'espaces verts et un réseau d'égouts et d'adduction d'eau.

⁵Hippodamos de Milet est un géomètre et ingénieur du ve siècle av. J.-C., qui fut aussi architecte urbaniste, physicien, mathématicien, météorologiste et philosophe pythagoricien("Hippodamos,").

⁶ Hippocrate est un médecin et philosophe de la Grèce antique. Ses œuvres nous sont connues par le biais d'Aristote et de médecins Arabes et Byzantins. Ayant joué un rôle extrêmement important dans la médecine, la déontologie et l'éthique médicales. Il est considéré comme le père de la médecine en Occident.

Ces préoccupations ont fait écho au travers d'épisodes marqués par des projets idéaux où le rapport forme urbaine/santé se pose avec acuité, comme celui du Familistère⁷ d'André Godin soucieux des conditions d'hygiène des habitants(Godin, 1874), ou celui de Cerda pour le plan de "médicalisation"⁸ de Barcelone (1860)(Cerdà, 1860), ou celui de Benjamin Ward Richardson avec sa ville-clinique décrite dans son ouvrage *Hygeia. A CityofHealth* (1875)(Richardson, 1876) ou il démontre le modèle d'une ville saine , ou encore celui de la cité jardin⁹ d'Ebenezer Howard (1898)(Howard, 1946).Ces préoccupations se manifestaient principalement par la création des conditions de vie saine- logement sain, accès aux espaces verts, assainissement, plan géométrique pour ventiler au mieux les voies de circulation, plantation d'arbres le long des boulevards, jardin autour de chaque bâtiment, tramway souterrain, toits-terrasses jardinés...

L'union entre la planification urbaine et la santé publique au XIXe siècle a ainsi été impulsée à différents niveaux et en divers endroits par des réformateurs des domaines de la médecine et de l'environnement bâti.

1.3 Le début du XXe siècle et la période d'entre-deux-guerres: des logements et des environnements sains

Au début du XXe siècle, les préoccupations de la santé publique ont renforcé la naissance d'un mouvement de planification urbaine organisée et ont devenues un élément pivot de conférences internationales et interdisciplinaires gérées par des architectes et planificateurs pionniers comme Raymond Unwin et Herbert Baker (Harcourt & JERSEY) soulignant la nécessité de faire travailler ensemble ces deux domaines pour l'amélioration des

⁷Le familistère, situé à Guise, est un établissement où plusieurs familles vivent en communauté et trouvent dans des magasins coopératifs ce qui leur est nécessaire. Créé par l'industriel André Godin pour l'hébergement de ses ouvriers soucieux de l'hygiène et la santé physique, le confort, le bien-être matériel individuel et collectif.

⁸Le plan Cerdà, proposé en 1860 par [IldefonsCerdà](#), est un plan d'extension urbaine de la ville de [Barcelone](#) . C'est un [plan hippodamien](#) avec des angles coupé par un [chanfrein](#) à 45 degrés de chaque bloc pour permettre une meilleure visibilité et une structure quadrangulaire, [régulière](#) et ouverte. Il s'agit d'un damier continu de blocs carrés de 113,3 mètres, doté de rues de 20, 30 et 60 mètres de large. Cerdà donnait une grande importance à l'hygiène et la lumière solaire, en orientant les voies sur un axe parallèle ou perpendiculaire à la mer,eten orientant les ilots de façon à ce que tous les côtés puissent recevoir de la lumière solaire naturelle au cours de la journée.

⁹ La cité jardin est un concept théorisé par l'urbaniste britannique Ebenezer Howard en 1898, dans son livre *To-morrow : A peacefulpath to real reform 1898*, pour s'opposer à la ville industrielle polluée et dont on ne contrôle plus le développement et s'opposer également à la campagne jugée trop loin des villes.

conditions de vie jugées insalubres. Cette relation s'est focalisée sur l'amélioration de la qualité du logement et celle des rues (leur taille, leurs dimensions, et leur orientation), produisant ainsi des guides détaillés sur la conception des logements. Les premières règles de planification urbaine ont tenté aussi de remédier et de minimiser l'exposition aux maladies infectieuses à travers la promotion d'un comportement favorable à la santé par la création des espaces publics pour l'activité physique et sociale (Kochtitzky et al., 2006).

Durant la période d'entre-deux-guerres, la collaboration entre la planification et la santé publique a changé d'échelle. Avec le retour de la prospérité, la dotation en infrastructures a été portée sur le devant de la scène. Cela a été marqué par l'apogée du mouvement de la ville fonctionnelle en éliminant les conditions insalubres à travers l'application du zoning, qui non seulement tentait de minimiser les objectifs esthétiques, mais aussi de donner une nouvelle vision à une planification urbaine efficace encouragée par des congrès internationaux en urbanisme et hygiène (Halbwachs & Sion, 1923). Certes, ce modèle d'organisation spatiale *'a réussi de limiter en partie les risques liés à la santé causés par une utilisation plurifonctionnelle inappropriée des espaces'* (Kochtitzky et al., 2006), cependant, cette forme semait aussi de futurs problèmes de santé associés aux villes dispersées et dépendantes de la voiture. Durant les années 1920, la relation entre la planification urbaine et la santé est restée limitée mais lorsque les années folles ont cédé la place à la grande dépression du début des années 1930, il y a eu des signes d'un regain d'intérêt pour un engagement explicite envers la santé communautaire. En 1938, un rapport intitulée *'les principes fondamentaux d'un logement sain'* a été publié (BRITTEN et al.). Faisant autorité, ce dernier énonçait 30 principes de base d'un logement sain précisant la mise à disposition des espaces ouverts et l'accessibilité aux services. Ce rapport fournissant un guide détaillé sur la conception des environnements urbains favorables à la santé physique et mentale.

1.4 La période d'après-guerre, traiter des espaces ou des patients ?

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, la préoccupation hygiénique est devenue secondaire et la qualité de l'environnement urbain basé sur une approche sanitaire préventive semble être abandonnée au détriment d'autres fins entraînant dans la deuxième moitié du XX^e siècle une rupture totale entre l'urbanisme et la santé. Les planificateurs des espaces urbains était en grande partie préoccupés par la reconstruction d'après-guerre pour répondre aux problèmes sociaux, économiques et environnementaux mais pas de santé (Perdue, Stone,

&Gostin, 2003). Cette période est marquée par une forte croissance urbaine et d'étalement urbain anticipant ainsi les éventuelles conséquences sanitaires. Les professionnels de la santé publique, quant à eux, ont été préoccupés par la médicalisation plutôt que par les déterminants sociaux et environnementaux de la santé (Corburn, 2004). La planification et la santé publique poursuivaient donc deux agendas différents. La perte d'une collaboration étroite entre les professionnels de l'urbanisme et de la santé publique qui a caractérisé l'après-Seconde Guerre mondiale a limité la conception et la mise en œuvre d'interventions et de politiques efficaces qui pourraient se traduire par une amélioration de la santé et cela perdure à ce jour.

L'urbanisme moderne du XXe siècle, héritier des progrès scientifiques et techniques de la révolution industrielle mais également des grandes épidémies du XIXe siècle semble avoir entraîné une véritable transition épidémiologique¹⁰. Si l'urbanisme était né pour endiguer les maladies transmissibles des vagues épidémiques infectieuses meurtrières, il provoque aujourd'hui les maladies non transmissibles directement liées à nos modes de vies et notre environnement urbain (cancers, maladies cardiovasculaires, respiratoires, asthme, allergies, diabète, obésité...) et nous nous sommes donc retrouvés à nouveau dans d'autres problèmes- qu'ils soient personnels en termes de modes de vie malsains, d'obésité et de maladie mentale, urbains en termes de pollution de l'air, de congestion, d'inégalités spatiales, ou globale en termes de changement climatique et de déclin de la biodiversité.

Bien que la santé ait été marginalisée dans la planification urbaine des années 1950 et 1960, la recherche sur les questions environnementales, telles que la pollution de l'air et de l'eau s'est intensifiée en raison de l'identification de nouveaux problèmes liés à la santé. L'OMS a commencé à s'intéresser activement à ces problèmes liés à l'urbanisation (W. H. Organization, 1965). Cette période a également vu un regain d'intérêt pour la relation entre les villes et la santé mentale, des recherches sur les dimensions socio-psychologiques de l'urbanisme ont été entreprises, observant que la qualité du logement, la densité d'occupation du sol, les conditions de circulation, les distances de déplacement et les installations de loisirs avaient tous des conséquences importantes sur la santé mentale (Strotzka, 1957). Dès les années 1960, l'OMS a appelé à raviver les liens entre la planification et la santé à travers une coopération et coordination entre les planificateurs et les professionnels de la santé.

¹⁰La transition épidémiologique est le passage d'un profil épidémiologique des maladies infectieuses à un profil des maladies chroniques, dégénératives et mentales.

L'organisation a rédigé des directives sur les aspects de l'hygiène environnementale (W. H. Organization, 1965). Cependant, ces initiatives ont eu peu d'impact sur la réunification de la planification et de la santé. Durant les années 1970, la relation entre les deux professions s'est contentée sur la planification des services de santé et médicaux plutôt que le rôle de l'environnement bâti dans le changement du comportement et le choix d'un mode de vie sain.

1.5 Fin du XX^e siècle et début du XXI^e siècle : revivification du lien historique entre l'urbanisme et la santé publique

Durant les dernières décennies du XX^e siècle, l'OMS a redéfini le sens même de la santé qui ne se résume pas à l'absence de maladie'' *La santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie*''(de la Santé, 1946).Plusieurs évènements ont marqué la contribution au rétablissement des liens historiques entre la planification urbaine et la santé publique. Le Nouvel Urbanisme¹¹ en est un exemple. Ce mouvement qui tentait de ré-humaniser l'espace urbain, accordait une place particulière au piéton et au cadre de vie, encourageant ainsi à aborder la santé à l'échelle de la planification urbaine (Katz, 1994).De même, le concept de la croissance intelligente visant à limiter l'étalement de zones à faible densité et dépendantes de l'automobile, prônait des alternatives saines et durable (Daniels, 2001). Une représentation fondamentale de la manière dont la santé humaine est à la fois influencée par la biologie humaine, le comportement individuel, l'environnement psychosocial, l'environnement physique et l'environnement nature la été conceptualisé par Hancock et Perkins dans leur ''Mandala de la santé'' Figure 1 (Hancock & Perkins, 1985). Deux autres mouvements ont fortement influencé les liens entre la santé et l'urbanisme et qui sont ; l'agenda 21 et le programme des villes-santé de l'OMS abordés ci-dessous.

¹¹ Le Nouvel Urbanisme : ¹¹Le nouvel urbanisme appelé aussi néo-urbanisme, est un courant urbanistique qui s'est développé depuis les années 1980aux États-Unis,il reprend les principes traditionnels de l'urbanisme et de la morphologie urbaine tout en s'abstenant à reproduire des styles architecturaux traditionnels(Dupuis, 2009).

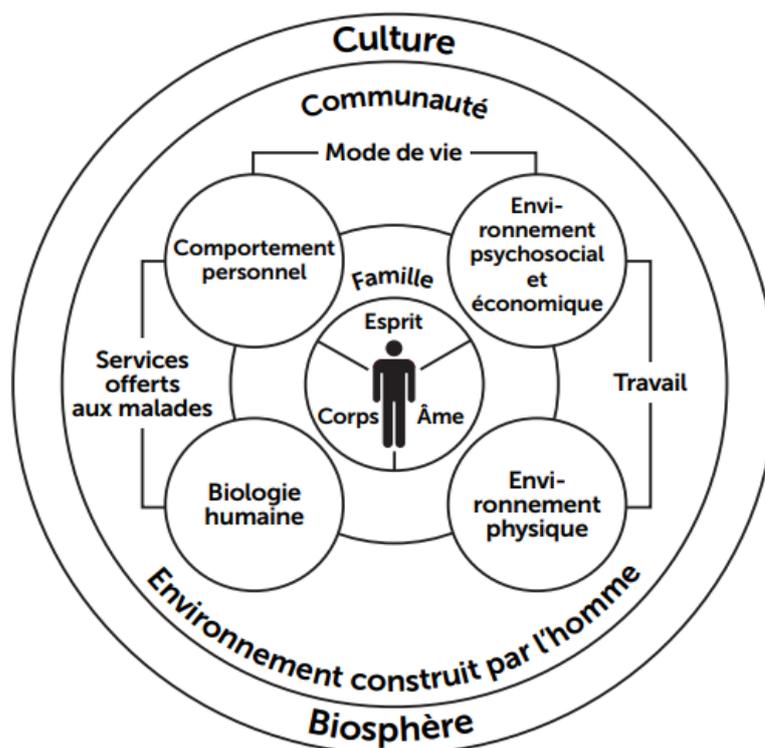


Figure 1: Mandala de la santé (Hancock & Perkins, 1985)

2. La santé pour tous pour le XXI^e siècle : au-delà du domaine de la santé

En 1998, dans un contexte de plus en plus insatisfaisant et incapable de répondre aux exigences et aux attentes vis-à-vis de la santé, l'OMS a élaboré une stratégie de réforme de la santé publique appelée SANTE 21, *la santé pour tous pour le vingt et unième siècle* qui soulignait que des mesures devaient être prises dans des domaines autres que celui de la santé afin de parvenir à l'amélioration des conditions de santé et de bien-être (Organisation mondiale de la Santé. Bureau régional de, 1998). Ce projet détermine 21 objectifs pour le XXI^e siècle.

Cette politique-cadre repose sur des axes d'action pour la promotion multisectorielle de la santé, notamment l'établissement des facteurs déterminants de la santé et impliquant la mise en œuvre d'études d'impact santé, mettant en avant une panoplie de perspectives d'ordre physique, économique, social, culturel et environnemental, ainsi que la mise en œuvre d'une démarche participative associant des secteurs capables d'agir pour la santé à tous les niveaux facilitant ainsi la prise de décision et la responsabilité conjointes, reconnaissant que la

construction des communautés favorables à la santé ne dépend pas seulement de la responsabilité du secteur de la santé. Cette stratégie souligne que l'environnement urbain et le cadre bâti sont un véritable déterminant du comportement des individus ainsi que leur santé et bien-être.

3. La santé et la ville durable : un lien inéluctable pour atteindre des objectifs de l'Agenda 21

En 1992, la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement dit aussi le sommet de la terre qui s'est tenue à Rio de Janeiro au Brésil a abouti à l'Agenda 21 qui comporte un programme d'action pour le développement durable. Le développement durable définit comme étant *''un développement qui répond aux besoins des générations actuelles sans compromettre les capacités des générations futures''* (Gendron & Revéret, 2000), porte une attention particulière à l'habitat humain et à l'environnement étant donné que la santé et le bien être des individus dépend de cet environnement. La santé et le développement durable sont intimement liés l'un à l'autre, en effet, le développement durable est considéré comme un mécanisme permettant d'améliorer la santé, le bien-être et la qualité de vie des individus (Tizio, 2002). La qualité de vie est l'un des principes fondamentaux du développement durable. L'Agenda 21 fait référence à la santé plus de 200 fois et lui consacre un chapitre entier intitulé *'' protection et promotion de la santé humaine''*. En parallèle, La charte d'Aalborg a été adoptée par la conférence européenne tenue au Danemark en 1994, et a lancé le projet des villes durables afin de soutenir les démarches de l'Agenda 21. Les principes et les actions des projets SANTE21 et Agenda21 sont complémentaires, malgré qu'ils soient deux programmes différents, et c'est ce qui explique le lien entre la santé et la ville durable.

4. Le mouvement Ville-santé de l'OMS : une idée-force

En 1987 suite à la charte d'Ottawa pour la promotion de la santé (LA SANTÉ, FAVORABLES, COMMUNAUTAIRE, AA, & INTERNATIONALE, 1986), l'OMS a adopté une première tentative de lier urbanisme et santé en lançant le projet de ville-santé, en le dotant d'un large dispositif permettant la mise en œuvre de pratiques en matière de santé urbaine. Les programmes SANTE21 et Agenda21 en constituent les fondements essentiels. Dès lors, ce projet s'est progressivement développé et a essaimé sur les cinq continents.

En fait, *‘une ville-santé n’est pas une ville qui a atteint un niveau particulier d’état de santé mais une ville qui se préoccupe de la santé et s’efforce de l’améliorer’* (Tsouros, 1992). De ce fait, tout en faisant de la santé une priorité, la ville-santé s’engage à orienter des mesures vers non seulement les collectivités pour qu’elles améliorent les conditions environnementales et sociales en matière de la santé, mais aussi aux individus pour leur permettre d’adopter un mode de vie sains et bénéfique pour la santé physique et moral.

Le projet Ville-santé s’est développé en trois phases différentes. Pour mettre ce projet sur pied, l’OMS a désigné un certain nombre de villes devant satisfaire certaines exigences pour leur transformation en une ville-santé. La phase I (1987-1992) : déjà durant cette phase, le projet-pilote initial de ville-santé s’est transformé en mouvement social (Bracht & Tsouros, 1990), cette phase a vu la participation de 35 villes qui ont œuvrer à appliquer des facteurs de changement par l’introduction de méthodes de travail. La phase II (1993_1997) : 38 villes ont participé durant cette phase, et ont établi chacune des profils de santés et des plans globaux de santé. La phase III (1998-2002) : impliquait 41 villes, durant cette phase, le projet ville-santé a adopté une démarche plus structurée et novatrice pour la santé en milieu urbain en mettant en œuvre des stratégies s’appuyant sur les programmes SANTE21 et Agenda21 et en passant de la promotion de la santé à une véritable stratégie intersectorielle garantissant les liens entre une planification sanitaire intégrée et d’autres stratégies relatives à l’ensemble de la ville. La phase IV (2003-2008): cette phase a connu la promotion de plusieurs thèmes de santé dans les villes notamment l’évaluation de l’impact sur la santé, la promotion de l’activité physique et de l’urbanisme favorable à la santé. La phase V (2009-2013):cette phase a instauré les conditions et opportunités qui favorisent les modes de vie sains en ville et un environnement et un aménagement urbains respectueux de la santé en offrant les activités récréatives et le bien-être, la mobilité douce, l’interaction sociale et une réduction des nuisances sonores et de la pollution atmosphérique. La phase VI (2014-2018):cette phase a couvert un réseau d’une centaine de villes, cette phase a mis l’accent sur les déterminants de la santé, l’équité en santé, une gouvernance intersectorielle et participative pour la santé et la gestion des problèmes urbains. La phase VII (2019-2024): actuellement, et après 30 années de savoir et d’expérience du mouvement des Villes-santé de l’OMS, des stratégies efficaces et efficientes sont mise en œuvre pour relever les défis mondiaux d’aujourd’hui dans le domaine de la santé publique et du bien-être notamment en milieu urbain en s’appuyant sur la charte de Belfast pour les Villes-santé établi en 2018 (Organisation mondiale de la Santé. Bureau régional de, 2018)

visant la mise en application du programme de développement durable à l'horizon 2030 et du Consensus de Copenhague entre les maires.

4.1 L'approche Ville-santé : critères, principes et dimensions

Hancock et Duhl ont identifié les critères d'une Ville-santé qui la caractérisent en tant qu'un environnement physique de haute qualité propre et sûr et d'un écosystème stable et durable qui satisfait les besoins fondamentaux, ayant une collectivité solidaire éprouvant une économie urbaine diversifiée et innovante et incitant un haut degré de participation citoyenne, une configuration d'une ville compatible avec son contexte et son héritage qui possède un niveau optimum de services sanitaires, favorisant ainsi un haut degré de bonne santé et un faible taux de morbidité (Duhl & Hancock, 1988).

Barton et Tsourou déterminent cinq principes d'une Ville-santé qui ont d'importantes implications en matière d'urbanisme et s'inspirent des programmes SANTE21 et Agenda21 (Barton & Tsourou, 2004a); (1) l'égalité: l'inégalité entre les individus influe largement l'état de santé de ceux-ci. La Ville –santé s'engage à lutter contre la ségrégation sociale et spatiale et à faciliter l'accessibilité de tous aux différents services et à améliorer la qualité du logement et les conditions de vie des personnes défavorisées ainsi que la qualité du tissu urbain des zones démunies. L'urbanisme a la possibilité d'améliorer les normes relatives à l'environnement physique et social. (2) La durabilité : la durabilité est un élément pivot de l'approche Ville-santé. Les villes sont des lieux d'application d'importantes politiques non seulement environnementales, économiques et sociales mais aussi ceux de la santé (W. H. Organization, 1998). Le développement durable dans les villes ne pourrait s'achever sans la prise en considération de la santé et du bien-être des citoyens c'est pour cette raison que le concept Ville-santé s'inscrit dans les perspectives de l'agenda21. Cependant, les politiques urbaines abordent le développement durable dans les villes que par son volet environnemental. L'approche Ville-santé est un véritable outil pour les urbanistes pour qu'ils puissent assurer un aménagement urbain durable. (3) la coopération intersectorielle: l'objectif Ville-santé ne peut s'achever sans une démarche intersectorielle impliquant différents secteurs sanitaires, sociaux, environnementaux et économiques, qu'ils soient publics ou privés à travers les différents échelons ; nationaux, régionaux, locaux ou encore de quartiers, parvenant ainsi à un haut degré de synergie et d'efficacité. La collaboration entre les urbanistes et les acteurs d'autres secteurs est indispensable pour relever les défis urbains

actuels. L'intégration de la santé s'avère nécessaire dès lors que l'on veut traiter les problèmes environnementaux et urbains. (4) la participation citoyenne: l'implication de la population est un principe clé de l'approche Ville-santé. L'utilité que revêt la Ville-santé réside dans sa capacité à stimuler l'implication de la population dans la définition des priorités et des besoins ainsi que dans la prise de décisions dans les procédures d'urbanisme et la promotion de la santé dans les villes. (5) l'action internationale: la collaboration et la solidarité entre les urbanistes des différents pays est primordiale pour l'échange des expériences, de connaissances et de ressources pour la création des environnements urbains davantage centrés sur les êtres humains.

Dans leur publication *“Villes-santé en Europe : structurées, uniques et réfléchies”* Wilding et al., définissent les dimensions de la Ville-santé, entre autres : la dimension écologique, la dimension salutogène¹² et la dimension participative (Wilding et al., 2017). Pour analyser et évaluer l'étude d'impact sur l'environnement, la démarche Ville-santé s'appuie fortement sur les fondements de l'écologie urbaine avec un accent mis en particulier sur le développement durable. L'un des maîtres-mots de la Ville-santé est la salutogène qui cherche à déterminer d'où vient la santé et comment peut-elle être renforcée, afin de pouvoir créer des environnements favorables à la santé en adoptant une démarche centrée sur la santé des habitants. La charte d'Ottawa pour la promotion de la santé a souligné l'importance de faire participer la population dans toutes les phases du processus Ville-santé (LA SANTÉ et al., 1986).

La mise en œuvre des pratiques reliant urbanisme et santé peut se faire à travers plusieurs éléments, à savoir l'engagement politique à l'échelon le plus élevé dans la perspective de l'Agenda21, la Charte d'Ottawa pour la Promotion de la Santé et du projet Ville-santé, la mise en place de nouvelles structures organisationnelles et coopératives pour orienter les travaux et les changements, l'élaboration d'une vision commune et d'un plan de développement urbain favorable à la santé (Barton & Tsourou, 2004b)

¹²La salutogène : Contrairement à la pathogène, En prévention et en promotion de la santé, la salutogène est une approche axée sur les ressources qui se concentre sur le renforcement d'un environnement favorable à la santé et des ressources individuelles, les facteurs de protection dans la terminologie de la prévention, afin de prévenir les maladies ou de promouvoir la santé ("Lexique de prévention et santé Salutogène,") .

En résumé, le mouvement Ville-santé revêt une importance particulière pour les urbanistes pour plusieurs raisons notamment: l'élaboration des actions efficaces et des politiques urbaines centrées sur la santé des habitants en mettant l'accent sur l'égalité, la durabilité et la participation tout en favorisant la coopération entre non seulement des différents secteurs au sein des villes, mais aussi entre les différents pays à l'échelle mondiale et en procédant à de nouvelles pratiques de l'urbanisme en plaçant la santé comme priorité. Les urbanistes ont un rôle pivot dans l'élaboration et la mise en application et l'intégration de la santé dans les milieux urbains.

5. Le diagramme des déterminants de santé : un modèle pour les urbanistes

Dans son ouvrage intitulé '*A healthmap for urbanplanners: towards a conceptual model for healthy, sustainable settlements*', Hugh Barton a établi un diagramme des déterminants de santé à travers le prisme de l'aménagement du territoire (Barton, 2005) (Figure 2).

Les différentes facettes des établissements humains sont représentées par une série de sphères, allant des variables sociales, économiques jusqu'aux variables environnementales. L'établissement est situé dans sa bio région et dans l'écosystème global dont elle dépend. Les facteurs culturels, économiques et politiques ont un impact sur le bien-être. Ainsi, tous les éléments du diagramme des déterminants de santé sont répartis de manière à refléter l'écosystème de l'habitat humain. L'urbanisme peut affecter la qualité de cet environnement.

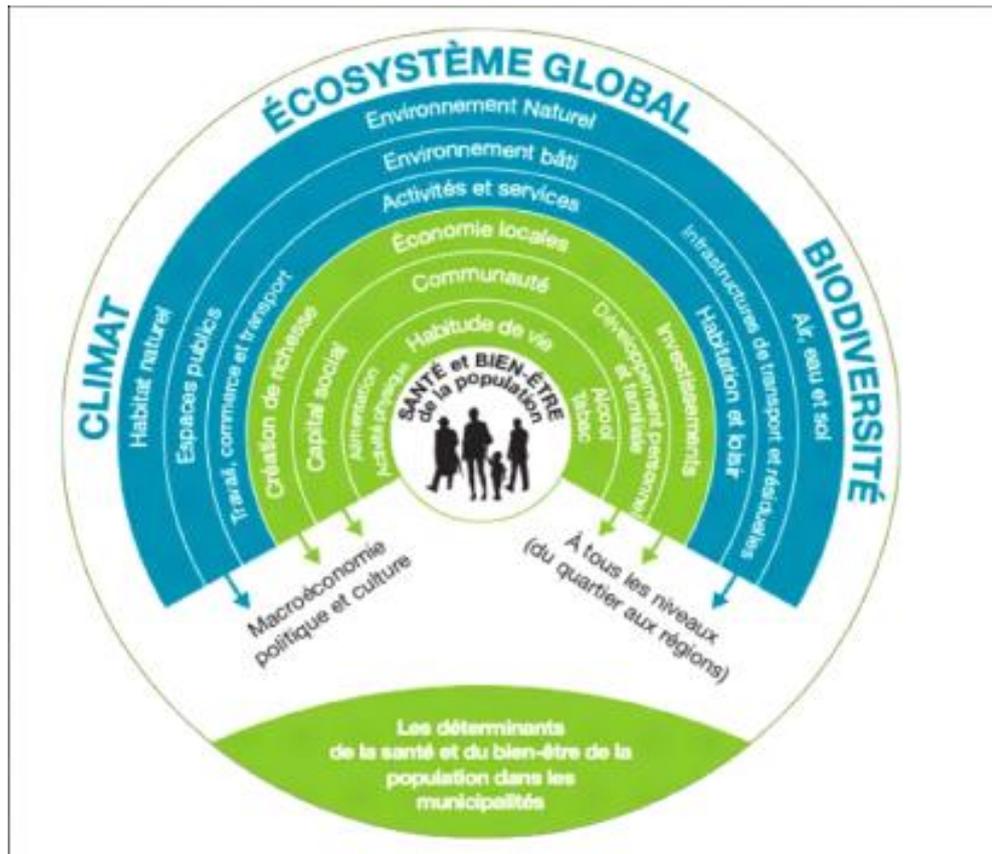


Figure 2: les déterminants de santé et du bien-être à travers le prisme de l'aménagement du territoire- *Healthmap for urbanplanners*(Barton, 2005).

Les modes de vie et les paramètres socioéconomiques et environnementaux participent ainsi à l'amélioration ou à la détérioration de l'état de santé des populations. Ce diagramme montre qu'il est possible d'agir sur les déterminants de santé en agissant sur les comportements individuels comme l'incitation à la pratique de l'activité physique, ou les conditions socio-économiques comme la qualité du logement et plus largement le contexte de vie comme l'environnement physique. Les actions en matière d'habitat, de mobilité et de transports, d'aménagement et d'urbanisme ainsi qu'en faveur de la cohésion sociale, ont des effets directs et indirects sur l'état de santé des individus. La pratique de l'espace urbain et son fonctionnement peut agir sur la santé à travers une large gamme, entre autres les conditions du logement, les conditions du cadre de vie en matière d'exposition aux nuisances sonores et atmosphériques ainsi que l'amélioration de la qualité des lieux, les conditions de mobilité et d'accès aux services et aux espaces verts et ainsi promouvoir la cohésion sociale, faciliter l'accès aux équipements collectifs, encourager l'exercice physique.

Donnons l'exemple d'un plan de transport; ce dernier peut donc affecter positivement la santé des citoyens en agissant sur le mode de vie individuel si l'activité physique est encouragée à travers la marche et le cyclisme ; ou sur les facteurs sociaux à travers les services collectifs ; sur les conditions de vie et de travail en facilitant les déplacements domicile-travail ainsi que sur les conditions environnementales à travers la réduction du bruit et de la pollution de l'air.

6. La santé et l'urbanisme au cœur des 17 Objectifs du Développement

Durable ODD de l'Agenda 2030

Dits aussi les Objectifs Mondiaux, les Objectifs de Développement Durable (ODD) ont été établis par les Nations Unies en 2015 (Unies, 2020). C'est un appel mondial à agir pour sauver la planète à travers la prise en compte des aspects sociaux, économiques et environnementaux. Les 17 objectifs de développement durable et leurs 169 cibles sont interconnectés et soulignent que les actions dans un domaine affecteront les résultats dans d'autres. Autrement dit, les objectifs d'un domaine ne peuvent être atteints sans la prise en considération des autres domaines qui l'affectent. A partir de cette déclaration, on souligne que l'ODD11 (villes et communautés durables) -qui vise à favoriser des établissements humains sûrs, résilients et durables- est la clé de voûte pour atteindre l'ODD3 (bonne santé et bien-être) qui vise à assurer aux individus une vie saine et promouvoir le bien-être en réduisant les maladies transmissibles, non transmissibles¹³, environnementales et mentales et vice versa (Tableau 1).

¹³ Les maladies non transmissibles (chroniques) sont des affections non contagieuses de longue durée qui en règle générale évoluent lentement. Il s'agit de toute une série de maladies qui ne sont pas transmises par un agent infectieux. (Cancers, diabète, affections cardiovasculaires, rénales, neurologiques et respiratoires chroniques)

Les cibles de l'ODD 11	Les cibles de l'ODD 3 en relation avec l'environnement urbain
Accès au logement décent	réduction des maladies transmissibles
Transports sûrs, accessibles et viables	Sécurité sanitaire
Urbanisation durable	Santé-environnement: air, eau et sol
Préservation du patrimoine	renforcement des infrastructures sanitaires
Prévention et limitation de l'impact des catastrophes	bonne qualité de l'air
Impact environnemental	réduction des bruits
Accès aux espaces verts et lieux publics sûrs	la promotion de l'activité physique
Développement territorial	accessibilité aux espaces verts et de loisirs
Politiques intégrées pour des territoires résilients	amélioration des conditions de l'habitat
Bâtiments durables et résilients	mobilité douce

Tableau 1 : Les cibles de l'ODD11-villes et communautés durables, et l'ODD3-bonne santé et bien-être en relation avec l'environnement urbain selon (Unies, 2020).

7. 12 Objectifs Santé pour les urbanistes

Dans le guide de l'OMS pour un urbanisme centré sur la santé des habitants, Hugh Barton & Catherine Tsourou déterminent 12 objectifs fondamentaux pour les planificateurs urbains (Barton & Tsourou, 2004c).

Objectif I : styles de vie sains ; une configuration urbaine à faible densité et monofonctionnelle implique des long trajets et donc une dépendance excessive aux déplacements motorisés ce qui a pour conséquence l'augmentation des maladies cardio-vasculaires, l'obésité et le stress. La forme urbaine devrait être conçue de façon à inciter les habitants à utiliser la mobilité douce comme la marche et le vélo et à favoriser l'accès aux espaces permettant la pratique de l'activité physique.

Objectif II : cohésion sociale ; l'aménagement urbain peut contribuer à la cohésion sociale non seulement à travers la lutte contre les ghettos fondés sur le statut socio-économique et l'origine ethnique facteurs de dépression et de maladies mentales, mais aussi par la création des lieux de rencontres et par l'amélioration de la mixité fonctionnelle.

Objectif III : qualité du logement ; la mauvaise qualité du logement peut avoir des conséquences très nocives sur la santé des résidents, que ce soit sur la santé physique dues aux accidents et pathologies causées par le manque d'hygiène et les matériaux toxiques ou sur la santé mentale dues aux surpeuplement comme les grands ensembles ou au sentiment d'isolement social comme les tour de grande hauteur.

Objectif IV : accès au travail ; l'urbanisme peut lutter contre l'inaccessibilité au travail responsable de stress économiques et de troubles psychologiques par la création de diversité d'emploi et les moyens de transport facilitant l'accès aux lieux de travail.

Objectif V : accessibilité aux équipements et services ; la facilité d'accès aux équipements et services réduit de façon considérable la dépendance à la voiture. .

Objectif VI : production alimentaire locale ; l'urbanisme peut aider les familles à faibles revenus ou les personnes sans emploi peuvent participer à la production de leurs propres denrées alimentaires par la création des jardins familiaux, des jardins ouvriers, des jardins maraîchers, les fermettes et les fermes de villes.

Objectif VII : la sécurité ; les plans d'aménagement urbain peuvent avoir une réelle contribution à la sécurité et à la sureté dans les rues par la gestion de la circulation routière pour limiter les accidents et par la création des pistes cyclables et piétonnes.

Objectif VIII : l'égalité ; l'urbanisme peut participer aussi à la réduction des inégalités et la pauvreté en facilitant l'accès aux équipements et aux logements.

Objectif IX: qualité de l'air et esthétique ; l'urbanisme à un rôle non négligeable dans l'amélioration de la qualité de l'air à travers l'établissement de politiques de transports respectueux de l'environnement et de la santé humaine, la gestion de la congestion urbaine et l'implantation des usines et structures polluantes et bruyantes loin des zones résidentielles. Ceci participe fortement à la réduction des maladies pulmonaires et cardiaques.

Objectif X : qualité de l'eau et des équipements sanitaires ; l'urbanisme peut affecter de manière indirecte l'approvisionnement et le traitement d'eau en imposant des normes.

Objectif XI : qualité des terres; l'urbanisme peut protéger les terres en interdisant la construction urbaine sur les terres agricoles et en sauvegardant les espaces verts.

Objectif XII : stabilité du climat ; l'urbanisme peut inciter à réduire l'utilisation des combustibles fossiles et à réduire la consommation d'énergie dans la construction et l'usage des bâtiments et permet le développement des énergies renouvelables.

8. L'évaluation d'impact sur la santé (EIS) : un outil prospectif

L'OMS définit L'évaluation d'impact sur la santé EIS comme étant "*une combinaison de procédures, de méthodes et d'outils par lesquels une politique, un programme ou une stratégie peuvent être évalués selon leurs effets potentiels sur la santé de la population et selon la dissémination de ces effets dans la population. Il s'agit d'un processus multidisciplinaire structuré par lequel une politique ou un projet sont analysés afin de déterminer leurs effets potentiels sur la santé.*"(de Göteborg, 1999).

La démarche d'évaluation d'impact sur la santé ou en anglais Health Impact Assessment (HIA) se situe en amont d'un projet, d'un programme, d'une politique et permet d'évaluer a priori les effets potentiels sur la santé d'une population en formulant des recommandations pour gérer ces effets et vise informer les décideurs sur les conséquences possibles de leurs décisions sur la santé et le bien-être de la population en tenant compte des aspirations de la population et associant l'ensemble des partenaires concernés. EIS est très utile à la prise de décision dans le domaine de l'urbanisme en prévoyant les effets sur la santé de différents plans d'aménagement urbain, réduisant ainsi les effets néfastes sur la santé et optimisant les retombées positives. EIS s'inspire fortement des principes de la Charte d'Ottawa qui prône la

démocratie, le développement durable, la transversalité par le biais de l'intersectorialité l'équité et une vision holistique de la santé. Cet outil s'applique à des propositions sans lien explicite avec la santé mais pouvant néanmoins affecter de manière significative ses déterminants.

Les évaluations d'impact santé prennent de plus en plus de l'ampleur et deviennent l'une des priorités de certaines politiques d'aménagement. La mise en œuvre de l'EIS passe par plusieurs étapes ; la première consiste dans la sélection du projet, des enjeux pour la santé, les aspirations des acteurs du projet, la hiérarchisation des priorités, la détermination des connaissances et les possibilités d'action ; la deuxième concerne la délimitation des éléments du projet et les déterminants pour la santé retenir ; la troisième implique l'analyse des références, des problématiques, ; la quatrième comprend les recommandations pour maximiser les impacts positifs et réduire les effets négatifs sur la santé validées par les décideurs ; la dernière phase concerne le suivi du projet et de l'EIS.

9. L'urbanisme favorable à la santé UFS : une démarche prévisionnelle

Le concept de l'urbanisme favorable à la santé (UFS) était l'un des trois thèmes centraux de la Phase IV du mouvement Villes-santé de l'OMS en 1987(Barton & Tsourou, 2004c). L'objectif général était d'intégrer les considérations de santé dans les processus, programmes et projets de planification urbaine des villes et d'établir l'engagement politique et institutionnel nécessaires pour atteindre cet objectif.

Un urbanisme favorable à la santé consiste à placer la population au cœur du processus de planification urbaine et tenir compte des implications des décisions pour la santé et le bien-être humains. L'urbanisme favorable à la santé vise à intégrer les défis sociaux, environnementaux et économiques et donc s'inscrit dans la démarche de la planification du développement durable. Ce concept repose sur l'équité, la coopération intersectorielle, la participation communautaire et la durabilité qui sont les principes fondamentaux du projet Villes-santé. En fait, les urbanistes peuvent remédier aux problématiques de la santé des habitants telles que l'obésité, l'asthme, les inégalités de santé, les troubles de la santé mentale (stress, dépression...)en transformant les conditions de vie, de travail, d'accès aux installations et aux services et en développant les liens sociaux(Barton et al., 2003).

Un cadre de références composé de 7 axes d'actions a été défini pour le concept de l'urbanisme favorable à la santé, à savoir :

- *'' Réduire les polluants, les nuisances et autres agents délétères,*
- *Promouvoir les comportements de vie sains des individus,*
- *Contribuer à changer le cadre de vie,*
- *Identifier et réduire les inégalités de santé,*
- *Soulever et gérer, autant que possible, les antagonismes et les possibles synergies entre les différentes politiques publiques (environnementales, d'aménagement, de santé...),*
- *Mettre en place des stratégies favorisant l'intersectorialité et l'implication de l'ensemble des acteurs, y compris les citoyens,*
- *Penser un projet adaptable, prendre en compte l'évolution des comportements et modes de vie''.*

(Le Gall et al., 2015)

Le guide de l'OMS *''Agir pour un urbanisme favorable à la santé : Concepts et outils''* détermine un référentiel sur les objectifs visés pour un UFS pour les 15 Déterminants de santé (Le Gall et al., 2015) (Tableau 2).

15 Déterminants de santé	19 objectifs visés pour un UFS
Modes de vie, structures sociales et économiques	
1- Comportements de vie sains	<ul style="list-style-type: none"> • Favoriser les déplacements et modes de vie actifs • Inciter aux pratiques de sport et de détente • Inciter à une alimentation saine
2- Cohésion sociale et équité	<ul style="list-style-type: none"> • Favoriser la mixité sociale, générationnelle, fonctionnelle • Construire des espaces de rencontre, d'accueil et d'aide aux personnes vulnérables
3- Démocratie locale/citoyenneté	<ul style="list-style-type: none"> • Favoriser la participation au processus démocratique
4- Accessibilité aux équipements, aux services publics et activités économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Favoriser l'accessibilité aux services et équipements
5- Développement économique et emploi	<ul style="list-style-type: none"> • Assurer les conditions d'attractivité du territoire
Cadre de vie, construction et aménagement	
6- Habitat	<ul style="list-style-type: none"> • Construire ou réhabiliter du bâti de qualité (luminosité, isolation thermique et acoustique, matériaux sains...)
7- Aménagement urbain	<ul style="list-style-type: none"> • Aménager des espaces urbains de qualité (mobiliers urbains, formes urbaines, ambiances urbaines, offre en espaces verts..)
8- Sécurité-tranquillité	Assurer la sécurité des habitants
Milieux et ressources	
9- Environnement naturel	<ul style="list-style-type: none"> • Préserver / encourager la biodiversité et la qualité du paysage existant
10- Adaptation aux changements climatiques	<ul style="list-style-type: none"> • Favoriser l'adaptation aux événements climatiques extrêmes
11- Air extérieur	<ul style="list-style-type: none"> • Lutter contre la prolifération des maladies vectorielles • Améliorer / préserver la qualité de l'air extérieur
12- Eaux	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer / préserver la qualité et la gestion des eaux
13- Déchets	<ul style="list-style-type: none"> • Inciter à une gestion de qualité des déchets (municipaux, ménagers, industriels, de soins, de chantiers,...)
14- Sols	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer / préserver la qualité et la gestion des sols
15- Environnement sonore et Champs électromagnétiques	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer / préserver la qualité sonore de l'environnement et gérer les risques liés aux champs électromagnétiques

Tableau 2 : Référentiel sur les objectifs visés pour un UFS pour les 15 Déterminants de santé. Source (Le Gall, Le Gall, Potelon, & Cuzin, 2015)

Un urbanisme favorable à la santé signifie une bonne planification et une conception urbaine de haute qualité qui peuvent contribuer à réduire les coûts des soins de santé au fil du temps en prévenant les problèmes de santé dus aux risques attribués à l'urbanisme, notamment la pollution de l'air, les accidents de la route et les mauvaises conditions de logement. Une bonne conception urbaine génère également une valeur économique, sociale et environnementale.

Une checklist a été élaborée pour veiller à ce que les questions de santé et de bien-être soient intégrées dans les plans locaux, les plans directeurs et les principales applications de planification. La checklist est divisée en quatre thèmes (logement sain-mobilité active-Environnement sain-quartier dynamique''). Chaque thème contient un certain nombre de questions axées sur un problème de planification. Sous chaque thème, il existe un certain nombre de problèmes de santé et de bien-être connexes (Capon & Blakely, 2008), comme ceux relatifs au surpeuplement, aux nuisances sonores et lumineuses, à l'inactivité physique et à une mauvaise qualité de l'air, qui sont responsables de nombreuses maladies comme les maladies cardiovasculaires, l'obésité et les maladies mentales.

Conclusion Ou en sommes-nous aujourd'hui ?

Depuis le début du siècle, l'alliance urbanisme santé se revigore après la dissociation qui a prévalu au cours de la seconde moitié du XXe siècle. Sauf que les préoccupations ont changé ; Si la planification urbaine du XIX^e siècle tentait de remédier aux problèmes des maladies transmissibles, l'urbanisme de nos jours se préoccupe des maladies transmissibles directement liées à nos modes de vies et notre environnement urbain (cancers, maladies cardiovasculaires, respiratoires, asthme, allergies, diabète, obésité...). L'urbanisme d'aujourd'hui se veut de santé(MOUSTAQIL), s'inscrivant dans une démarche prévisionnelle pour limiter le recours à la médicalisation à travers un ensemble de planifications stratégiques, entre autres la lutte contre le changement climatique, le bruit et les émissions de gaz à effet de serre ; la lutte contre la sédentarité responsable de nombreuses morbidités en promouvant la mobilité douce, l'amélioration de la qualité du logement, des équipements et des espaces publics.

Chapitre II: Le concept de la ville compacte depuis son origine jusqu'à aujourd'hui

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons fournir une explication détaillée sur le concept de la ville compacte. D'abord, en élucidant la différence entre densité, compacité et intensité, puis en présentant une rétrospective sur l'évolution du concept de la ville compacte ainsi que ses caractéristiques. En se basant sur les recherches dans la littérature, nous expliquons également comment la ville compacte peut contribuer à améliorer la durabilité urbaine et soulignant le besoin de la mise en œuvre de l'approche dans le contexte urbain actuel. Ensuite, nous exposons l'évaluation de la performance de la ville compacte ainsi que les différentes méthodes de calcul de la compacité. Nous finissons le chapitre en faisant un choix de la méthode d'évaluation de la compacité et enfin en présentant une revue de littérature abordant les avantages et les inconvénients de la compacité urbaine et son lien avec la qualité de l'air et la santé des habitants.

1. Densité, intensité, compacité : un cadre lexical de référence

Si l'on veut décrire un tissu urbanisé ou si l'on veut y mettre des prescriptions cadrant un projet urbanistique, les nuances entre les notions de compacité, de densité et d'intensité en termes d'urbanisme doivent être bien cernées afin d'élucider cette confusion terminologique. Ce qui suit présente un lexique de définitions précises de ces différentes notions.

1.1 La densité urbaine

Etymologiquement, la densité vient du mot latin « densitas » qui signifie « épaisseur » (Le Petit Robert, 1996). La densité urbaine est le résultat du rapport entre une quantité (d'habitants, de logements ou d'activités) et une superficie de territoire donnée. Une

définition plus complète a été donnée par Barbara et al., qui l'ont défini comme étant «une formule mathématique établie sous forme d'un rapport entre une quantité d'éléments représentant le contenant (nombre de niveaux, emprise au sol du bâti*, surface utile*, ...) ou le contenu (nombres d'habitants, d'emplois, de logements,...) et un espace de référence qui peut être une surface (densité surfacique), un volume (densité volumique) ou une longueur (densité linéaire)»(Barbara, Meuris, & Léonard, 2012). Ce rapport permet de donner une estimation de la charge supportée par unité de référence. On parle alors de la densité de population exprimée par le rapport entre le nombre d'habitants par unité de surface, ou le nombre de personnes par logement/ par immeuble ; de la densité résidentielle ou densité de logements exprimée par le rapport entre le nombre de logement par unité de surface, de la densité bâtie exprimée par le rapport entre le coefficient d'emprise au sol (CES) c'est-à-dire le rapport entre l'emprise au sol totale des bâtiments et la surface de l'îlot sur lequel ils sont implantés multiplié par le nombre de planchers ou encore la densité d'emplois exprimée par le rapport entre le nombre d'emplois et la surface du périmètre d'étude(Abdullahi & Pradhan, 2017). Un autre outil règlementaire de densité urbaine détermine le droit à bâtir sur une parcelle qui est le coefficient d'occupation du sol (COS) exprimé par le rapport de la surface constructible sur la surface de la parcelle.

La densité peut être brute ou nette selon le choix de la surface de référence. La densité nette ne prend pas en compte le calcul des espaces publics à l'inverse de la densité brute qui inclue la voirie et les espaces verts. On parle aussi des densités de contenant qui concernent le bâti et les densités de contenu qui concernent les usagers (habitants, employés, clients), c'est pour cette raison qu'une densité hybride a été définie. Appelée la densité d'activité humaine et exprimée par le rapport entre la somme du nombre d'habitants et des emplois par unité de surface, cette dernière permet de mesurer la densité d'usage d'un espace(Lefebvre, 2013).

Il est opportun de distinguer la densité perçue ou vécue de la densité réelle. La densité perçue fait référence à l'appréciation subjective que font les individus sur le nombre d'habitants présents dans un espace donné en raison des qualités physiques du cadre urbain, des paramètres cognitifs individuels et les facteurs socioculturels (Lefebvre, 2013). En fait, une forte densité perçue peut provoquer le stress, le sentiment d'entassement ou d'étouffement. La densité perçue n'a généralement rien à voir avec la densité réelle par exemple ; la hauteur des bâtiments donne une impression d'une forte densité, les constructions de hauteur importante ont souvent un effet d'oppression, cependant, un tissu continu et resserré des quartiers anciens avec des constructions à hauteur quasi identique procurent des sentiments d'intimité et de bien-être. De ce fait, il n'existe

pas un lien direct entre la grande hauteur et la forte densité ; Lefebvre a démontré cela en déclarant que «*le lotissement haussmannien Gérard-Dunkerque à Paris s'élève à R+5 pour une densité de 5,57 ; bien plus haute, la barre du Haut du Lièvre à Nancy atteint R+13 pour une densité de 1,48 ; encore plus élevé, le « square Dunois » à Paris culmine à R+33 avec une densité de 3,16*»(Lefebvre, 2013).

Le processus de densification s'impose aujourd'hui pour limiter l'étalement urbain responsable de la consommation du foncier. Le besoin de répondre à la demande de logement tout en ayant une gestion économe de l'espace a ramené le processus de densification au premier plan. Cependant, il est nécessaire de distinguer la densification spontanée qui a marqué les anciens quartiers qui se sont densifiés de manière aléatoire en raison des causes économiques, politiques ou sociales, de la densification planifiée qui fait l'objet d'une réflexion en amont. La densification peut s'opérer tant sur le bâti ; par l'implantation de nouveaux bâtiments dans les parcelles vides ou par une extension verticale une densification verticale par l'augmentation des gabarits, que sur le tissu urbanisé par la création de nouvelles voiries, de nouveaux espaces publics ou par la division des parcelles trop larges.

Une ville dense est aujourd'hui considérée comme une ville durable. En effet, une ville dense favorise les déplacements de courte distance et l'utilisation des transports publics, et ainsi tend à limiter l'impact écologique et créer du lien social. A cet égard, Newman et Kenworthy ont démontré l'efficacité d'une ville dense en termes de réduction de consommations énergétiques dans le domaine du transport (P. G. Newman & Kenworthy, 1989). Cependant, une densification raisonnée et acceptée s'impose en tenant une attention particulière au traitement qualitatif de l'espace urbain conjuguant qualité d'usage, qualité paysagère, confort des espaces, vie intime et commodités publique.

La distinction entre densité et formes urbaines doit être l'objet d'une attention particulière. La Figure 3 montre qu'une même densité peut prendre différentes formes urbaines. On peut atteindre une même valeur de densité de population ou de construction soit avec une construction en hauteur, soit avec des pavillons ou avec de l'habitat intermédiaire. En revanche, les effets de ces formes urbaines sur les espaces publics et sur la perception de la densité (proximité, aération, etc.) ne sont pas les mêmes.

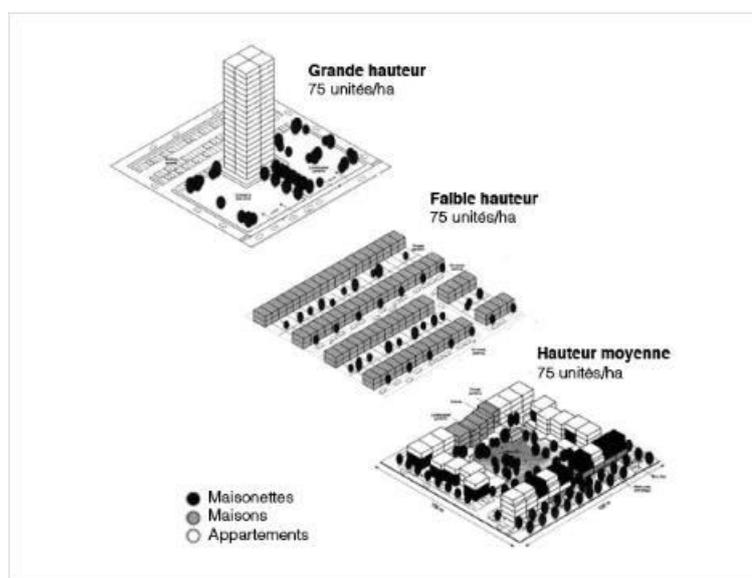


Figure 3 : Une même densité avec des formes urbaines différentes. Source : (Force & Rogers, 1999).

1.2 L'intensité urbaine

La notion d'intensité urbaine est différente de la densité. Si la densité urbaine quantifie la charge supportée par unité de surface, L'intensité urbaine englobe l'ensemble des différentes fonctions de la ville, elle se définit comme la somme de toutes les fonctions ayant lieu dans un espace. Par conséquent, une zone dense n'est pas forcément intense ; par exemple, une zone résidentielle à forte densité. De ce fait l'intensité urbaine regroupe à la fois la densité et la diversité.

L'intensité se veut être le nouveau principe de la ville durable. Elle reflète la réalité d'une ville et elle est considérée comme un outil pour une consommation maîtrisée des espaces. L'intensité urbaine dépasse la simple notion de densité urbaine par la mixité et la multifonctionnalité. L'intensité urbaine répond aux enjeux du développement durable dans la mesure où elle favorise des espaces intenses disposant de nombreux services de proximité, des lieux où se concentrent les fonctions urbaine tel que le transport en commun, les commerces de proximité, les zones d'emplois, du logement, des espaces de détente. Une ville intense est une ville à haut niveau de services. L'intensité regroupe cinq éléments : la proximité, l'accessibilité, la mixité, la densité et la qualité (a'urba, 2012). De ce fait, la notion d'intensité renvoie au rapport quotidien à la ville et au cadre de vie. Si la plupart des habitants pensent aux grands ensembles et au sentiment d'entassement en parlant de la densité quoique les quartiers de tours ne soient pas nécessairement les plus denses, l'intensité urbaine quant à elle renvoie à l'ambiance et à l'animation urbaine.

L'intensité urbaine est visualisée grâce à la méthode de la carte de chaleur¹⁴. Les couleurs qualifient les espaces les plus et les moins intenses. Cette carte est déterminée à partir de plusieurs thématiques : la démographie (nombre d'habitants), L'habitat (la densité de logements), le commerce (la densité de commerces de proximité), l'économie (densité d'emploi), équipements (densité d'équipements et d'établissement de proximité), accessibilité (disponibilité des transports collectifs). La première étape consiste à tracer un quadrillage (exemple de 50m par 50m), ensuite chacun de ces carrés se voit attribuer les variables citées

¹⁴Une carte de chaleur ou " HeatMap ", est une technique de visualisation de données statistiques complexes pour les rendre compréhensibles et exploitables. Elle repose sur l'utilisation des couleurs("Heat Map,").

précédemment. Comme le montre la Figure 4, la somme de ces variables permet d'attribuer une valeur d'intensité urbaine. Cet indicateur quantifiable donne une valeur retranscrite en couleur qui permet de repérer facilement les zones présentant la plus forte intensité urbaine (SPAR, 2020).

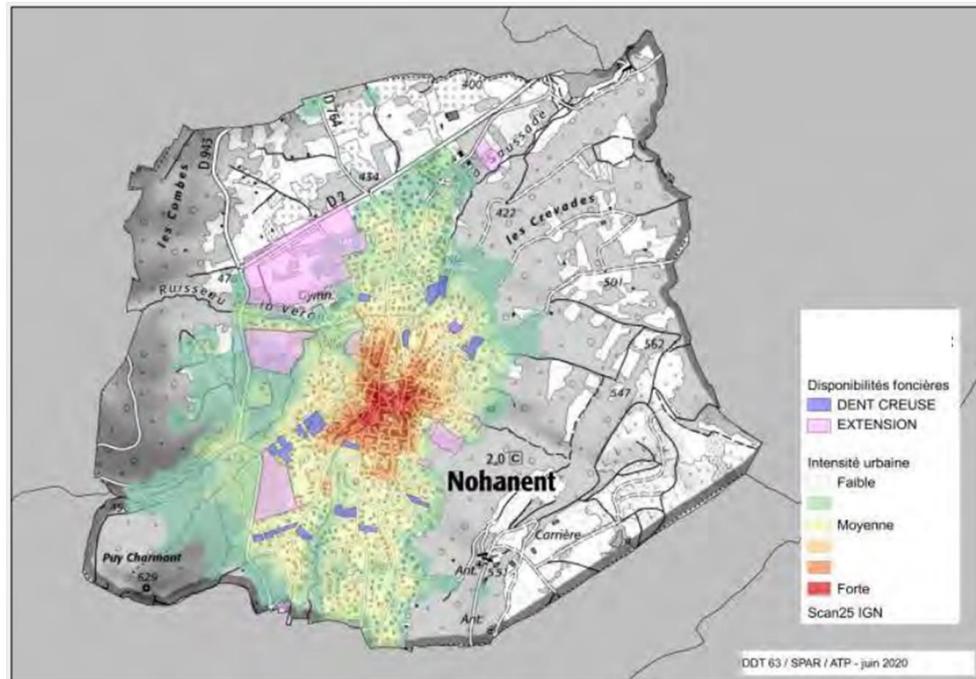


Figure 4 : Carte d'intensité urbaine du territoire de Puy-de-Dôme, France. Source : (SPAR, 2020)

1.3 La compacité urbaine : origine et les différentes définitions dans la littérature

Si la densité réfère à une variable quantifiable ou un indicateur statistique sur une superficie donnée, sans la prise en compte de la forme et l'agencement des bâtiments et des espaces publics entre eux, la compacité, quant à elle, se rapporte au rapport entre les surfaces bâties et non bâties. Elle réfère à la manière d'occuper le territoire. Une compacité élevée cherche à limiter les vides et les discontinuités.

Dans la littérature, il n'existe pas une seule définition de la ville compacte, car il n'existe pas un seul prototype de la ville compacte applicable à toutes les villes et les régions, différentes actions ont été prises selon différents contextes urbains et donc différentes définitions y ont été attribuées.

Le concept de la ville compacte trouve son origine dans l'ouvrage intitulé "*Compact City: A Plan for a Liveable Urban Environment*" publié en 1973, dans lequel les auteurs Dantzig et Saaty ont écrit "*Le modèle de la ville compacte est la meilleure solution pour la conception d'une forme urbaine durable*". Motivés par la volonté de promouvoir une utilisation plus efficace des ressources, les auteurs ont tenté de s'opposer aux phénomènes de ville diffuse¹⁵, de périurbanisation ou d'étalement urbain, signalant ainsi le gaspillage d'espace, la pollution générée par l'urbanisation, la forte consommation des ressources et d'énergie, l'atteinte au patrimoine naturel, à la biodiversité et à la qualité des paysages (Dantzig et al., 1973). Selon Dantzig et Saaty, la ville compacte se caractérise par: (1) une forme urbaine dense, moins dépendante à la voiture et une bordure claire avec les espaces périphériques; (2) des caractéristiques spatiales marquées par la diversité et la mixité fonctionnelle et (3) l'équité sociale.

Jane Jacobs a influencé la planification urbaine en y introduisant le concept de la ville compacte (Jacobs & Parin-Senemaud, 1991). Dans son ouvrage "*Déclin et survie des grandes villes américaines*", Jane Jacobs critique le mouvement des cités-jardins qui prônait la réduction de la densité et établit quatre conditions qu'il considère indispensables au renouvellement urbain, à savoir la diversité fonctionnelle, des petits îlots, la mixité de construction et une densité de population adéquate.

Burton et Jenks définissent la ville compacte comme étant une ville à forte densité, de mixité fonctionnelle, des transports publics efficaces et des dimensions qui encouragent la marche et le vélo et une faible consommation d'énergie et une réduction de la pollution (Burton et al., 2003). La ville compacte est qualifiée comme une ville à courtes distances, une ville moins dépendante de la voiture (Dempsey, 2010).

Thomas et cousins affirment qu'un développement concentrique favorise le respect de l'environnement et répond non seulement aux aspirations de la population mais aussi aux

¹⁵ La ville diffuse est un concept caractérisant une évolution urbaine non planifiée, couvrant parfois des surfaces importantes, dans un stade extrême du mitage rural. Morphologiquement, l'habitat se superpose à la fonction agricole antérieure sans l'effacer complètement. Selon Grosjean (2012),.

exigences économiques. Ils identifient la ville compacte comme étant une ville accessible par tous, à pied et par le transport public(L. Thomas & W. Cousins, 1996).

Churchman déclare que les politique de la ville compacte œuvre à intensifier l'occupation des sols à travers une forte densité résidentielles, la centralisation, la mixité fonctionnelle et la délimitation du développement urbain dans les zones périphériques (Churchman, 1999).

Neuman établi 14 caractéristiques de la ville compacte: I) une densité résidentielle élevée; II) la mixité fonctionnelle; III) petite taille de parcelles; IV) une forte interaction sociale et économique; V) un développement contigu; VI) une délimitation claire du développement urbain; VII) des infrastructures urbaines adéquates; VIII) transport multi modal; IX) une bonne accessibilité; X) connectivité routière; XI) des surfaces imperméables; XII) un faible rapport d'espaces ouverts; XIII) le control du développement et de la planification; IX) financement suffisant pour les infrastructures et les équipements urbains. (M. Newman, 1999)

On associe souvent le terme d'autosuffisance à la ville compacte du fait qu'elle tend à fournir tout ce dont les habitants ont besoin au sein de la communauté(L. W. Li & Yu, 2016) que ce soit les commerces, les équipements, les espaces publics ou les transport collectif. Ce mode d'occupation du territoire se veut une réponse aux problèmes engendrés par l'étalement urbain dans la mesure où il tend à créer des espaces denses, conviviaux, et respectueux de l'échelle humaine. Ce modèle de planification urbaine tend à réduire le temps de déplacement des résidents et donc, vise à réduire la consommation de combustibles fossiles et favoriser un modèle durable d'urbanisation. La ville compacte est qualifiée aussi d'une ville piétonne car elle facilite l'accessibilité et la circulation des piétons(Omar, Omar, Othman, & Yusoff, 2016). On associe aussi souvent le terme de "proximité" à la ville compacte qui cherche à fournir la proximité des commodités d'une communauté par rapport à l'endroit où les gens vivent.

2. L'historique de l'évolution du concept de la ville compacte

La compacité urbaine trouve son origine dans les villes les plus anciennes. En effet, les forteresses médiévales se caractérisaient par une certaine compacité. Ces dernières été

entourées par des enceintes pour la protection de la population. A l'intérieur des murailles, une attention particulière été attribuée à l'emplacement des habitations et des différents équipements. De ce fait, on peut dire que la ville compacte est apparue avec l'émergence des villes. Par le temps et en raison du développement de l'automobile, ces murailles perdent leur fonction et deviennent un frein et une barrière à la mobilité. Par la suite, la révolution industrielle du XIX^{ème} siècle entraine un afflux massif dans les centres urbains provoquant ainsi un dépassement de la capacité à l'intérieur des enceintes, ce qui a eu pour conséquence leur suppression, l'ancienne ville compacte arrive à sa fin.

En raison de la forte expansion urbaine, le concept de la ville compacte est réapparu. Cette fois, non pas pour protéger la population mais plutôt les espaces agricoles dans les zones périphériques pour lutter contre l'étalement urbain. Certaines villes ont eu recours à des ceintures vertes constituant ainsi une bordure entre les espaces urbains et aires extérieures comme celle de la cité jardin d'Ebenezer Howard (Howard, 1946).

Dans les années 1960, la question de la qualité de vie, de la diversité et de la densité prend une place considérable dans les politiques urbaines. Jane Jacobs affirme qu'une ville avec une certaine densité et multifonctionnalité représente le modèle le plus rationnel du développement urbain (Jacobs, 1962). Les années 1970 sont marquées par l'apparition de l'approche de la compacité urbaine pour remédier au phénomène de l'étalement urbain.

A partir des années 1980 et avec l'apparition de la notion de durabilité, le concept de la ville compacte a pris de l'ampleur dans les études urbaines, suggérant que la ville compacte et le modèle qu'il faut adopter pour atteindre les objectifs du développement urbain durable (Mike Jenks, Elizabeth Burton, & Katie Williams, 1996). Les politiques urbaines ont placé la compacité urbaine comme élément central pour atteindre la durabilité urbaine. Les organisations scientifiques internationales soulignent l'importance de l'approche de la compacité urbaine pour relever les défis urbains actuels (Bank, 2010; Dempsey, 2010; UN, 2018; Warning, 2011; World Health, 2012).

En résumé, le concept de la ville compacte n'est pas nouveau, mais a évolué au fil du temps pour changer d'échelle et d'objectifs. Si la ville compacte ancienne tentait de protéger la population puis les terres agricole, la ville compacte d'aujourd'hui, avec son approche

multidimensionnelle, tend à minimiser la consommation énergétique, promouvoir la durabilité urbaine et répondre aux défis du changement climatique.

3. pour une meilleure compréhension du concept de la ville compacte

3.1 la taille de la ville compacte:

Lorsque l'on parle de la ville compacte, on imagine souvent une ville de petite taille. Cependant, les aires métropolitaines pourraient être compactes si elles possèdent les caractéristiques de la compacité urbaine. Le besoin des politiques de compacité urbaine est d'autant plus important dans les mégapoles (+ de 10 million d'habitant) que les métropoles en raison de la forte expansion urbaine.

3.2 Une structure urbaine polycentrique ou monocentrique dans la ville compacte

On associe souvent la ville compacte à une structure urbaine monocentrique. la ville compacte a toujours été une réponse contre l'étalement urbain et la décentralisation (Y. Li, Richardson, & Thornton, 1997). A l'échelle métropolitaine, le concept de la compacité n'exige pas forcément une structure monocentrique. une métropole polycentrique peut être compacte si elle possède les caractéristiques de la compacité urbaine (Jun, 2020). Dans ce cas, les agglomérations ne sont pas nécessairement contiguës mais aussi ne sont pas trop dispersées et doivent être bien reliées avec un système de transport public. dans le cas contraire, la métropole ne peut être considérée comme compacte. La proximité des noyaux urbains est un élément pivot dans une métropole compacte polycentrique. La polycentralité est préférable dans les métropoles compactes car la structure monocentrique dans ces dernières génère d'autres effets négatifs comme la pollution et la congestion routière.

3.3 la forme des bâtiments dans la ville compacte

On associe souvent la ville compacte à des immeubles de grande hauteur. Plusieurs études ont montré que ces derniers ne sont pas forcément denses. Une forte densité peut être atteinte par des immeubles de faible ou de moyenne hauteur. Churchman a montré qu'une densité résidentielle de 230 unités par hectares pourrait être atteinte avec des bâtiments de 5 étages seulement (Churchman, 1999). Une autre étude a montré qu'un immeuble Haussmannien à Paris de 6 étages avec un COS= 5.75 est plus dense qu'un immeuble de 20

étages à Hong Kong avec un COS= 4.32 (Garg). Cela indique qu'une densité élevée n'est pas synonyme d'immeuble de grande hauteur. Le choix des types et des formes de bâtiments sont très important pour la faisabilité dans la création de la ville compacte.

3.4 les espaces ouverts dans la ville compacte

Une autre idée reçue sur la ville compacte porte sur la non disponibilité des espaces ouverts. L'objectif ultime du concept de la compacité urbaine est d'atteindre la durabilité. La qualité environnementale est une notion non négligeable dans la ville compacte.

3.5 Les caractéristiques de la compacité urbaine:

les principales caractéristiques d'une ville compacte sont la densité, la proximité, l'accessibilité aux services et des infrastructures de transports publics adéquates. En d'autres termes, une ville compacte rassemble tous les besoins des citoyens (logement, travail, services) au même endroit. Cette utilisation intensive de l'espace vise à limiter l'étalement de la ville sur les espaces agricoles et naturels, à prendre en compte les besoins de transport des habitants et à optimiser la consommation d'énergie. Les aires urbaines sont proches les unes des autres avec des limites bien définies. La mobilité dépend principalement d'un système de transport public adéquat. La variété et la concentration des services dans une zone délimitée les rend accessibles à pied ou à vélo.

Les villes compactes atténuent l'impact sur l'environnement, avec des distances intra-urbaines plus courtes et une moindre dépendance à l'automobile. Ils jouent un rôle dans l'économie en augmentant l'efficacité des investissements et en facilitant l'accès des résidents aux services et aux emplois. La forme urbaine compacte tend à encourager un développement dense et contigu, réaménager les zones bâties existantes ; améliorer la diversité et la qualité de vie dans les centres urbains et minimiser les effets négatifs indésirables, et cela, à travers l'établissement d'un cadre politique urbain stratégique. En résumé, il existe trois caractéristiques clés de la ville compacte (Belli, Belce, & Gumus, 2014):

La **densité** qui implique l'intensité de l'utilisation de sols, la **proximité** qui concerne la localisation des services et des équipements. La ville compacte est marquée par une utilisation intensive des sols, des agglomérations urbaines contiguës et une frange urbaine claire entre les

centres urbains et les espaces ruraux. La densité et la proximité sont deux éléments physiques et morphologiques majeurs de la compacité urbaine.

un système des **transports publics** facilitant la mobilité; cela indique l'efficacité de l'utilisation des sols

l'accessibilité aux services (mixité fonctionnelle); il s'agit de faciliter l'accès aux services en utilisant des modes de déplacement doux tels que la marche ou le vélo.

4. Atteindre la durabilité à travers la compacité urbaine/comment la ville compacte peut contribuer à améliorer la durabilité urbaine

Tout au long de son histoire, le concept de la ville compacte a évolué pour changé d'échelle et de perspectives; d'une simple politique d'aménagement urbain contrôlant la croissance urbaine pour la protection de l'environnement naturel et des espaces agricoles contre l'étalement urbain à une approche multidimensionnelle visant à atteindre la durabilité urbaine.

En général, les politiques de la ville compactent ont plusieurs effets positifs. Cependant, il existe un large débat sur la question de savoir si ces dernières aident à atteindre les objectifs de la durabilité urbaine (la viabilité économique, la qualité environnementale et l'équité sociale). Les potentiels effets négatifs de la ville compacte nécessitent une attention particulière notamment; la forte densité, la congestion routière, la pollution de l'air, la qualité de vie, l'effet d'îlot de chaleur, la forte consommation d'énergie dans les zones densément construites et le manque d'espaces publiques, des espaces verts et de loisirs. De plus, les villes compactes pourraient être plus vulnérables aux catastrophes naturels comme le séisme et les inondations les zones à haut risque d'inondation ne sont pas propices à la densification.

4.1 Les politiques urbaines à adopter pour une ville compacte durable

Les politiques urbaines peuvent largement contribuer à améliorer la durabilité des villes (Coorey & Lau, 1970). Cependant, il n'existe pas encore une démarche intégrée qui montre comment la ville compacte peut aider à atteindre les objectifs de durabilité urbaine. En revanche, cinq recommandations de politiques urbaines ont été établies pour la réduction des émissions des gaz à effets de serre et la consommation énergétique à travers une bonne conception de compacité, à savoir : D)l'établissement d'un cadre politique fondé sur le concept

de la ville compacte, II) la régénération des centres urbains pour limiter l'étalement urbain, III) l'amélioration de la mixité fonctionnelle, IV) l'intégration des politiques de transport dans l'aménagement urbain, V) l'amélioration de la gouvernance multi-niveaux pour atteindre les objectifs des villes compactes(OECD, 2014a).

4.1.1 L'établissement d'un cadre politique fondé sur le concept de la ville compacte

Une bonne conception d'une ville compacte ne repose pas seulement sur une densité élevée. En effet, une ville dense n'est pas forcément durable. L'établissement d'un cadre politique fondé sur le concept de la ville compacte est nécessaire pour atteindre la durabilité urbaine et ce à travers : la formulation de stratégies de gestion de la croissance urbaine pour limiter l'étalement urbain, la mise en place d'un ensemble de politiques complémentaires aux politiques urbaines pour lutter contre les effets négatifs du développement urbain compact (congestion, pollution, effet d'îlot de chaleur urbain, la dégradation du paysage urbain)telles que la politique des transports et la politique environnementale, la réalisation de stratégies de villes compactes non seulement à l'échelle nationale mais aussi à l'échelle locale pour favoriser la décentralisation des pouvoirs et des décisions, l'établissement d'un guide de planification urbaine fondé sur le concept de la ville compacte respectueux du paysage urbain qui favorise la densité tout en maintenant un équilibre entre le bâti et le non bâti,

4.1.2 La régénération des centres urbains existants pour limiter l'étalement urbain

Pour éviter toute nouvelle expansion urbaine, la régénération des centres urbains existant s'avère nécessaire. Des stratégies efficaces devraient être mises en place pour lutter contre la ségrégation socio-économique et la dégradation des centres urbains existants et limiter la suburbanisation. La politique de régénération urbaine devrait se concentrer sur l'aspect économique, social et environnemental en offrant une meilleure qualité de vie, c'est ce qui fait le choix du lieu de vie.

4.1.3 L'amélioration de la mixité fonctionnelle

L'amélioration de la mixité fonctionnelle au sein de l'espace urbain peut se manifester à travers plusieurs facteurs notamment ; la proximité domicile-travail, facilité d'accessibilité aux services et aux équipements et aux transports publics, la création d'un environnement

favorable aux piétons et à la mobilité douce et l'utilisation rationnelle du foncier. La contribution de la mixité fonctionnelle à la durabilité urbaine est d'une importance particulière car elle participe à la réduction des déplacements motorisés et par conséquent une moindre émission des gaz à effet de serre (CO2), une moindre pollution et une faible consommation des énergies fossiles. De plus, la mixité fonctionnelle améliore la cohésion sociale et la santé des habitants en raison de l'activité physique et a d'innombrables avantages économiques tels que la réduction des frais de transport, l'augmentation de la productivité grâce à des temps de déplacement plus courts pour les travailleurs et une utilisation plus efficace de l'espace et des bâtiments. De ce fait, une utilisation multifonctionnelle de l'espace participe au développement durable à travers ses trois volets ; économique, social et environnemental.

4.1.4 L'intégration des politiques de transport dans l'aménagement urbain

Les opérations d'aménagement urbain doivent être fondées sur le concept du Transit-oriented development (TOD)¹⁶. Le TOD propose des aménagements urbains dans lesquelles les habitants peuvent facilement accéder à pied (c'est-à-dire dans un rayon approximatif de 600 mètres) à un noyau de services et de commerces et à une station de transport collectif("TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT (TOD)"). Ce concept nécessite l'implication des différentes parties prenantes dans le processus de prise de décision. Les stratégies TOD pourraient intégrer des objectifs régionaux, tels que la lutte contre la congestion urbaine, l'amélioration de l'économie locale et l'amélioration de la santé.

4.1.5 L'amélioration de la gouvernance multi-niveaux pour atteindre les objectifs des villes compactes

Le modèle de la ville compacte est une approche intégrée multi-niveaux et multisectorielle. Elle nécessite une coordination administrative, politique, informatique et économique. L'approche intégrée multi-niveaux peut être réalisée grâce à plusieurs facteurs notamment: une vision de long terme, une identification claire des rôles et des responsabilités de tout les acteurs clés et les différentes parties prenantes, une coordination horizontale et

¹⁶TOD : Développé par Peter Calthorpe en 1993, le concept de Transit-orienteddevelopment se veut une approche visant à favoriser l'articulation de l'urbanisation et du transport collectif("TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT (TOD)").

verticale, le travail en réseau, la transparence et un mécanisme de rapports pour mesurer le développement du processus dans la mise en œuvre des actions.

4.2 La contribution de la ville compacte à la durabilité urbaine

En plus des quatre caractéristiques citées précédemment (densité, proximité, transport public et accessibilité), la ville compacte possède six sous-caractéristiques qui contribuent à la durabilité urbaine(OECD, 2012): *I*) courtes distances de déplacements intra-urbains; *II*) une moindre dépendance à la voiture; *III*) génération de l'énergie locale; *IV*) utilisation rationnelle du foncier et des liens urbains-ruraux; *V*)efficacité des services publics; *VI*) accessibilité et diversité des services locaux. La contribution de la ville compacte à la durabilité est présentée dans le Tableau 3 selon (OECD, 2012).

4.2.1 Sur le plan environnemental

La ville compacte est caractérisée par de courtes distances de déplacement intra-urbain et domicile-travail. Elle réduit ainsi la dépendance à la voiture à travers un système de transport public efficace et encourage les modes de déplacements doux tel que la marche et le vélo. La densité urbaine est un paramètre important dans la réduction de la dépendance aux transports motorisés et la consommation d'énergie. La ville compacte permet une utilisation rationnelle du foncier. Elle minimise les fragmentation et lutte contre l'étalement urbain. De ce fait, la compacité urbaine conserve les terres agricoles et protège la biodiversité qui entourent les aires urbaines.

4.2.2 Sur le plan social

La ville compacte améliore la qualité de vie des citoyens, facilite la mobilité et réduit le cout des transports en raison des courtes distances. la ville compacte encourage les habitants à faire l'activité physique en se déplaçant à pied ou à vélo, ce qui est très bénéfique pour la santé de l'homme. La mixité fonctionnelle incluant logement, travail et service offre aux résidents une meilleure possibilité d'accès aux emplois. Des études ont prouvé que la ville compacte joue un rôle important dans l'amélioration de l'équité sociale(Rashid, 2022).

4.2.3 Sur le plan économique

La ville compacte réduit le cout des infrastructures (réseau routier, système d'approvisionnement en eau et d'assainissement ainsi que les différents équipements (Coorey & Lau, 1970). Cette dernière permet aussi d'améliorer l'efficacité des infrastructures et réduit les couts de maintenance.

Les sous-caractéristiques de la ville compacte	Contribution à la durabilité urbaine		
	Avantages environnementaux	Avantages sociaux	Avantages économiques
1. Courtes distances de déplacements intra-urbains	<ul style="list-style-type: none"> •Réduction des émissions de CO2 •Réduction de la pollution due à l'automobile 	<ul style="list-style-type: none"> •Réduction des couts de transport 	<ul style="list-style-type: none"> •Meilleure productivité en raison des courtes distances de déplacement des employeurs
2. Moindre dépendance à la voiture	<ul style="list-style-type: none"> •Réduction des émissions de CO2 •Réduction de la pollution due à l'automobile 	<ul style="list-style-type: none"> •Réduction des couts de transport •Une plus grande mobilité pour les personnes ne possédant pas une voiture •Amélioration de la santé de population grace à la marche et le vélo 	<ul style="list-style-type: none"> •Développement des emplois et de technologies vertes
3. Génération de l'énergie locale	<ul style="list-style-type: none"> •Réduction des émissions de CO2 •Faible consommation énergétique par habitant 	—	<ul style="list-style-type: none"> •Développement des emplois et de technologies vertes •Moindre dépendance énergétique
4. Utilisation rationnelle du foncier et des liens urbains-ruraux	<ul style="list-style-type: none"> •Conservation de la biodiversité et des espaces agricoles 	<ul style="list-style-type: none"> •Plus d'activités récréatives et de loisirs et donc une meilleure qualité de vie 	<ul style="list-style-type: none"> •Développement économique rural (énergie renouvelable, agriculture urbaine...)
5. Efficacité des services publics	—	<ul style="list-style-type: none"> •Bien-être social amélioré par l'efficacité des services 	<ul style="list-style-type: none"> •Faibles investissements en infrastructures et faible couts de maintenance
6. Accessibilité et diversité des services locaux	—	<ul style="list-style-type: none"> •Meilleure qualité de vie grâce à une facilité d'accessibilité aux services 	<ul style="list-style-type: none"> •Main d'œuvre qualifiée attirée par une meilleure qualité de vie •Plus de productivité grâce à la diversité, la vitalité, l'innovation et la créativité

Tableau 3: Contribution de la ville compacte à la durabilité urbaine (OECD, 2012)

5. Contexte urbain actuel: le besoin de la mise en œuvre de l'approche de la compacité urbaine

Les études sur les tendances urbaines actuelles soulignent l'importance de la mise en œuvre de l'approche de la compacité urbaine. Parmi ces tendances, on note:

La croissance démographique et urbaine: en 2050, le taux de la population vivant en ville devrait avoisiner les 70%(Sodiq et al., 2019), cette croissance démographique continue souligne l'importance de la préservation des sols. La croissance démographique est souvent accompagnée par une expansion urbaine rapide et une très forte consommation des ressources foncières. L'approche de la compacité urbaine joue un rôle très important dans la lutte contre cet expansion urbaine.

Le réchauffement climatique: le changement climatique menace plusieurs villes dans le monde. Les émissions des gaz à effet de serre ne cessent d'augmenter causant ainsi une augmentation de la température de 1.7 à 2.4° C d'ici 2050 (Kamal-Chaoui, 2008). Etant donné que le secteur de transport est la principale cause de l'augmentation des gaz à effet de serre (Kamal-Chaoui, 2008) et que les villes actuelles sont très dépendantes de la voiture, l'approche de la compacité urbaine peut réduire l'émission de CO2 due aux transports d'une manière considérable dans.

La forte consommation énergétique: durant ces dernières décennies, la forte demande en énergie ne cesse d'augmenter. la compacité urbaine affecte de manière considérable le comportement de déplacement et le choix du lieu d'habitation, ce qui a pour conséquence la production de villes moins énergivores.

5.1 les cinq recommandations pour les stratégies de la ville compacte

Cinq recommandations ont été établies pour les stratégies de la ville compacte (Anabtawi, 2023). Premièrement, il s'agit d'établir les objectifs de ville compacte à travers un cadre politique national, régional ou local. La deuxième recommandation encourage un développement dense et de proximité; par exemple par la promotion de formes urbaines moins consommatrices de l'espace et le réinvestissement dans les milieux ruraux pour assurer leur dynamisme et le maintien des services de proximité. La troisième recommandation concerne le réaménagement des aires urbaines existantes; cela leur permet d'accueillir de nouvelles activités; Parmi les stratégies efficaces pour atteindre cette recommandation, on

note, l'aménagement des friches urbaines, la régénération des zones résidentielles à faible densité et l'intensification des espaces urbains existants. La quatrième recommandation vise l'amélioration de la diversité et de la qualité de vie; une faible diversité peut causer une utilisation inefficace des infrastructures et de l'espace urbain. la qualité de vie est un élément essentiel pour l'attractivité dans les centres urbains, les espaces publics et les espaces verts y sont des éléments très attractifs favorisant ainsi un environnement piéton et cyclable. La cinquième recommandation vise à minimiser les effets négatifs de la compacité urbaine comme la lutte contre la congestion routière.

6. L'évaluation de la performance de la ville compacte

L'évaluation de la performance de la ville compacte nécessite des études et des indicateurs quantitatifs à fin que les décideurs politiques appuient leurs décisions sur des données fiables pour améliorer leurs actions. La compacité peut se mesurer de différentes manières. la densité de population montre l'intensité de l'utilisation des sols. les cartes d'occupations des sols montre les caractéristiques spatiales des aires urbaines. Les distances de déplacement peuvent servir comme un indicateur de proximité. La correspondances entre les services locaux et les habitations indique la bonne accessibilité.

Plusieurs études ont tenté d'établir un ensemble d'indicateurs pour l'évaluation de la performance de la ville compacte qui sont essentiels au suivi , à l'estimation de ses actions, à l'établissement de futurs objectifs et qui aident à la prise de décisions. L'Organisation de Coopération et de Développement Economiques(OCDE, 2012)a établi 18 indicateurs répartis en deux types: le premier type concerne les indicateurs liés aux trois caractéristiques de la ville compacte cités précédemment (densité et proximité, système de transport public efficace et l'accessibilités aux différents services); le deuxième type d'indicateurs concerne l'évaluation de l'impact de la compacité sur la durabilité urbaine en termes de qualité environnementale, équité sociale et viabilité économique. Le Tableau 4 représente ces 18 indicateurs.

La première catégorie des indicateurs évalue:*i*) la densité de chaque activité urbaine (densité de population, densité de logement ou densité résidentielle, densité d'emplois) par

rapport à une unité de surface, elle peut être brute (inclut toutes les occupations de sol dans une surface donnée) ou nette (exclut la voiries et les espaces publiques), le COS¹⁷ est aussi un indicateur important de densité urbaine;ii)la proximité représente la dispersion des différentes activités à travers le paysage urbain. Elle est mesurée par les distances de déplacements . Plus des distances sont courtes, plus des agglomérations sont proches les unes des autres. Les distances mesurées sont: les distances domicile-travail, aux loisirs, aux commerces, etc. En plus de la distance de déplacement, le temps de déplacement est aussi un paramètre important à prendre en compte.iii)Le système de transport public: la ville compacte implique une forte mobilité intra-urbaine et une moindre dépendance à la voiture. Un système de transport public efficace et adéquat s'avère nécessaire. L'indicateur le plus utilisé à cette fin est le pourcentage de population utilisant le transport public. D'autres paramètres nécessaires à l'évaluation de l'approvisionnement en transport public sont: la longueur des lignes du transport public, le nombre de stations et l'accessibilité aux destinations. De toute façon, les opérations d'aménagement urbain doivent être fondées sur le concept du Transit-oriented-development (TOD)¹⁸. Le TOD propose des aménagements urbains dans lesquelles les habitants peuvent facilement accéder à pied (c'est-à-dire dans un rayon approximatif de 600 mètres) à un noyau de services et de commerces et à une station de transport collectif. iv)L'accessibilité aux services: il est important de distinguer l'accessibilité de la mobilité. Une zone résidentielle avec un réseau viaire bien desservi pour atteindre les différents services dans les centre urbains ne peut être considérée comme une zone accessible pour les habitants ne possédant pas une voiture. L'accessibilité dans la ville compacte désigne la présence des services de premières nécessité dans les quartiers, qui sont ainsi accessibles à pied ou à une courte distance en transport commun. De ce fait, l'accessibilité reflète la mixité fonctionnelle. Le deuxième type d'indicateurs mesurent l'évaluation de l'impact de la

¹⁷COS: le coefficient d'occupation du sol est exprimé par le rapport de la surface constructible sur la surface de la parcelle.

¹⁸TOD : Développé par Peter Calthorpe en 1993, le concept de Transit-orienteddevelopment se veut une approche visant à favoriser l'articulation de l'urbanisation et du transport collectif("TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT (TOD),").

compacité sur la durabilité urbaine en termes de qualité environnementale, équité sociale et viabilité économique.

	Catégorie	Indicateurs	Description
Indicateurs relatifs à l'évaluation de la performance de la compacité urbaine	Densité et proximité	1. Densité de population	•Taux annuel de croissance de la population
		2. Croissance urbaine	•Taux annuel de croissance urbaine
		3. Régénération des centres urbains existants	•Taux de développement urbain qui se produit sur les terrains urbains existants plutôt que sur les terrains vierges,
		4. Intensité d'utilisation des bâtiments	•Pourcentage de logements et des équipements vacants
		5. La forme des constructions	•Pourcentage de l'habitat collectif
		6. Distance de déplacement	•Distance moyenne des migrations pendulaires
		7. Occupation urbaine des sols	•Pourcentage de l'occupation urbaine dans l'aire métropolitaine
	Système de transport public reliant les agglomérations urbaines	8. Population utilisant le transport public	•Pourcentage de population utilisant le transport public
		9. Proximité au transports publics	•Pourcentage de population ayant accès à pied aux stations de transports publics (moins de 500m)
	Accessibilité aux services locaux	10. Relation domicile-	•Equilibre logement-emploi à l'échelle de quartier
		11. Relation domicile-services locaux	•Equilibre logement-services à l'échelle de quartier
		12. Proximité des services locaux	•Pourcentage des services accessible à pied
		13. Déplacement à pied et à vélo	•Pourcentage des déplacements à pied et à vélo
Indicateurs relatifs à l'évaluation de l'impact de la compacité sur la durabilité urbaine	Sur le plan environnemental	14. Espaces publics et espaces verts	•Accessibilité aux espace publics à pied ou à vélo
		15. Consommation énergétique dans le secteur de transport	•Consommation énergétique par le transport par habitant
		16. Consommation énergétique dans le secteur résidentiel	•Consommation énergétique par logement
	Sur le plan Social	17. Abordabilité	•Part des dépenses consacrés au logement et au transport
	Sur le plan économique	18. Services publics	•Dépenses liées à la maintenance des infrastructures urbaines

Tableau 4: Les indicateurs pour l'évaluation de la performance de la compacité urbaine (OCDE, 2012)

7. Les différentes méthodes de calcul de la compacité

Les indicateurs urbains sont des outils efficaces conçus pour simplifier, quantifier et communiquer des informations pertinentes sur l'environnement urbains aux planificateurs et urbanistes. Ce sont des données obtenues à partir d'un ensemble statistique et qui possèdent une signification et une représentativité particulières. Les indicateurs urbains sont des instruments capables de délivrer de l'information sous forme synthétique à travers de différentes représentations (nombres, graphiques, cartes thématiques, etc.).

Autrefois, des indicateurs de densité urbaines ont été utilisés pour évaluer la compacité urbaine. Cependant, ces derniers ne constituent pas une donnée fiable pour refléter la réalité de la compacité urbaine (Haque, 2014). La façon de mesurer la compacité urbaine par le biais des indicateurs de densité urbaine (densité de population, densité de logement, densité du bâti, l'emprise au sol...) ne s'avère plus pertinente (Rousseaux, 2009). En effet, les deux concepts sont différents tel qu'expliqué précédemment. D'autres études ont mesuré la compacité en évaluant la proximité à travers le calcul des déplacements domicile-travail (Le Néchet, 2010). Cette méthode ne prend en compte qu'un seul aspect de la compacité urbaine. Récemment, des études ont tenté d'établir des méthodes de calcul de la compacité urbaine et différents outils ont été utilisés en exploitant les données géospatiales. Ces dernières varient de la plus simple à la plus compliquée.

7.1 Formule d'évaluation de la compacité urbaine développée par le projet CAT-MED

CAT-MED est un projet qui réunit 11 villes européennes méditerranéennes (Malaga, Séville, Valence, Barcelone, Marseille, la Communauté du Pays d'Aix, Gênes, Turin, Rome, Athènes et Thessalonique) qui a travaillé sur la définition de modèles urbains plus durables en Méditerranée. Ce travail de recherche-action qui mêle définition et calcul d'indicateurs a aboutit à la constitution d'un Référentiel d'indicateurs définis sur la base d'une approche systémique du développement durable. Pour chaque indicateur, des valeurs optimales sont définies. Ce processus a permis de construire un modèle commun et un guide méthodologique pour l'évaluation de la configuration de la ville structuré autour de 5 axes, à savoir: la densité de population, la compacité urbaine, la complexité urbaine, les espaces verts et zones de loisirs ainsi que la proximité des espaces verts et zones de loisirs.

En ce qui concerne la compacité urbaine, le projet CAT-MED la définit comme étant "le rapport entre l'espace utilisable des bâtiments et l'espace occupé par la superficie urbaine (surface)"(Chang, Sabatini-Marques, Da Costa, Selig, & Yigitcanlar, 2018). Selon le projet CAT-MED, la compacité urbaine reflète l'idée de proximité ce qui permet d'optimiser la gestion d'une des ressources naturelles les plus importantes qui est le sol. Toutefois, ce dernier souligne les effets négatifs dues à une compacité excessive qu'il faut corriger en introduisant des espaces verts et des espaces publics de qualité (voir la compacité urbaine corrigée ci-dessous).

Cette démarche nécessite des données cadastrales numérisées des bâtiments incluant la superficie et le nombre d'étages de chacun des polygones représentant les bâtiments. Il s'agit d'estimer l'espace utilisable (le volume) occupé par chaque bâtiment en multipliant le nombre d'étages de chaque polygone par une constante donnée représentant la hauteur de chaque étage (par exemple, 3 mètres). De ce fait la compacité urbaine est exprimée par le rapport entre la somme des volumes des bâtiments sur la somme de la surface au sol des bâtiments selon la formule (1). La compacité urbaine corrigée est exprimée par le rapport entre la somme des volumes des bâtiments sur la tache urbaine totale c'est à dire les espaces urbanisés selon la formule (2). l'unité de mesure est exprimée par mètres (mètres cubes / mètres carrés). CAT-MED estime que le niveau souhaitable de compacité absolue minimale semble se situer aux alentours de 5 mètres.

$$\text{Compacité urbaine absolue} = \frac{\sum \text{Volume bâti}}{\sum \text{Surface au sol des bâtiments}} \quad (1)$$

$$\text{Compacité urbaine corrigée} = \frac{\sum \text{Volume bâti}}{\sum \text{tache urbaine}} \quad (2)$$

7.2 La télédétection pour l'évaluation de la forme urbaine

Les villes sont des systèmes complexes et dynamiques qui constituent un défi important pour la planification urbaine. L'intégration et la corrélation de multiples outils d'analyse (Systèmes d'Information Géographique - SIG), types de données (images satellitaires, données vectorielles¹⁹ ou statistiques) et sources de données (observation de la Terre, enquête ou recensement) est un élément pivot pour l'augmentation de la qualité de l'information urbaine. La télédétection est un moyen efficace pour collecter les informations sur l'environnement urbain pour construire les indicateurs urbains ayant généralement comme source principale une image spectrale obtenue via un satellite ou une caméra aéroportée.

Étant donné que les données urbaines ont une forte représentation spatiale, les données géospatiales sont utilisées comme base pour construire des informations sur les environnements urbains. Une importante source d'information sur l'état de l'environnement urbain est l'imagerie recueillie par télédétection. Ensuite, en utilisant des techniques de traitement d'images numériques, des détails thématiques peuvent être extraits de ces images et utilisés pour construire des indicateurs urbains.

7.2.1 Le lidar pour l'évaluation tridimensionnelle de la forme urbaine

Le lidar est un outil de télédétection, acronyme de "*laser imaging detection and ranging*" qui signifie en français "détection et estimation de la distance par la lumière". C'est une technique de télémétrie laser, de mesure à distance qui utilise des ondes électromagnétiques entre le vecteur aérien et la surface terrestre. Ces dernières années, le lidar est largement utilisé en milieux urbains pour la cartographie et la reconnaissance des formes des bâtiments. Ces capteurs acquièrent des informations altimétriques et sont utilisés pour produire des modèles numériques de surface²⁰ (MNS). Ces mesures de distance sont

¹⁹Les données vectorielles sont une représentation des objets ou de l'environnement urbain à l'aide de points, de lignes et de polygones, ce sont des données basées sur des coordonnées qui représentent les entités géographiques ("Dictionnaire SIG").

²⁰MNS: les modèles numériques de surface (MNS) sont des représentations simplifiées de l'altimétrie du sol qui reproduisent la forme de la surface terrestre en incluant tous les éléments permanents et visibles du paysage tels que le sol et les bâtiments ("Modèle numérique de surface (MNS)").

transformées en nuages de points 3D²¹. Quelques études récentes ont utilisé le lidar (Koziatek & Dragičević, 2017; Santos, A.M.Rodrigues, & Tenedório, 2013; Shirowzhan, Sepasgozar, & Trinder, 2021) pour visualiser des informations sur les développements urbains spatio-temporels verticaux dus aux tendances à l'augmentation de la hauteur des bâtiments dans les différents tissus urbains pour établir d'éventuels scénarios.

7.2.2 Les outils SIG et les indices paysagers pour l'évaluation de la configuration et la composition spatiale de la forme urbaine compacte

Dans l'ouvrage intitulé " *Spatial Modeling and Assessment of Urban Form Analysis of Urban Growth: From Sprawl to Compact Using Geospatial Data* " ou " *Modélisation spatiale et évaluation de la forme urbaine Analyse de la croissance urbaine : de l'étalement à la compacité à l'aide de données géospatiales*", Saleh Abdullahi et Biswajeet Pradhan ont établi un processus méthodologique pour l'évaluation de la compacité urbaine en utilisant un ensemble d'indicateurs paysagers (Abdullahi & Pradhan, 2017).

Ces indices paysagers évaluent la compacité urbaine en permettant une analyse quantitative du paysage pour décrire objectivement la composition et la configuration spatiale. C'est à dire la distribution physique, l'arrangement, et le positionnement des bâtiments au sein de la mosaïque paysagère urbaine évaluant ainsi leur caractère spatiale (taille, forme, juxtaposition, cohésion, agrégation...). Ces indices sont: l'indice de forme, l'indice de forme du paysage, la densité de lisières, l'indice du cercle circonscrit, la densité des patches, l'indice du plus grand patch, le rayon de giration, l'indice d'agrégation, l'indice d'équitabilité de Simpson et l'indice de diversité de Shannon.

Le calcul de ces indices paysagers s'effectue sur des images en mode raster²². Le mode raster est très utilisé dans le domaine de la télédétection pour stocker les données géospatiales captées par un satellite et qui sont prises sur la surface terrestre.

²¹Un nuage de points est une représentation numérique 3D d'un objet ou d'un espace. Il se compose de millions de points, dont chacun est placé selon des coordonnées x, y et z. les nuage de points ne sont pas liés entre eux, à l'inverse d'autres modes de représentations 3D comme les maillages (mesh), (Sibué, 2022).

²² Un raster est une image matricielle composée de cellules organisées en lignes et en colonnes. Chaque cellule de cette grille est un pixel unique. Chaque pixel a des valeurs (valeurs pour définir sa couleur ou sa valeur

Un raster est une matrice de pixels, c'est une grille composée d'une suite de chiffres. Chaque pixel contient une valeur représentant des informations. Les photographies aériennes et les images satellitaires sont des images raster. Les données stockées sur les rasters représentent des phénomènes réels comme les données sur l'occupation du sol, la température et l'altitude. La classification d'une image satellite selon les catégories d'occupation du sol résulte une image raster en attribuant une valeur catégorielle²³ à chaque pixel à partir des valeurs multispectrales contenues dans les bandes spectrales composant les images géospatiales. Les images satellites combinent, sur plusieurs canaux, des mesures différentes de radiométrie qu'il faut combiner au moyen de compositions colorées. Le raster obtenu comporte un compte numérique et il est déterminé par une résolution spatiale (la taille du pixel).

Le calcul des indices paysagers se fait sur le logiciel FRAGSTATS (Kevin McGarigal & Barbara J. Marks, 1995). Ce logiciel traite les données raster sous format ASCII²⁴ pour le calcul des indices paysagers.

7.3 Le choix de la méthode d'évaluation de la compacité urbaine

La formule d'évaluation de la compacité urbaine développée par le projet CAT-MED présente deux inconvénients: non seulement cette méthode ne prend pas en compte la distribution physique des bâtiments au sein de l'environnement urbain, c'est à dire leur positionnement et arrangement les uns par rapports aux autres donc elle n'est pas capable de quantifier la compacité physique réelle ce qui donne des résultats non fiables, mais aussi elle nécessite la donnée sur la hauteur de chaque bâtiment qui n'est pas disponible dans les documents d'urbanisme de notre aire d'étude.

de réflectance). C'est l'association de tous les pixels, chacun à une certaine place dans l'espace de la grille, qui crée une image("Wikitionnaire,").

²³ Une valeur catégorielle est une donnée associée à une catégorie spécifique, comme exemple une modalité d'occupation du sol (Wikipedia).

²⁴ASCII : American Standard Code for Information Interchange (Code américain normalisé pour l'échange d'information) est un format des fichiers textes, c'est une norme informatique de codage de caractère (LAROUSSE).

La deuxième méthode de télédétection utilisant l'outil lidar pour l'évaluation tridimensionnelle de la forme urbaine s'est avérée impossible pour notre étude. D'abord, parce que les données lidar relatives à notre aire d'étude sont inaccessibles voir Figure 5. En plus, il existe un manque de méthodes fiables pour analyser les informations sur la hauteur afin de modéliser la distribution des hauteurs des bâtiments et de détecter automatiquement les modèles urbains tridimensionnels (Shirowzhan et al., 2021). Ce qui rend la tâche du calcul de la compacité en exploitant les données lidar très compliquée. En effet, les études qui ont exploité les données lidar dans le milieu urbain se sont concentrées sur le développement des mesures théoriques identifiant les modèles de développements urbains pour prévoir des scénarios possibles de croissance urbaine verticale.

La méthode de l'évaluation de la compacité urbaine en exploitant les données de télédétection et en utilisant les outils SIG et le logiciel FRAGSTATS pour le calcul des indices paysagers s'avère la méthode la plus fiable pour notre étude. Ces indices permettent une analyse quantitative du paysage pour décrire objectivement la composition et la configuration spatiale. C'est à dire la distribution physique, l'arrangement, et le positionnement des bâtiments au sein de la mosaïque paysagère urbaine évaluant ainsi leur caractère spatiale (taille, forme, juxtaposition, cohésion, agrégation...).

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE NATIONALE
INSTITUT NATIONAL DE CARTOGRAPHIE
ET DE TÉLÉDÉTECTION

123, rue de Tripoli - B.P 430 - 16040 Hussein Dey - Alger



وزارة الدفاع
المعهد الوطني للخرائط والكشف عن بعد
 و التلديتكتيون

123, شارع طرابلس - ص.ب 430 - 16040 حسين داي - الجزائر

Comptes B.E.A : 00 200022220226157008
 C.C.P :1552;04 clé 12
 RC :9695/699 - I.F:0 99916000969572 - A.I:16175090011
 Siege :123,rue de Tripoli - BP 430 - Hussein Dey - Alger
 Tél : (23) 79 50 26
 Fax : 213(23) 79 50 27

DEVIS N° 088/2022

Boudalia Chahrazed
 FAX 043 56 43 66

DATE : 22/05/2022
 Référence : 21/DH/2022 du 13/04/2022

DESIGNATION	UNITE	QTE	P.U	MONTANT
Fourniture d'un fond cartographique au 1/1 000 (donnée vectorielle en 3D, année 2012-2013,couvrant la commune d'Oran d'une superficie d'environ 2513 ha	ha	2513	2 138,23	5 373 371,99
HT				5 373 371,99
TVA 19%				1 020 940,68
TOTAL TTC				6 394 312,67

Arrêté le présent devis à la somme de :
 Six millions trois cent quatre vingt treize mille trois cent douze dinars et 67 cts

Modallité de paiement : Règlement à la commande
 Validité de l'offre : 30 jours

N.B :Sous reserve de l'autorisation

P/LE DIRECTEUR GENERAL DE L'INSTITUT
 NATIONAL DE CARTOGRAPHIE
 ET DE TELEDETECTION

إمضاء : المقدم جابر انور

وزارة الدفاع الوطني
 المعهد الوطني للخرائط والكشف عن بعد
 م.و.خ.ك.ب
 المديرية الفرعية للتجارة

Tél: +213 21 491 694 / 96 / 97, Fax: +213 21 491 688 / 91, e-mail: contact@inct.dz, inct@mdn.dz, site web: inct.mdn.dz
 Comptes: B.E.A: 00200022220226157008, C.C.P: 1552.04 clé 12
 RC: 16/00-0009695/699 - N.I.F: 099916000969 672 - A.I: 1 6175090011

Figure 5: Attestation de demande du devis des données LIDAR.

8. Compacité urbaine , qualité de l'air et santé des habitants: une revue de littérature

Si l'on veut résumer quelque vingt ans de débat scientifique sur l'interaction entre la forme urbaine compacte, la qualité de l'air et la santé des habitants, on peut établir que :

8.1 Les avantages de la compacité urbaine

Dans la littérature, Le consensus commun est que les villes les plus compactes et plus denses sont plus durables et donc plus favorable à la santé(Burton et al., 2003; Dantzig et al., 1973; M. Jenks et al., 1996; P. G. Newman & Kenworthy, 1989; L. Thomas & W. J. Cousins, 1996). La forme urbaine compacte est toujours considérée comme la solution pour une ville durable. En effet, comparé à l'étalement urbain, la compacité peut améliorer la durabilité grâce à plusieurs facteurs, notamment : la réduction de la consommation des sol et de l'énergie, la réduction des déplacement motorisés en favorisant la proximité et l'accessibilité et donc la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la mixité fonctionnelle et donc la diversité sociale, l'augmentation de l'activité physique en favorisant les déplacements actifs et donc une moindre dépendance à la voiture. En 1973, Dantzig et Saaty ont publié un ouvrage intitulé *“Compact City: A Plan for a LiveableUrbanEnvironment”* dans lequel ils ont développé le terme de la ville compacte(Dantzig et al., 1973) et ont écrit *“Le modèle de la ville compacte est la meilleure solution pour la conception d'une forme urbaine durable”*. Motivés par la volonté de promouvoir une utilisation plus efficace des ressources, les auteurs ont tenté de s'opposer aux phénomènes de ville diffuse²⁵, de périurbanisation ou d'étalement urbain, signalant ainsi le gaspillage d'espace, la pollution générée par l'urbanisation, la forte consommation des ressources et d'énergie, l'atteinte au patrimoine naturel, à la biodiversité et à la qualité des paysages. Cette idée a reçu l'appui de Jenks et al. et Thomas & Cousins qui considèrent la ville des courtes distances comme le prototype idéal d'une vie urbaine plus vivable, plus sociable et plus interactive, une ville qui promeut la durabilité environnementale, sociale et

²⁵ La ville diffuse est un concept caractérisant une évolution urbaine non planifiée, couvrant parfois des surfaces importantes, dans un stade extrême du mitage rural. Morphologiquement, l'habitat se superpose à la fonction agricole antérieure sans l'effacer complètementSelonGrosjean (2012),.

globale en augmentant la densité de la zone bâtie et de la population résidentielle, en intensifiant les activités économiques, sociales et culturelles urbaines et en manipulant la taille, la forme et la structure urbaine(M. Jenks et al., 1996; L. Thomas & W. J. Cousins, 1996).

Dans l'ouvrage le plus cité sur l'urbanisme dépendant de la voiture “ *Cities and automobile dependence: An international sourcebook*”, Newman et Kenworthy prônent la forme urbaine compacte et la considèrent comme une forme urbaine optimale et durable(P. G. Newman & Kenworthy, 1989), mettant en avant le fait que ce modèle de ville favorise l'utilisation des transports publics, permet une bonne accessibilité aux services et réduit les distances parcourues et donc une moindre dépendance aux déplacements motorisés. La voiture a accru les effets du changement climatique. Le transport motorisé est une cause majeure des émissions de gaz à effet de serre qui menacent la santé humaine. Les expositions et les pratiques liées au transport urbain sont associées à une charge importante de morbidité et de mortalité prématurée. C'est pour cette raison que la quête d'un développement urbain durable s'est traduite d'abord dans les politiques de transport en passant de “l'adaptation de la ville à l'automobile” des années 1960-1980 à un objectif de réduction de la place de l'automobile dans les déplacements urbains à partir des années 1990.

Le développement urbain durable s'est aussi traduit dans la quête d'une forme urbaine optimale ce qui a débouché, dans la littérature scientifique internationale, sur la formulation du modèle de la ville compacte(M. Jenks et al., 1996; L. Thomas & W. J. Cousins, 1996), très exploré dans la littérature des années 1990. Elle s'affiche donc bien comme l'antonyme de l'étalement urbain(Gordon & Richardson, 1997). Ce modèle a inspiré de nombreuses politiques d'urbanisme comme le mouvement de la “reconstruction de la ville sur elle-même”(Theys & Emelianoff, 2001) et le “nouvel urbanisme²⁶” aux États-Unis (Ouellet, 2006).

Il a été démontré que la forme urbaine compacte favorise une meilleure santé urbaine (Gleeson, 2012). Une forte compacité urbaine diminue les distances parcourues et produit une

²⁶Le nouvel urbanisme appelé aussi néo-urbanisme, est un courant urbanistique qui s'est développé depuis les années 1980 aux États-Unis, il reprend les principes traditionnels de l'urbanisme et de la morphologie urbaine tout en s'abstenant à reproduire des styles architecturaux traditionnels(Dupuis, 2009).

ville des courtes distances qui favorise le report vers les modes de déplacement alternatifs et doux comme la marche et le vélo ce qui non seulement participe à la réduction des émissions des gaz à effet de serre jugés très nocifs pour la santé, mais aussi augmente l'activité physique qui est très recommandée pour la bonne santé (Burton et al., 2003; Cervero & Kockelman, 1997; L. Thomas & W. J. Cousins, 1996). En outre, les zones les plus compactes et denses sont plus faciles à desservir par les transports en commun (Kenworthy & Laube, 1999).

8.2 Les inconvénients de la compacité urbaine

Bien que des recherches dans la littérature font état d'effets positifs associés à la forme urbaine compacte et la plupart des politiques urbaines mènent sa promotion (Ahlfeldt et al., 2018) et que la densification soit considérée comme une figure consensuelle de l'action publique urbaine pour un urbanisme favorable à la santé, la ville compacte fait aussi l'objet de nombreuses controverses scientifiques et ce sur différents aspects qui concernent son efficacité, son acceptabilité ou encore le modèle de qualité de vie et d'équité urbaine qu'elle sous-tend. Une forte densité urbaine ou compacité urbaine peut également affecter la santé des habitants par : le surpeuplement, le manque d'espaces verts qui peut réduire les possibilités d'activités favorables à la santé telles que l'activité physique en plein air et les loisirs qui réduisent le stress, une forte exposition au bruit et à la pollution atmosphérique, l'effet d'îlot de chaleur ainsi qu'une forte congestion urbaine et donc un niveau élevé de stress. Des niveaux élevés de compacité sont associés à de forts niveaux de congestion urbaine et nuisances sonores, ce qui n'est pas sans conséquence sur la santé. En effet, l'OMS pointe les trois principaux effets sanitaires associés aux bruits de l'environnement et qui sont : troubles du sommeil, problèmes cardio-vasculaires et gêne psychologique (WHO, 2018). Le postulat de son efficacité en matière d'effets sur la mobilité est contesté par de nombreux chercheurs parce que les variables socio-économiques ne sont pas pris en compte dans la plupart des recherches qui préconisent la ville compacte et dense alors qu'elles ont une influence considérable dans la détermination des schémas de mobilité (Nessi, 2010). De surcroît, Jean-Pierre Orfeuill et Danièle Soleyret ont observé un "effet barbecue"²⁷ dans les zones les plus

²⁷ L'effet barbecue est énoncé par Jean-Pierre Orfeuill et Danièle Soleyret en 2002 qui ont démontré que les habitants des zones urbaines denses et ayant au quotidien un mode de vie avec une grande efficacité énergétique, seraient finalement plus énergivores en raison d'une mobilité occasionnelle ayant un fort impact. L'effet barbecue remet en question les vertus attribuées à la ville dense en matière de

denses en démontrant que les habitants du centre-ville, qui manque d'espaces verts, ont tendance à voyager plus loin et donc effectuer des déplacements à longues distance que ceux qui résident dans les espaces périphériques(Orfeuil & Soleyret, 2002).

La forme urbaine compacte qui implique la mixité fonctionnelle et qui est censée améliorer la mixité et l'équité sociale (Burton et al., 2003), est contestée par de nombreux chercheurs qui soulèvent la question de l'acceptabilité sociale de la densification (Dempsey, 2010) en pointant l'opposition fréquente des habitants des zones que l'on souhaite densifier. D'autres déplorent la détérioration du cadre de vie. En effet, Une ville compacte risque de générer une réduction des espaces de vie, pouvant être considérée comme néfaste à la qualité de vie et ne correspondant pas aux attentes des habitants. Une compacité élevée avec un nombre important d'habitants dans un espace limité peut influencer sur le taux de morbidité et de mortalité en raison des multiples nuisances qu'elle génère : pollution de l'air, pollution sonore, pollution lumineuse, augmentation des embouteillages, perte d'espaces verts, surpopulation(Burton, 2000). De ce fait, cette dernière a pour conséquence de générer des effets négatifs sur le bien-être entraînant l'anxiété, le stress et l'exclusion sociale (Churchman, 1999). La compacité morphologique peut affecter négativement la perception de l'espace en raison des ombres, du manque d'espaces ouverts et peut donner une impression visuelle de manque de proportion(Hitchcock, 1994). La mixité de l'espace entraîne des activités bruyantes dans les zones résidentielles, ce qui augmente les niveaux de stress(World Health, 2012).

Par ailleurs, une autre partie de la littérature a examiné le rapport entre la forme urbaine compacte et la qualité de l'air mais avec des résultats contradictoires. Si la grande vertu de la ville compacte est la réduction des émissions de polluants en limitant la demande de déplacements et en facilitant les économies d'énergie, une pollution est tout de même émise et la compacité risque d'en limiter la dispersion, augmentant l'exposition des populations résidentes à la pollution atmosphérique. L'exposition des populations aux polluants fait de la qualité de l'air un enjeu majeur de la santé publique. La pollution de l'air est devenue une véritable menace de la santé urbaine en raison des maladies cardiovasculaire et respiratoires qu'elle génère(Holgate, 2022; Kelly & Fussell, 2015). Les émissions des

véhicules sont progressivement devenues l'une des principales sources de pollution de l'air dans les zones urbaines(OECD, 2014b). Nombreuses études ont donc exploré le lien entre la forme urbaine et la qualité de l'air. Certains chercheurs ont plaidé en faveur d'une forme urbaine compacte caractérisée par une forte densité, une utilisation mixte des sols et une meilleure accessibilité, en raison des courtes distances et une meilleure accessibilité aux transports en commun, réduisant ainsi le nombre de kilomètres parcourus par les véhicules (KPV) (Hoffmann, 2019; Venkatram & Schulte, 2018) et minimisant donc les émissions des gaz à effet de serre ainsi que la concentrations des polluants dans l'air. Toutefois, d'autres études ont montré que le développement compact peut entraîner une augmentation des sources de pollution, la congestion et des concentrations plus élevées de polluants atmosphériques, réduisant ainsi la qualité de l'air (Cárdenas Rodríguez et al., 2016; Yuan et al., 2018). En outre, une forme urbaine compacte peut provoquer des effets d'îlot de chaleur urbain, et une température de l'air plus élevée ce qui favorise la formation d'O₃ (ozone) et du NO_x (l'oxyde d'azote), des gaz irritants qui, à fortes concentrations, peuvent pénétrer jusqu'aux voies respiratoires et causer de graves problèmes sanitaires(Ulpiani, 2021; Wang et al., 2021).

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de bien assimiler le concept de la ville compacte et de faire le point sur ses avantages et ses inconvénients ainsi que sa relation avec la qualité de l'air et la santé des habitants. De plus, la recherche sur les différentes méthodes d'évaluation de la compacité urbaine nous a permis d'opter pour la méthode de l'exploitation des données de télédétection, en utilisant les outils SIG et le logiciel FRAGSTATS pour le calcul des indices paysagers qui s'avère la méthode la plus fiable pour notre étude. Ces indices permettent une analyse quantitative du paysage pour décrire objectivement la composition et la configuration spatiale. C'est à dire la distribution physique, l'arrangement, et le positionnement des bâtiments au sein de la mosaïque paysagère urbaine évaluant ainsi leur caractère spatiale (taille, forme, juxtaposition, cohésion, agrégation...).

Nous concluons que bien que la forme urbaine compacte soit admise comme un modèle pour un développement urbain durable et soit connue pour ses effets positifs concernant la réduction de la consommation des sol et de l'énergie, la réduction des déplacement motorisés en favorisant la proximité et l'accessibilité et donc la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la mixité fonctionnelle et donc la diversité sociale, l'augmentation de l'activité physique en favorisant les déplacements actifs et donc une moindre dépendance à la voiture. La forme urbaine compacte qui s'affiche comme l'antonyme de l'étalement urbain peut également présenter l'inconvénient de pouvoir générer des effets négatifs qui vont à l'encontre de la durabilité urbaine, à savoir; le surpeuplement, le manque d'espaces verts qui peut réduire les possibilités d'activités favorables à la santé telles que l'activité physique en plein air et les loisirs qui réduisent le stress, une forte exposition au bruit et à la pollution atmosphérique, l'effet d'îlot de chaleur ainsi qu'une forte congestion urbaine et donc un niveau élevé de stress.

Chapitre III: Polluants atmosphériques et qualité de l'air en milieu urbain

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons mettre en évidence l'importance de la prise en compte de la qualité de l'air en milieu urbain en pointant du doigt que la plupart des habitants de la ville sont exposés à des concentrations de polluants atmosphériques supérieures à la valeur moyenne annuelle préconisée par l'OMS. Nous exposons les différents polluants atmosphériques ((Les particules en suspension $PM_{2.5}$ et PM_{10} , Monoxyde de carbone (CO), Ozone (O₃), Dioxyde de soufre (SO₂), Dioxyde d'azote (NO₂), Oxyde d'azote NO_x) et leurs effets sur l'environnement et la santé humaine. Nous expliquons en détail l'oxyde d'azote NO_x que nous abordons dans notre étude, en mettant l'accent sur ses effets sur la santé humaine et sur l'environnement et en indiquant des sources d'émissions. Dans ce chapitre nous présentons également les lignes directrices mondiales de l'OMS relatives à la qualité de l'air, les stratégies politiques de réduction de la pollution atmosphérique ainsi que les différents dispositifs de mesure de la qualité de l'air.

1. La quasi-totalité de la population urbaine est exposée à la pollution de l'air

L'Agence européenne pour l'environnement (AEE) a déclaré que " *la plupart des êtres humains habitant en ville sont exposés à des concentrations de polluants atmosphériques supérieures à la valeur moyenne annuelle préconisée par l'OMS*"(EEA, 2022). Une très grande partie de l'humanité en ville respire un air dangereux pour la santé et elle est exposée à des concentrations de particules, à des concentrations en ozone et à l'oxyde d'azote, avec des valeurs respectives de 96%, 95% et 89%, voir Figure 6.

Bien que les villes représentent moins de 2 % de la surface de la Terre, elles contribuent significativement à la pollution planétaire de l'air et aux changements climatiques en raison de sa consommation énergétique mondiale qui est de 78% et sa production de plus de 60 % des émissions de gaz à effet de serre (Habitat, 2020), ce qui rend les êtres humains vivant en villes très vulnérables aux effets des changements climatiques et à la respiration de l'air nocif. Ce problème ne cesse de s'aggraver étant donné que, d'ici 2050, la population mondiale vivant dans les zones urbaines devrait passer de 54% à 66% (ONU, 2015) l'équivalent de sept personnes sur dix dans le monde vivront en milieu urbain et que l'expansion urbaine globale devrait s'étendre de 0,6 à 1,3 million de km²(Huang, Li, Liu, & Seto, 2019).

A son état naturel et non contaminé par les polluants atmosphériques, l'air ambiant²⁸est composé de: 78 % d'azote, 21 % d'oxygène et 1 % d'une combinaison de carbone, d'Hélium, de méthane, d'argon et d'hydrogène(aquaportail, 2011). L'air ambiant des villes d'aujourd'hui est très pollué par les polluants industriels et chimiques qui sont potentiellement nocifs à la santé humaine, aux écosystèmes, à la biodiversité et à la végétation. La pollution de l'air ambiant existe à toutes les échelles : l'échelle locale qui s'étend jusqu'à environ 5 km de la surface de la terre; l'échelle urbaine qui s'étend à environ 50 km; l'échelle régionale de 50 à 500 km; l'échelle continentale qui vont de 500 à plus de 1 000 km; et l'échelle mondiale qui s'étend dans le monde entier(aquaportail, 2011).

²⁸L'air ambiant est l'air à l'extérieur des bâtiments, par opposition à l'air intérieur. Il caractérise le milieu, hors des murs, dans lequel on vit, y compris sa pollution(aquaportail, 2011).

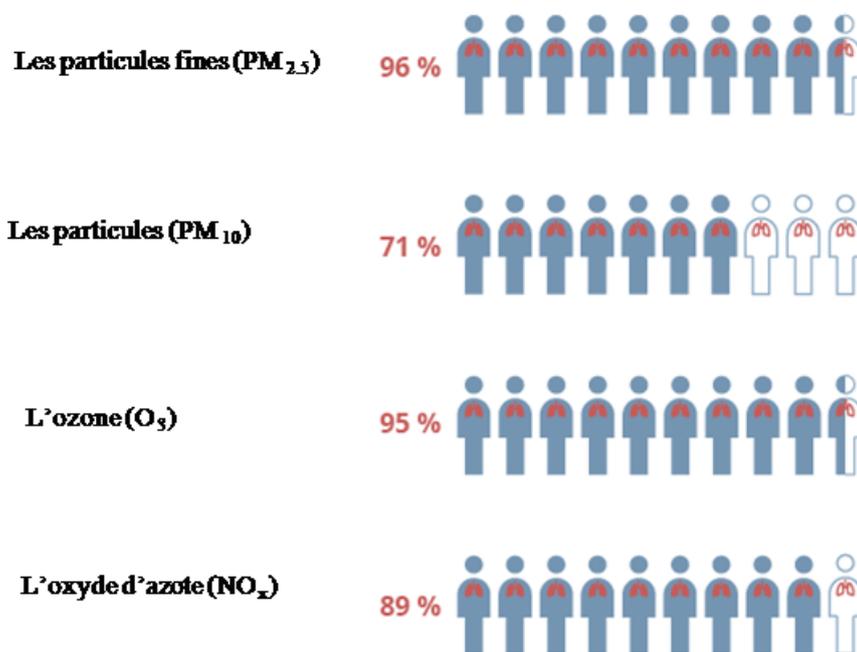


Figure 6: Pourcentage de la population urbaine exposée à des concentrations de polluants atmosphériques supérieures aux lignes directrices de l'OMS en 2020 (EEA, 2022) .

2. Les polluants atmosphériques et leurs effets sur l'environnement et la santé humaine

2.1 Les particules en suspension PM_{2,5} et PM₁₀

Les particules en suspension, notées PM (Particulate matter en anglais), sont des matières microscopiques en suspension dans l'air, nommés aussi aérosols. Ces particules se distinguent par leur granulométrie: les PM₁₀ ont un diamètre inférieur à 10 µm et les PM_{2,5} ont un diamètre inférieur à 2,5 µm. Ces particules peuvent être émises par des activités humaines comme l'industrie, la combustion de matières fossiles, les transports routiers ou par des sources naturelles tel que les feux de forêt, érosion des sols, pollens, ou les éruptions volcaniques. Elle peuvent se former aussi par des réactions physico-chimiques entre des polluants déjà présents dans l'atmosphère comme le NO_x, SO₂, NH₃, ou COVNM (INSEE,

2021). Les principaux composants de ces particules sont les sulfates, les nitrates, l'ammoniac, le chlorure de sodium, le carbone noir, la poussière minérale et l'eau.

Les PM_{2,5} peuvent pénétrer profondément dans le système respiratoire humain, atteignant les poumons. L'exposition aux PM_{2,5} est liée aux maladies respiratoires et cardiovasculaires et à la réduction de la fonction pulmonaire. Les particules avec un plus grand diamètre sont retenues par les voies aériennes supérieures. Tandis que les particules les plus fines pénètrent profondément dans l'appareil pulmonaire pour atteindre les voies respiratoires inférieures ce qui peut altérer gravement la fonction respiratoire (airbreizh, 2018).

les effets des PM sur l'environnement sont considérable, notamment la dégradation physique et chimique des matériaux ce qui donne Les effets de salissures des bâtiments, la réduction de la photosynthèse chez les plantes, la réduction de la visibilité et réchauffement de l'atmosphère en absorbant la lumière (airbreizh, 2018).

2.2 Monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone est un gaz toxique incolore, inodore et imperceptible mais potentiellement mortel. En plus des accidents d'intoxications au monoxyde de carbone qui touche chaque année plus d'un millier de foyers en raison d'une mauvaise combustion - quelle que soit la source d'énergie : bois, gaz (naturel, butane, propane ou pétrole liquéfié), charbon, essence, etc- le monoxyde de carbone se trouve dans l'air urbain qui provient de la combustion incomplète des combustibles et du carburant des véhicules automobiles. Des chercheurs révèlent qu'une exposition chronique à ce gaz provoque des dysfonctionnements cellulaires chez l'homme, même en parfaite santé. Ce dernier agit comme un gaz asphyxiant très toxique en se combinant avec l'hémoglobine du sang empêchant l'oxygénation de l'organisme. Il est à l'origine d'intoxication à dose importante, il peut être mortel en cas d'exposition prolongée à des concentrations très élevées. L'intoxication grave due au monoxyde de carbone entraîne des vertiges, des troubles du comportement, des pertes de connaissance, le coma ou le décès. Ces intoxications peuvent laisser des séquelles à vie (CHIRON, 1982).

2.3 Ozone (O3)

Dans l'atmosphère, Il existe deux types d'ozone; le bon ozone et le mauvais ozone: L'ozone stratosphérique appelé aussi couche d'ozone forme une protection située dans la stratosphère de 10 à 50km d'altitude et absorbe les rayons ultraviolets (UV) qui peuvent être préjudiciables pour la santé humaine. Ce dernier représente 90% de la concentration. Il est détruit par des aérosols, notamment issus de l'activité humaine, entraînant ainsi un trou dans la couche d'ozone. Le deuxième type d'ozone est appelé l'ozone troposphérique qui est un gaz à effet de serre (GES), un polluant atmosphérique, de couleur bleutée et odeur piquante et un composant majeur du smog²⁹ photochimique³⁰ qui se forme dans la troposphère à moins de 10km d'altitude.

L'impact environnemental de l'ozone troposphérique est considérable. Il est l'un des polluants à l'origine du réchauffement planétaire et il a des effets nocifs sur les écosystèmes, la faune et la flore en ralentissant leur croissance et en provoquant une mortalité massive des cultures. Bien que la pollution par l'ozone troposphérique soit souvent considérée comme un problème urbain, ce dernier se trouve également dans des zones plus rurales transporté sur des centaines de kilomètres par le vent. L'ozone peut déclencher des irritations ou des difficultés respiratoires (toux, respiration sifflante, gêne thoracique), réduire la fonction pulmonaire et endommager les yeux et le nez ainsi que la gorge et les poumons. une exposition à long terme peut entraîner un vieillissement du poumon.

Il a été démontré que Des concentrations qui dépassent 180 µg/m³ en moyenne horaire sont dangereuses pour les personnes vulnérables sensibles à la pollution par l'ozone(enfants, personnes âgées et les asthmatiques). La population toute entière sera affectée par cette pollution si les valeurs dépassent les 240 µg/m³(meersens, 2015).

²⁹ Composé de polluants nocifs,le smog est un type spécifique de pollution atmosphérique. qui apparaît souvent relativement bas par rapport au sol sous la forme d'une brume jaune-brun. les deux principaux composants du smog sont les particules (MP) et l'ozone troposphérique (O3), il composé aussi des oxydes d'azote (NOx), du dioxyde de soufre (SOx), du monoxyde de carbone (CO) et des composés organiques volatils (COV) (Energie, 2010).

³⁰ Le smog photochimique, visible sous la forme d'une brume brune le matin et l'après-midi, est produit par les émissions des véhicules en contact avec la lumière du soleil,il s'agit de la réaction entre la lumière ultraviolette du soleil et les oxydes d'azote dans l'atmosphère. Le smog photochimique se forme dans les villes chaudes, densément peuplées et comptant de nombreux véhicules comme Los Angeles, Sydney, la ville de Mexico et Pékin(Energie, 2010).

2.4 Dioxyde de soufre (SO₂)

Le Dioxyde de soufre (SO₂) est un gaz incolore et ininflammable, il est cependant irritant avec son odeur pénétrante dans les yeux et les voies respiratoires. La source principale du SO₂ est la combustion des combustibles fossiles (charbons, fuels, ...). Au cours de ce processus de combustion, les impuretés soufrées se trouvant dans les combustibles s'oxydent par l'oxygène de l'air O₂ ce qui produit le dioxyde de soufre SO₂, ces derniers s'oxydent aussi dans les gouttelettes d'eau portées par le vent. Ce polluant est par la suite rejeté par les différentes sources, qu'elles soient naturelles (volcan) ou d'activités humaines (véhicules, centrales de production électrique, raffinage de pétrole, métallurgie, combustion du charbon...).

le dioxyde de soufre entraîne une altération du fonctionnement des poumons irritant les muqueuses. Il peut pénétrer profondément dans les poumons. Du fait de sa grande solubilité, il est absorbé de 85 à 99 % par les muqueuses du nez et de l'appareil respiratoire lorsqu'il est inhalé à concentration élevée de microgrammes par mètre cube d'air, et lorsqu'il est combiné à l'eau, il se transforme en acide sulfurique auquel l'organisme est sensible (environnement, 2018). Le dioxyde de soufre réagit avec les oxydes d'azote présents dans l'air pour former des pluies acides, ce qui entraîne des effets directs sur les végétaux et le changement des caractéristiques des sols. L'acide sulfurique généré par le dioxyde de soufre provoque la dégradation des matériaux.

2.5 Dioxyde d'azote (NO₂)

La source principale du dioxyde d'azote (NO₂) est le trafic routier dont les concentrations augmentent aux heures de pointe et qui se présente, en concentré, comme un gaz brun-rouge toxique suffocant. Son odeur âcre et piquante caractéristique est l'une des odeurs que l'on perçoit dans les rues polluées par la circulation automobile. Le NO₂ se forme dans l'atmosphère à partir du monoxyde d'azote (NO) qui provient de la combustion de combustibles fossiles et fait partie des oxydes d'azote (NO_x) qui est un groupe de gaz hautement réactifs. Le NO₂ se transforme dans l'atmosphère en acide nitrique qui retombe

sur la végétation et sur les sols. Ce dernier, en agissant avec d'autres polluants, participe à l'acidification³¹ des milieux naturels.

une exposition de longue durée au NO₂ augmente le risque des symptômes bronchitiques et d'infections respiratoires et de maladies pulmonaires chroniques (toux, respirations sifflantes, difficultés à respirer, réduction de l'odorat...), diminue la fonction pulmonaire, contribue au développement de l'asthme. Bien qu'elle soit de courte durée, Une exposition à des concentrations de NO₂ dépassant 200 µg/m³ entraîne une inflammation importante des voies respiratoires. Cette dernière s'est avérée avoir une association linéaire avec un risque accru de décès cardiovasculaire et respiratoire. Ce polluant participe fortement à la formation du phénomène des pluies acides, ce qui a des conséquences très importantes sur appauvrissent les milieux naturels, des sols et des végétaux et contribue à la formation de l'ozone troposphérique et à la corrosion des métaux de construction et donc la détérioration des bâtiments(Meersens, 2021).

2.6 Oxyde d'azote NO_x

Les NO_x, ou oxydes d'azote, Composés d'azote et d'oxygène (Figure 7), est une famille de multitude de molécules contenant de l'azote et de l'oxygène dans des quantités différentes selon la formule chimique N_xO_y. Il s'agit notamment du : monoxyde d'azote (NO), dioxyde d'azote (NO₂), Ion nitrate (NO₃),Protoxyde d'azote (N₂O)/oxyde nitreux, Trioxyde de diazote (N₂O₃), tétraoxyde de diazote (N₂O₄), Péroxyde d'azote (N₂O₄) et Pentoxyde de diazote (N₂O₅). Généralement, les oxydes d'azote NO_x comprennent essentiellement deux molécules qui sont: le monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote NO₂ qui se forment lors du processus de combustion par la combinaison entre l'oxygène et l'azote présents dans l'air (qui contient près de 80 % d'azote)ou par oxydation de l'azote dans les combustibles.

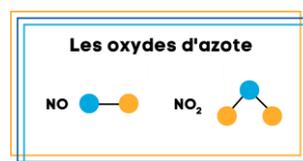


Figure 7: les molécules des oxydes d'azote.

³¹L'acidification des sols est une augmentation de leur degré d'acidité sous l'action de la pluie. c'est un processus influençant la fertilité des sols cultivables et la disponibilité de certains toxiques, les activités humaines aggravent fortement ce phénomène(WIKIPEDIA, 2023).

2.6.1 Les sources d'émissions de NOx

Il existe plusieurs sources d'émission des NOx. Ces sources d'émission peuvent être naturelles ou anthropiques. Dans les milieux professionnels, les employés sont exposés aux oxydes d'azote à travers plusieurs manipulations comme par exemple : la fabrication et utilisation de l'acide nitrique les soudages au gaz et à l'arc électrique ; la manipulation en milieu médical ; les utilisations d'explosifs ; la combustion de composés azotés et les opérations de nitration(Thomas, 2009).

Les émissions naturelles : les NOx peuvent se former par combinaison de l'oxygène et de l'azote de l'air lors de phénomènes naturels comme les orages, les éruptions volcaniques et lors des incendies de forêt.

Les émissions anthropiques: les activités humaines sont responsables du plus grand pourcentage de la présence des NOx dans l'air atmosphérique.

L'habitat: la présence de NO2 à l'intérieur des foyers peut être due aux appareils de chauffage au fuel ou aux cuisinières à gaz.

L'industrie: le secteur de l'industrie est responsable de 19% des émissions de NOx. Les NOx sont émis généralement lors des procédés fonctionnant à haute température, il s'agit notamment de la combustion des combustibles comme les combustibles liquides fossiles, le charbon, le gaz naturel, les biomasses et les gaz de procédés. Les procédés industriels sont responsable de la production des NOx comme la fabrication de verre, des métaux et du ciment.

le transport: le secteur du transport routier (combustions automobiles) est la première source des émissions de NOx avec environ 50% à cause des gaz d'échappement produit de la combustion des combustibles fossiles pour les véhicules à moteur. Le transport maritime a aussi sa part dans le rejet des NOx.

La transformation et la production d'énergie: appelée aussi la combustion thermique, les centrales thermiques sont responsables d'environ de 10% du rejet des NOx. La transformation du bois et son processus de combustion produit également un taux important des NOx, Les NOx sont également produits lors de la combustion du bois car ce dernier contient un taux important d'azote sous forme d'amines et de protéines nécessaires à la croissance de l'arbre.

Le secteur de l'agriculture:cette source d'émission produit 11% des qui proviennent avec environ 40% des sols agricoles suite à l'utilisation de fertilisants azotés et le reste par la combustion de produits pétroliers.

2.6.2 Les trois différentes catégories de NOx

Dans les installations de combustion et dans les moteurs des véhicules, le NO se transforme en présence d'oxygène en NO₂ dans le foyer de combustion, Cette réaction se poursuit lentement dans l'atmosphère ce qui donne la couleur brunâtre d'air pollué situées à quelques centaines de mètres d'altitude. Il existe trois mécanismes de formation des oxydes d'azote

- les NOx combustibles: L'azote peut être présent sous de nombreuses formes dans les combustibles, on peut les distinguer suivant le type amine (R-NH₂) ou nitrile (R-CN). Ces molécules s'oxydent plus facilement que le diazote à des températures inférieures à 1 000 °C.
- les NOx thermiques: issus de l'oxydation de l'azote présent dans les combustibles. quand la température dépasse 1 400 °C, une réaction entre le diazote et l'oxygène se produit selon la formule $N_2 \text{ (air)} + O_2 \rightarrow 2 NO$.
- les NOx précoces: formés par combinaison chimique de l'azote de l'air avec des espèces radicalaires hydrocarbonés (CH et CH₂) formées dans les réacteurs à haute température, ce processus contribue à la production de fonctions azotées qui sont par la suite oxydées, ce qui conduit ensuite à la formation de NO par le même mécanisme que le NO du combustible.

2.6.3 Les effets du NOx sur la santé

Le NOx est un gaz irritant et extrêmement toxique qui provoque des difficultés respiratoires. Ce dernier pénètre dans le corps humain et atteint les ramifications les plus fines des voies respiratoires ce qui peut causer une hyperréactivité bronchique. Il a été démontré que le NOx est très nocifs sur la santé humaine bien plus que le monoxyde de carbone CO de 40 fois .Les personnes asthmatiques ou souffrant de pathologies respiratoires chroniques sont une population à risque. Le NOx augmente la sensibilité aux agents pathogènes chez les personnes vulnérables.Des études épidémiologiques montrent qu'il existe une corrélation

linéaire entre l'augmentation des concentrations en NOx et le nombre de décès pour cause cardio-vasculaire.

Le monoxyde d'azote limite la fixation de l'oxygène sur l'hémoglobine en raison de sa pénétration dans les alvéoles pulmonaires où il se dissout dans le sang. De ce fait, les différents organes sont moins bien oxygénés. Quant au dioxyde d'azote, il a pour conséquence de fragiliser la muqueuse pulmonaire face aux pathologies infectieuses après qu'il pénètre les voies respiratoires profondes. Le NOx est un gaz odorant très toxique et cause l'irritation des muqueuses dès qu'il dépasse 0,0013% de teneur en volume. La pénétration des oxydes d'azote dans le corps humain se fait essentiellement par inhalation, cependant, les passages percutanés sont possibles. Les lésions que peut causer le NOx chez l'homme sont: l'augmentation à la sensibilité aux allergènes ; les inflammations des voies respiratoires ; la fragilisation de l'immunité contre les infections ; des troubles du rythme cardiaque ; une mauvaise croissance pulmonaire chez l'enfant ; des infarctus du myocarde ; une augmentation des hospitalisations dues à des pathologies pulmonaires et une élévation du risque de décès des suites de maladies cardiovasculaires et respiratoires (Figure 8).

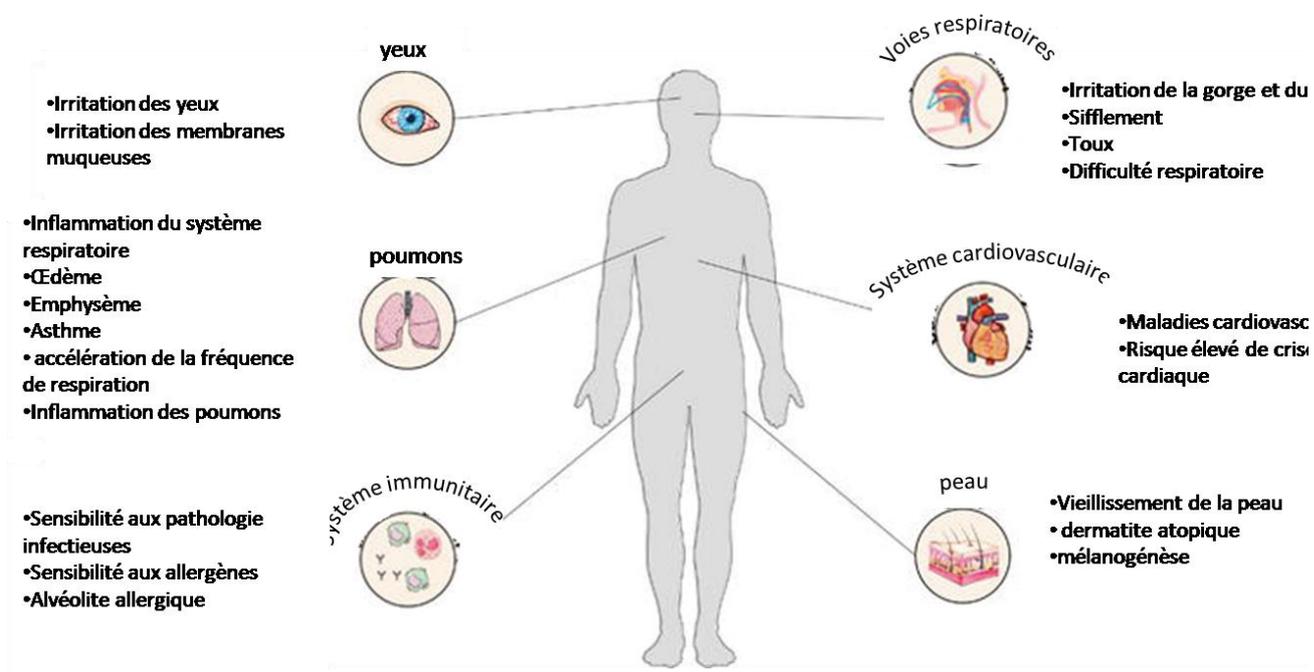


Figure 8: représentation des pathologies associées à la pénétration du NOx dans l'organisme (Depayras et al., 2018)

2.6.3.1 Pénétration, distribution et élimination du NOx dans l'organisme

Le monoxyde d'azote pénètre dans la circulation sanguine sous forme non transformée. Il se fixe sur l'hémoglobine pour former de la nitrosylhémoglobine (NOHb) qui par la suite, se transforme en méthémoglobine (MetHb) en présence d'oxygène. De ce fait, des ions nitrites et nitrates sont formés. La grande partie des nitrates est évacuée dans l'urine après être passées par les reins. Le faible taux de nitrates restants est rejeté par la salive dans la cavité buccale où les nitrates sont convertis en nitrites par les bactéries. Lorsque les nitrates atteignent l'estomac, ils se transforment en azote gazeux et disparaissent, soit dans l'intestin où ils sont transformés par les bactéries intestinales en ammoniac éliminé dans les selles, soit à travers les parois intestinales et rejetés dans l'urine après métabolisation en urée (M. Chalansonnet, 2020).

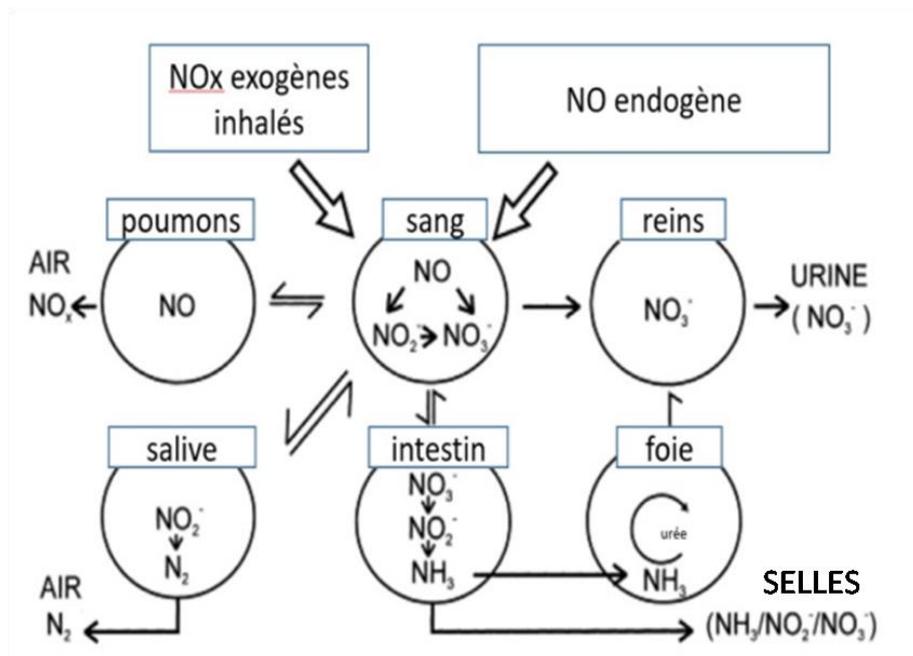


Figure 9: . Biotransformation des oxydes d'azote dans l'organisme (M. Chalansonnet, 2020)

2.6.4 Les effets du NOx sur l'environnement

Le NOx est un gaz à effet de serre qui contribue à la formation d'ozone troposphérique (smog photochimique)³² et au réchauffement de la planète: le NOx constitue l'un des principaux précurseurs de la pollution photochimique par l'ozone. Il est à l'origine de l'augmentation de la formation d'ozone au niveau de la troposphère³³. Le NOx est l'un des précurseurs, à l'atteinte de la couche d'ozone stratosphérique et à l'effet de serre. Bien que ce phénomène est causé en partie par les rayonnements solaires, il est accentué par les activités anthropiques. Avec les composés organiques volatils (COV), le NO₂ est l'un des deux principaux polluants responsables de la formation de l'ozone troposphérique nocif à la santé et à l'environnement.

Comme déjà expliqué plus haut; Les oxydes d'azote (NOx) comprennent essentiellement le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂). Ils se forment notamment au cours des processus de combustion. Le monoxyde d'azote (NO) émis lors de la combustion s'oxyde rapidement dans l'atmosphère et devient NO₂. Ensuite, En se dissolvant dans la vapeur d'eau atmosphérique, le NO₂ produit des acides et interagit avec des gaz et des particules présents dans l'atmosphère pour former les nitrates. Le NO₂ à son état brut ainsi que ses dérivés acides et nitrates peuvent être très nocifs à la santé humaine et à l'environnement.

Le NOx contribue au phénomène de L'acidification³⁴ de l'environnement: le NOx contribue à la formation des retombées et des pluies acides qui est un problème environnemental préjudiciable et qui a des conséquences directes sur les bâtiments et la

³²Le smog photochimique, visible sous la forme d'une brume brune le matin et l'après-midi, est produit par les émissions des véhicules en contact avec la lumière du soleil, il s'agit de la réaction entre la lumière ultraviolette du soleil et les oxydes d'azote dans l'atmosphère. Le smog photochimique se forme dans les villes chaudes, densément peuplées et comptant de nombreux véhicules comme Los Angeles, Sydney, la ville de Mexico et Pékin (Energie, 2010).

³³La troposphère est une partie de l'atmosphère située entre le sol et la stratosphère. elle est la première et la plus basse couche de l'atmosphère terrestre, située à entre 8 à 15 kilomètres d'altitude selon la latitude et la saison (Wikipedia, 2012c).

³⁴L'acidification des sols est une augmentation de leur degré d'acidité sous l'action de la pluie. c'est un processus influençant la fertilité des sols cultivables et la disponibilité de certains toxiques, les activités humaines aggravent fortement ce phénomène (WIKIPEDIA, 2023).

végétation. Les pluies acides sont essentiellement responsables du dépérissement forestier³⁵. L'acidification de l'environnement et leurs retombées favorisent l'eutrophisation de l'environnement. Rejetés dans l'atmosphère, le SO₂ et le NO₂ s'oxydent par l'air ce qui entraîne la formation respective de l'acide sulfurique H₂SO₄ et l'acide nitrique HNO₃ qui aboutissent dans les écosystèmes aquatiques et terrestres sous forme de dépôts, c'est ce qui explique l'apparition du phénomène des pluies acides. L'acide nitrique (HNO₃) peut endommager la végétation, les édifices et les matériaux. L'acidification est responsable d'atteintes foliaires en raison de la destruction de la fine couche de cire recouvrant les aiguilles, ce qui les rends plus vulnérables vis à vis des différents types de pollution photo-oxydantes³⁶. L'acidification entraîne la disparition des poissons dans les milieux aquatiques .

Le NO_x participe à l'eutrophisation³⁷ des écosystèmes: ce phénomène qui se traduit par une abondance en azote et phosphore, conduit à un déficit des équilibres biologiques de l'écosystème concerné notamment pour les milieux qui sont naturellement oligotrophes³⁸. L'eutrophisation des écosystèmes est accentuée par le réchauffement climatique. En milieu aquatique, cette abondance en nutriment peut causer une anoxie³⁹ chronique qui a des conséquences très nocives sur les espèces à savoir, la Prolifération d'algues, dégradation de la qualité de l'eau, la mort des poissons et d'autres animaux et la perte de biodiversité. L'apport excessif en azote dépasse la capacité d'absorption de certains écosystèmes en favorisant le développement rapide de certaines espèces au détriment d'autres, ce qui crée un déséquilibre de la biodiversité.

³⁵Le dépérissement forestier: appelé aussi la mort des forêts, est l'affaiblissement d'un massif forestier qui se traduit par la dégradation tels que le jaunissement végétal et les mortalités massives d'arbres(wikipedia, 2010).

³⁶Pollution photo-oxydante, appelée aussi pollution photochimique, est causée par la transformation de polluants primaires en espèces oxydantes sous l'effet des rayonnements solaires. Par exemple; les oxydes d'azotes (NO_x) et composés organiques volatils (COV) sont transformés en ozone troposphérique (O₃) sous l'effet des réactions photochimiques dues à la présence d'ultra-violets(Futura, 2016).

³⁷L'eutrophisation des écosystèmes désigne le phénomène de l'accumulation des nutriments dans un écosystème donné. Un milieu dit "eutrophe" est littéralement un milieu "bien nourri"(youmatter, 2013).

³⁸Oligotrophes: pauvres en éléments nutritifs.

³⁹Anoxie: Diminution de la quantité d'oxygène.

Le NOx contribue à la formation de particules fines dans l'air ambiant:

Lorsque le NO₂ est dissous par la vapeur d'eau, il produit l'acide nitrique (HNO₃) nocif à la végétation, les édifices, les matériaux et l'environnement en général puisqu'il est à l'origine de l'acidification des écosystèmes aquatiques et terrestres. Lorsque le nitrate réagit avec d'autres composés présents dans l'atmosphère, tels que l'ammoniac, il devient un facteur important de la formation secondaire des particules fines de moins de 2,5 microns, appelées les PM_{2,5} qui sont inhalables et qui ont un impact considérable sur l'environnement et la santé humaine. En résumé, les NOx réagissent avec l'ammoniac, l'humidité et d'autres composés pour former les petites particules qui par leur très petite taille, peuvent pénétrer profondément dans les voies respiratoires. Les matières particulaires (MP) réduisent la capacité de photosynthèse des plantes car elles limitent leur exposition au soleil et réduisent leur capacité à absorber le dioxyde de carbone. Les PM contribuent à la formation de brume dans l'air, réduisant ainsi la clarté et la visibilité. L'humidité de l'air ambiant joue également un rôle dans son effet brumeux.

2.6.5 Le NOx polluant majeur de l'atmosphère terrestre

Plusieurs études ont démontré que le NOx est l'un des polluants majeurs de l'air atmosphérique (Andersen et al., 2012; Bourdrel, Bind, Béjot, Morel, & Argacha, 2017; Chen, Kuschner, Gokhale, & Shofer, 2007; Guarnieri & Balmes, 2014; Streets & Waldhoff, 2000; Thurston, 2017). Parmi les oxydes d'azote, le monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote NO₂ sont les plus impliqués dans la pollution atmosphérique. Les NOx sont bien connus pour leurs effets délétères sur la santé publique et l'environnement global.

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a déclaré que les oxydes d'azote sont l'un des polluants les plus préoccupants pour la santé publique et pour l'environnement et sont une cause importante de morbidité et de mortalité (OMS, 2016). Les effets de l'oxyde d'azote sur l'environnement se manifestent dans la contribution à la formation d'ozone troposphérique ou le smog photochimique et au réchauffement de la planète, au phénomène de l'acidification de l'environnement, à l'eutrophisation des écosystèmes et à la formation de particules fines dans l'air ambiant. Le NOx est un gaz irritant et extrêmement toxique qui provoque des maladies respiratoires et cardiovasculaires.

3. Les lignes directrices mondiales de l'OMS relatives à la qualité de l'air

Depuis 1987, l'OMS publie périodiquement des lignes directrices mondiales relatives à la qualité de l'air afin de fournir des recommandations quantitatives et des orientations sanitaires sur la gestion de la qualité de l'air. Selon la nécessité, L'OMS révisé ces recommandations et modifie les à la baisse pour continuer d'œuvrer à un abaissement de la mortalité induite ; une augmentation de l'espérance de vie en bonne santé et pour limiter le réchauffement climatique . Ces recommandations visent à offrir des indications sur la façon de réduire les effets de la pollution de l'air sur la santé et des niveaux d'exposition auxquels ou en dessous desquels les effets sont considérés comme acceptables.

Les lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air sont des valeurs permettant d'assurer des conditions sanitaires acceptables pour ceux qui sont soumis à la pollution de l'air. les normes de qualité de l'air servent règlementairement à déclencher des actions pour protéger la population de la mauvaise qualité de l'air. Il s'agit d'un outil fondé sur des données scientifiques probantes que les états peuvent utiliser afin de faire évoluer les politiques et les législations en matière de qualité de l'air ambiant et de santé publique. Les autorités de l'état et les élus devraient œuvrer à ramener les concentrations de polluants en dessous des seuils autorisés.

Ces valeurs guides sont applicables dans le monde entier et se basent sur une synthèse d'informations émanant d'études consacrées aux effets sanitaires des principaux polluants de l'air qui posent des risques de santé. Ces niveaux d'exposition sont exprimés en concentrations (en microgrammes par mètre cube d'air) et en durées (à long ou court terme) de six polluants atmosphériques majeurs (Les particules en suspension (PM2.5 et PM10), ozone (O₃), oxyde d'azote (NOX), monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de soufre (SO₂)), au-dessous desquels il n'a pas été observé d'effets nuisibles sur la santé humaine ou sur la végétation. Pour se faire, Deux seuils sont fixés : une valeur moyenne annuelle maximale et une moyenne journalière (Figure 10) (W. H. Organization, 2021).

La mise à jour la plus récente des lignes directrices relatives à la qualité de l'air date du septembre 2021. L'OMS précise que le respect de ces seuils peut sauver des millions de vies et que leur dépassement est associé à des risques importants pour la santé. Le

dépassement des seuils recommandés dans les lignes directrices sur la qualité de l'air constitue une menace pour la santé publique.

Polluant	Durée retenue pour le calcul des moyennes	Seuil de référence
PM _{2,5} , µg/m ³	Année	10
	24 heures ^a	25
PM ₁₀ , µg/m ³	Année	20
	24 heures ^a	50
O ₃ , µg/m ³	Pic saisonnier ^b	60
	8 heures ^a	100
NO _x , µg/m ³	Année	40
	24 heures ^a	25
SO ₂ , µg/m ³	24 heures ^a	20
CO, mg/m ³	24 heures ^a	4

µg = microgramme
^a99^e centile (3 à 4 jours de dépassement par an).
^b Moyenne de la concentration moyenne quotidienne maximale d'O₃ sur 8 heures au cours des six mois consécutifs où la concentration moyenne d'O₃ a été la plus élevée.
 Remarque : l'exposition annuelle et l'exposition pendant un pic saisonnier sont des expositions à long terme, tandis que l'exposition pendant 24 heures et 8 heures sont des expositions à court terme.

Figure 10: Les seuils de référence des recommandations de l'OMS concernant directrices mondiales relatives à la qualité de l'air(W. H. Organization, 2021)

4. Stratégies et politiques de réduction de la pollution atmosphérique

Une réduction des niveaux de pollutions de manière pérenne et la limitation des épisodes de pollution au niveau national est possible. Au travers des dispositifs législatifs, les orientations et les objectifs définis par l'état en faveur de la qualité de l'air. La pollution atmosphérique est un facteur de risque global, L'amélioration de la qualité de l'air est l'affaire de tous : pouvoirs publics, industriels et citoyens, c'est pour cette raison que des mesures à différentes échelles devraient être prises. Il convient d'agir à toutes les échelles géographiques. Pour se faire, différents types d'actions sont nécessaires au niveau planétaire, régional et local. Il s'agit avant tout de renforcer la législation internationale ; de promouvoir la pluridisciplinarité entre urbanistes et architectes pour les aménagements urbains, et les décideurs dans les secteurs des infrastructures de transport et de mobilité, des logements et de l'agriculture; l'adoption de comportements de déplacement et de chauffage favorables à la qualité de l'air et de moins s'exposer lors des pics de pollution.

D'abord, à l'échelle collective: la réduction des risques repose sur un ensemble de dispositifs et d'actions basés sur les instruments réglementaires, les plans d'action nationaux et locaux et les recommandations portant sur les principaux secteurs émetteurs : les transports (les émissions des oxydes d'azote des moteurs diesel) , le résidentiel-tertiaire (sur les émissions de particules fines dues au chauffage individuel au bois), l'industrie (rejet de polluants atmosphériques) et l'agriculture (les émissions d'ammoniac et de pesticides dans l'air). Les collectivités territoriales et les pouvoirs publics jouent un rôle grandissant dans la réduction des émissions de polluants atmosphériques au niveau national à travers l'établissement des plans et programmes d'actions nationaux et locaux. La lutte contre la pollution atmosphérique se situe au croisement de nombreuses autres politiques publiques, avec lesquelles elle doit s'articuler.

Les aménagements urbains: l'aménagement du territoire et l'environnement urbain influent sur la qualité de l'air ambiant. Les documents d'urbanisme ont une influence directe sur les émissions de polluants. Ces derniers doivent être soumis à une évaluation environnementale réglementaire. Des plans de mobilité urbaine douce devraient être développés pour assurer des alternatives aux transports motorisés via de multiples interventions; Pour améliorer la qualité de l'air, les pouvoirs publics, tant au niveau européen

que national ou local, peuvent agir via de multiples interventions telles que : l'amélioration des infrastructures et réglementation de la qualité des carburants et combustibles, ou les normes imposant des seuils d'émissions de polluants des émissions liées aux moteurs pour les véhicules ; la promotion des transports plus respectueux de la santé et de l'environnement, et en particulier les mobilités actives tel que marche, vélo. La démarche anticipative de l'Évaluation d'Impact sur la Santé (EIS) doit s'appliquer en amont des projets d'aménagement urbain. Cette dernière intervient dans un processus de décision pour prédire les conséquences sur la santé de projets et recommander les mesures appropriées. Les politiques agricoles: l'agriculture est elle aussi un secteur émetteur de polluants atmosphériques tels que les particules primaires ou secondaires, les oxydes d'azote, les composés organiques, les pesticides et l'ammoniac. Les pouvoirs publiques peuvent adopter des moyens adéquats pour y remédier.

A l'échelle individuelle, les citoyens peuvent contribuer à leur niveau, non seulement à la réduction des émissions de polluants de l'air, mais aussi à la limitation de l'exposition à travers les changements de comportement concernant la mobilité, le chauffage, et l'adoption de gestes simples destinés à améliorer la qualité de l'air. Il s'agit de se déplacer et se chauffer sans polluer l'air. Le citoyen est le premier responsable de l'émission des oxydes d'azote et des particules fines en utilisant les véhicules individuels au diesel et à l'essence. Les personnes peuvent réduire ces émissions en utilisant ; les modes de déplacement doux comme les transports publics, la marche et le vélo. Les véhicules électriques qui électriques n'émettent aucun polluant de l'air plutôt que les véhicules thermiques ; les véhicules plus petits et plus légers qui consomment moins d'énergie et donc émettent moins de polluants de l'air et en adoptant le covoiturage⁴⁰.Le chauffage (au bois, au fioul et au gaz) est lui aussi un émetteur important des oxydes d'azote et de particules fines qui peut moins polluer en adoptant des actions tels que; la rénovation thermique des logements qui favorise la rétention de chaleur dans les logements et diminue donc les besoins de chauffage, et donc les émissions de polluants de l'air; l'utilisation des moyens de chauffage pas ou peu émetteurs de polluants de l'air tels que les pompes à chaleur, la géothermie, le solaire thermique et les réseaux de

⁴⁰le covoiturage est l'utilisation par plusieurs automobilistes et à tour de rôle, d'une seule voiture pour effectuer le même trajet.

chaleur urbains. Ces actions ont l'avantage de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, et donc de lutter conjointement contre le réchauffement climatique.

5. les dispositifs de mesure de la qualité de l'air

Les micro-capteurs de la pollution de l'air: avec le développement technologique, la mesure de la qualité de l'air n'est plus réservée qu'aux spécialistes. Les micro-capteurs de la pollution de l'air remplacent aujourd'hui les appareils autrefois très encombrants et très techniques. les micro-capteurs sont des appareils de mesure électroniques, miniaturisés, connectés à un autre appareil (smartphone), qui délivrent une information en temps réel via un écran d'affichage. Des modèles sont suffisamment légers pour être portés sur soi. Ces micro-capteurs mesurent plusieurs polluants qui sont les oxydes d'azote, les particules, le dioxyde de carbone et les composés organiques volatils. Pour cela, un microcapteur est composé d'une pompe qui va aspirer l'air et l'analyser, Puis un algorithme va traduire la grandeur physique mesurée en « donnée qualité de l'air » (indication de la concentration d'un ou plusieurs polluants). Les résultats de mesures sont délivrés instantanément et peuvent être enregistrés dans l'appareil ou récupérables sur un site internet spécifique ou alors uniquement lisibles à l'instant T sur l'appareil ou le smartphone connecté au micro-capteur. ces appareils offre la possibilité de multiplier les points de mesure. Cependant, Un micro-capteur ne peut pas être aussi fiable que les stations de mesure utilisant des instruments qui répondent à des critères très stricts de métrologie.

les stations de mesure fixes: station de mesure est un laboratoire équipé de matériel de référence pour mesurer avec une haute précision différents polluants au même endroit. Les stations de mesure font l'objet de protocoles de maintenance et de calibration strictes pour garantir la qualité des données produites. Ces stations fournissent une mesure et analysent en continu des gaz et des polluants atmosphériques. Ces stations utilisent des analyseurs sophistiqués et différentes méthodes d'analyse qui varient selon le polluant: la chimiluminescence pour les oxydes d'azote, la photométrie ou spectroscopie ultraviolette pour l'ozone, la radiométrie par microbalance pour les particules fines PM10, la fluorescence ultraviolette pour le dioxyde de soufre, , la spectroscopie infrarouge pour le monoxyde de carbone.

Laboratoire mobile de mesure de la qualité de l'air: l'analyse mobile de l'air permet d'obtenir un diagnostic précis de pollution sur une zone délimitée et permettent de préciser la nature de la pollution et son étendue. Ces laboratoires mobiles aident à examiner la qualité de l'air en divers endroits, ainsi que la répartition géographique de la pollution atmosphérique. Ces laboratoires sont pourvus de stations d'échantillonnage adaptables aux différentes situations et sont dotés d'une station météorologique complète. Afin de faire le lien entre les concentrations, les émissions et les conditions atmosphériques. Ces stations mobiles offrent une veille constante des impacts de certaines pollutions, mais également une intervention rapide en cas de pollution ponctuelle comme la fuite industrielle.

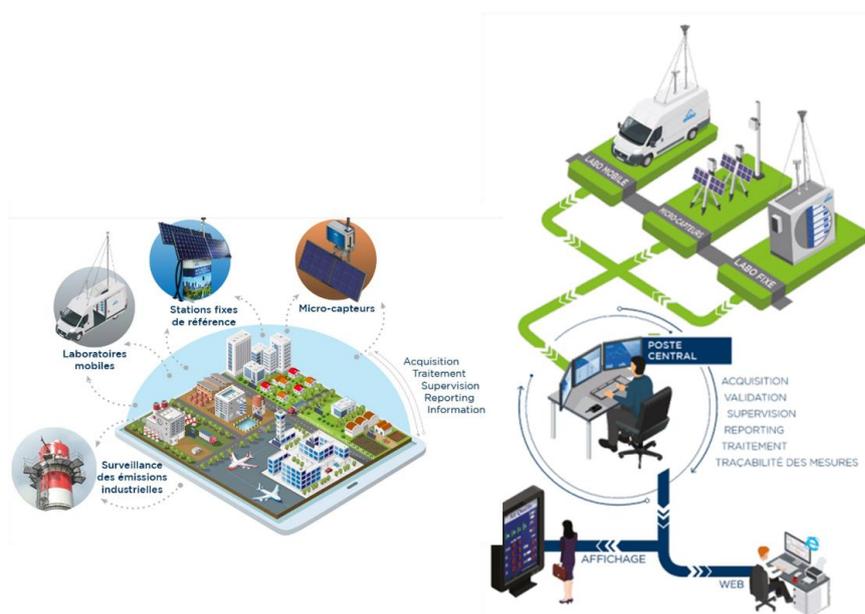


Figure 11: Les différentes techniques de mesure de la qualité de l'air.

Conclusion

Le NO_x est un polluant majeur de l'atmosphère terrestre. Les NO_x sont bien connus pour leurs effets délétères sur la santé publique et l'environnement global et sont une cause importante de morbidité et de mortalité (OMS, 2016). Les effets du NO_x sur l'environnement se manifestent dans la contribution à la formation d'ozone troposphérique ou le smog photochimique et au réchauffement de la planète, au phénomène de l'acidification de l'environnement, à l'eutrophisation des écosystèmes et à la formation de particules fines dans l'air ambiant. Le NO_x est un gaz irritant et extrêmement toxique qui provoque des maladies

respiratoires et cardiovasculaires. L'OMS a déterminé les lignes directrices mondiales de relatives à la qualité de l'air et a fixé des seuils de concentration annuelle à ne pas dépasser pour chaque polluants ($40\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le NO_x).

Conclusion de la partie I

L'alliance entre la forme urbaine, la qualité de l'air et donc la santé des habitants devrait prendre une place prépondérante dans les politiques d'aménagement urbain ainsi que dans les recherches scientifiques. En fait, les maladies transmissibles sont directement liées à nos modes de vies et à notre environnement urbain (cancers, maladies cardiovasculaires, respiratoires, asthme, allergies, diabète, obésité...). Les réflexions urbaines d'aujourd'hui devraient s'inscrire dans une démarche prévisionnelle pour protéger la santé des habitants à travers un ensemble de planifications stratégiques, entre autres la lutte contre les émissions des gaz à effet de serre et la surveillance de la qualité de l'air de façon à ce que la concentration des polluants ne dépassent pas les seuils recommandés par l'OMS. Il est nécessaire de bien mesurer les avantages et les inconvénients de la forme urbaine compacte et de comprendre sa relation avec la qualité de l'air et la santé des habitants. Pour se faire, nous utilisons les outils SIG et le logiciel FRAGSTATS pour le calcul des indices paysagers qui permettent une analyse quantitative du paysage pour décrire objectivement la composition et la configuration spatiale. La revue de littérature sur la forme urbaine compacte nous a permis de conclure que bien que la forme urbaine compacte soit admise comme un modèle pour un développement urbain durable et soit connue pour ses effets positifs concernant la réduction de la consommation des sol et de l'énergie, la réduction des déplacements motorisés en favorisant la proximité et l'accessibilité et donc la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la mixité fonctionnelle et donc la diversité sociale, l'augmentation de l'activité physique en favorisant les déplacements actifs et donc une moindre dépendance à la voiture. La forme urbaine peut également présenter l'inconvénient de pouvoir générer des effets négatifs qui vont à l'encontre de la durabilité urbaine, à savoir; le surpeuplement, le manque d'espaces verts qui peut réduire les possibilités d'activités favorables à la santé telles que l'activité physique en plein air et les loisirs qui réduisent le stress, une forte exposition au bruit et à la pollution atmosphérique, l'effet d'îlot de chaleur ainsi qu'une forte congestion urbaine et donc un niveau élevé de stress.

**DEUXIEME PARTIE : La ville
d'Oran, compacité urbaine et qualité
de l'air**

Introduction de la deuxième partie

Dans cette deuxième partie, nous étendons notre travail sur le cas d'étude. Nous nous attachons à appliquer les notions et les approches que nous avons développées lors de la première partie sur la ville d'Oran afin de pouvoir répondre à la problématique et vérifier les hypothèses formulées. Cette dernière, à l'instar des centres urbains algériens, a subi au début des années 2000 un processus de densification qui a conduit au remodelage et à la mutation de son tissu urbain.

Le premier chapitre est une rétrospective historique du développement urbain d'Oran pour comprendre sa croissance et l'influence des grandes épidémies sur son tissu urbain. Nous tentons de comprendre comment les préoccupations de la santé publique et de l'hygiène collective ont contribué à façonner l'espace urbain d'Oran. Dans la suite du chapitre, nous exposons les données sur la qualité de l'air à Oran (concentration de l'oxyde d'azote qui est l'un des polluants majeurs de l'air atmosphérique).

Dans le deuxième chapitre, nous abordons l'évaluation de la compacité urbaine en se basant sur l'approche des indices paysagers et l'utilisation des outils SIG. Nous expliquons en détail les notions fondamentales sur le processus de télédétection spatiale et les différentes méthodes de la classification numérique d'image et exposons une explication détaillée de chacun des 10 indicateurs paysagers. Par la suite, nous passons à l'application de ce processus sur notre cas d'étude en expliquant pas à pas toutes les démarches.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus à l'issue de l'étude quantitative du tissu urbain de la ville d'Oran pour l'évaluation de la compacité urbaine de chacune des 18 zones à l'aide de l'utilisation des indices. Dans un premier temps, nous exposons en détail les résultats de chacun des 10 indicateurs calculés, dans un second moment, nous procédons à l'interprétation des résultats en y superposant les données sur la qualité de l'air (concentration en NO_x) pour ensuite comparer ces deux données pour chaque zone. Nous ressortons alors avec une conclusion qui va infirmer ou confirmer notre hypothèse.

Chapitre I: Evolution urbaine d'Oran, héritage multiple et influences épidémiologiques

Introduction

Dans ce chapitre, nous faisons d'abord une rétrospective historique du développement urbain d'Oran. La croissance urbaine d'Oran est marquée par plusieurs périodes, la période des grandes épidémies en est un exemple. Les préoccupations de la santé publique et de l'hygiène collective sont l'un des facteurs qui ont contribué à façonner l'espace urbain d'Oran, notamment durant les épidémies du XVI^e au XX^e siècle (la peste et le choléra). Les travaux de Fadila Kettaf "*la fabrique de la ville d'Oran au temps des épidémies*", ainsi que ceux de René Lespès "*Oran, étude de géographie et d'histoire urbaines, qui présente l'histoire urbaine d'Oran dès les origines jusqu'aux années 1930*" (Lespès, 1938), nous nous expliquons la relation entre salubrité publique et urbanisme à Oran. Il ressort de ces écrits que les épidémies ont joué un rôle prépondérant dans la transformation et la construction d'Oran.

Dans la suite du chapitre, nous exposons les données sur la qualité de l'air à Oran (concentration de l'oxyde d'azotes qui est l'un des polluants majeur de l'air atmosphérique) à travers une étude intitulée "*Croissance urbaine, mobilité et émissions de polluants atmosphériques dans la région d'Oran, Algérie*" (Rahal et al., 2018). Nous présentons également les sources de pollution atmosphériques à Oran due notamment au trafic routier.

1. Oran, métropole de l'ouest Algérien: rétrospective historique du développement urbain d'Oran

Oran , une ville assise sur la côte septentrionale de l'Afrique, est une ville ancestrale à héritage multiple. sa croissance urbaine est marquée par plusieurs périodes d'urbanisation. Le noyau initial s'est développé en bordure d'une baie sur une rade semi-circulaire. La morphologie urbaine d'Oran est de nature composite; son organisation et ses différentes strates révèlent les occupations successives de la ville d'Oran notamment sous les pouvoirs : espagnol (1509-1708 puis 1732-1792), ottoman (1708-1732 puis 1792-1831), français (1831-1962) et enfin algérien (après 1962). la structure de la ville actuelle est le résultat de l'influence du relief du site, des traces de la ville existante, les strates des chaque modèles urbains propre à chaque période et par des considérations politico-administratives et économiques(Kettaf, 2017). Cette rétrospective historique constitue un résumé des ouvrages de(Bernard, 1939; Dagonne & Fenet, 1995; Lespès, 1938; Tinthoin, 1956).

1.1 Période préhistorique

La présence de l'agglomération d'Oran dès les premières apparitions humaines, fut affirmée par les différentes découvertes d'archéologues et de paléontologues qui affirmaient l'existence d'une Oran préhistorique. En effet, les fouilles archéologiques ont révélé que le site d'Oran fut un lieu d'activité humaine préhistorique. Les vestiges de la présence humaine à Oran remontent à au moins 100 000 ans. Il s'agit des grottes du paléolithique et du néolithique notamment les grottes du Cuartel (caserne en espagnol), de Kouchet El Djir (carrière de gypse) et celles des carrières d'Eckmühl (situées au quartier populaire Haï Mahieddine), dites abri Alain, ainsi que les Troglodytes⁴¹ dans le mont Murdjadjo. Oran, anciennement appelée Ifri qui désigne "caverne " en berbère montre qu'elle a constitué un refuge pour l'homme depuis la préhistoire.ces sites préhistoriques sont surtout implantées dans les communes d'Oran, Misserghine, El-Ançor, Bousfer, Aïn El-Turck, Gdyl,Tafraoui,

⁴¹Troglodytes sont des habitats aménagés souterrains ou creusés dans le rocher à flanc ou pied de montagne(wikipedia, 2015).

Boutlelis et Oued Tlelat. les habitations primaires de l'agglomération d'Oran sont situées toutes à proximité de sources d'eau qui alimentaient les habitants et servaient d'irrigation pour les jardins potagers ainsi qu'à proximité des carrières (pierre, chaux, plâtre, et terre à briques).

1.2 Antiquité

présence punique (6ème siècle et 1er siècle avant J.C) et romaine dans la ville d'Oran est révélée par la découverte des sites antiques. La nécropole des Andalouses en est un exemple. l'antique port romain "Portus Magnus" ainsi que le port " *Portus Divinis* " ou port divin (l'actuel Mers el-Kébir) marquent la présence romaine à Oran. Il convient de noter que depuis le xe siècle, le centre urbain principal était la ville d'Oran.

1.3 Développement urbain d'Oran de 902 à 1831

1.3.1 Période arabo-berbère

Au fond d'une baie semi circulaire, entre la pointe de Cap Falcon à l'ouest et la pointe de l'Aiguille à l'est, s'étend la grande rade d'Oran, là ou se rencontrent: mer, montagne, ravins et plateaux étagés comme le montre la Figure 12. Deux sites de mouillage auraient pu faire l'objet du choix d'urbanisation; celui d'Oran à l'est et celui de Mers-el-Kébir à l'ouest. Mers-el-kébir représente, autrefois la base militaire nommé le Gibraltar de l'Algérie. De nombreux ravins dévalent les pentes du djebel Santa Cruz et alimentent le Ras-el-Ain. De l'autre coté, dévale le torrent du ravin Blanc. Il ressort des écrits de Dagome et Fenet que la vielle ville s'est implantée sur les bords de Ras-el-Ain et sur les contreforts du Djebel Santa Cruz (Dagorne & Fenet, 1995). Le développement a buté au centre de ce Sahel oranais composé de collines et de plateaux couverts de garrigue⁴².

Les côtes du Maghreb et plus particulièrement l'ancien *Portus Divinis* des Romains, étaient utilisés périodiquement par les marins andalous arabe musulmans et les

⁴²La garrigue désigne un terrain acide et calcaire de la région méditerranéenne, c'est aussi formation végétale caractéristique des régions méditerranéennes (végétation broussailleuse qui couvre ce terrain.), proche du maquis(Wikipedia, 2017).

califes Omeyyades de Cordoue pour des raisons commerciales avec le royaume Rostemide, qui au fur et à mesure et après entente avec les tribus berbères locales, ont fondés *Ouahranen* 902. Du XIIème au XIVème siècle, le port de Mers-el-Kébir est de plus en plus fréquenté par les marins espagnols, Oran devient un point d'appui fortifié et une porte maritime. Au début du XVIème siècle, Oran regroupe 25 000 habitants établis de part et d'autre de Ras-el-Ain, et regroupe médersas, bains maures, hôpitaux, mosquées, hôtels, la citadelle de la casbah et le château neuf. En 1391, des juifs chassés d'Espagne par la persécution y arrivent, puis en 1492, des musulmans exilés d'Espagne suite à la Reconquista (chute de grenade).

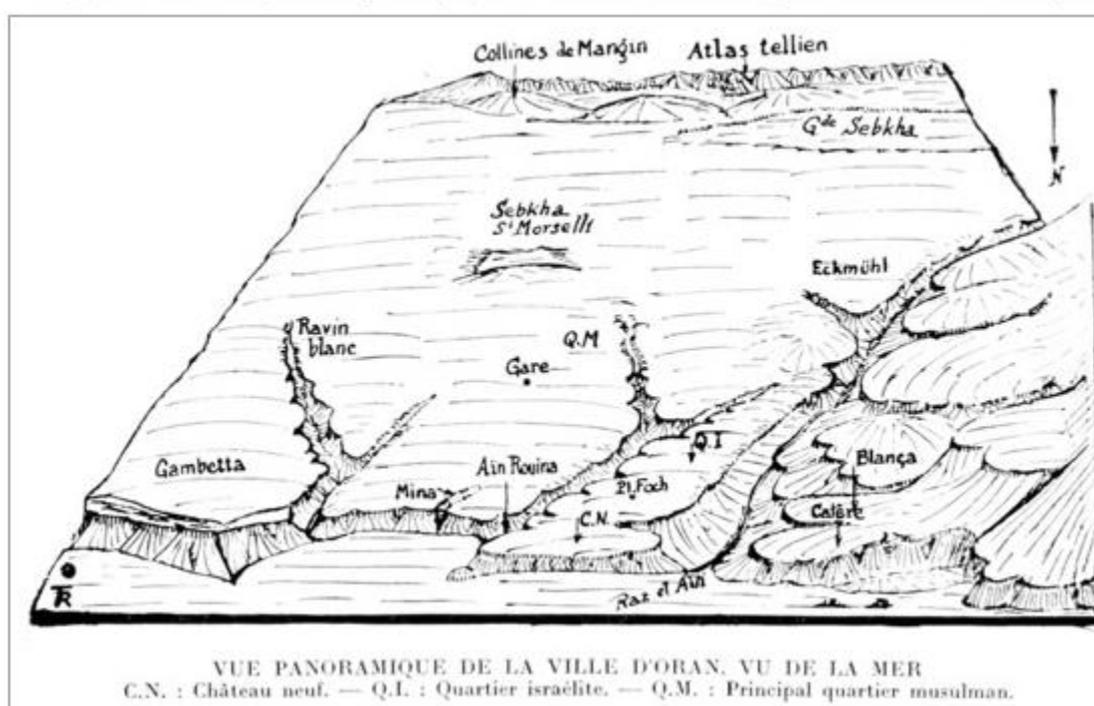


Figure 12: Représentation schématique de l'implantation de la vieille ville d'Oran (Tinthoin, 1956)

1.3.2 Période espagnole (1509-1708)

Le 13 septembre 1505, Mers-el-Kébir est pris par les Espagnols. Dès 1509 des groupes de forteresse qui complète la défense. En 1708 les espagnols perdent leur position. Cette période a vu la construction d'églises, de couvents, des casernes et des magasins militaires. Comme le montre la Figure 12, Oran devint une vaste agglomération urbaine étagée en amphithéâtre. Du nord vers le sud, Oran s'étage sur trois paliers; le premier palier

comporte le site de la Blanca espagnol qui se situe entre la montagne et le grand ravin le ChâteauNeuf qui se situe entre le site de la Blanca et l'Ain Rouina; le second palier comporte le quartier israélite (Figure 15) et la place Fosh (centre ville actuel) ; le troisième palier comporte le village Nègre, la gare, Saint-Eugène et Delmonte.

1.3.3 Période ottomane (1708-1732)

Oran est occupée par les Turcs de 1708 jusqu'à 1732, cette période a vu la construction du palais maure de la Casbah, deux mosquées et une citadelle.

1.3.4 Oran espagnole à nouveau (1732-1792)

Oran est repris une seconde fois par les Espagnols en 1730. Cette période a vu quelques tentatives d'urbanisme qui se manifestaient dans l'extension d'Oran vers l'Est et l'établissement du Plan de la Plaza. La place d'Armes se trouve à cette époque au centre de la zone construite. De ce fait, plusieurs constructions sont effectuées; le faubourg de la marine hors les murs et le faubourg de Kargentah; casernes, chapelles, tuilerie, magasins, fours à chaux. En 1792 les espagnols quittent définitivement Oran suite au grave séisme et à la suite d'un traité conclu avec le Dey d'Alger.

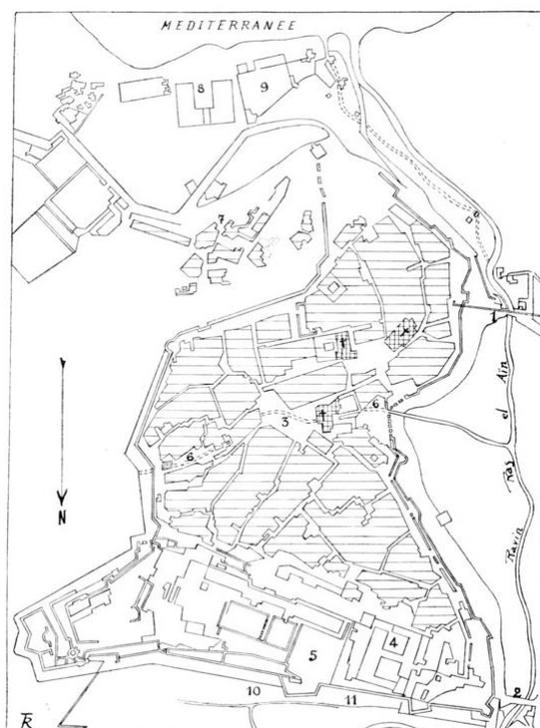


Figure 13: Oran durant la période Espagnole (Tinthoin, 1956).



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Figure 14: Carte du vieil Oran (BNF)

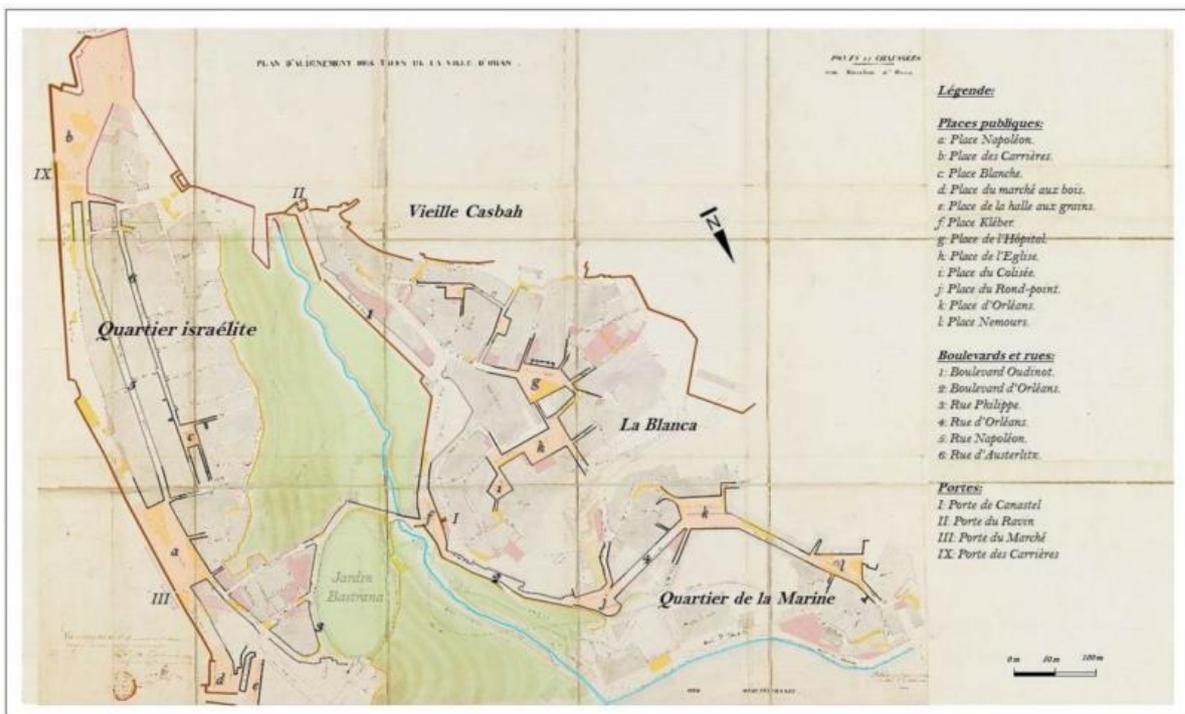


Figure 15: vieille casbah, la Blanca, quartier israélite et quartier de la marine à Oran. Source: Archives nationales d'outre-mer d'Aix-en-Provence (ANOM).

1.3.5 Oran ottomane à nouveau (1792-1831)

A moitié ruinée par le tremblement de terre et abandonnée par les Espagnoles, Oran est en piteux état. En faisant appel à des musulmans et juifs de l'Oranie et des gens de tribus, le Bey⁴³ réunit 9000 habitants Juifs, Maures, Kouloughlis⁴⁴, Andalous et Nègres. Durant cette période, le Bey a construit plusieurs mosquée notamment: la mosquée du Patcha (1796), la mosquée de Karguentah, le minaret de la mosquée de Sidi El Houari et la mosquée Ben Nacef. La nouvelle Oran ottomane se compose de trois agglomérations distinctes: la ville basse; la Blanca (entourée d'enceinte, elle domine le ravin Ras-el-Ain à l'ouest et Ain Rouina à l'est). Les quartiers sont spécialisés suivant les métiers: quartier des boulangers, des bouchers, des bijoutiers et les quartiers des orfèvres. Cependant, ces quartiers étaient encombrés d'échoppes et de masures; la ville a connu peu d'embellissement à cause des épidémies de peste qu'a connu cette période.

1.4 Période de la colonisation française (1831-1962)

1.4.1 Oran, la ville militaire (1831-1848)

Durant cette période, trois quartiers existaient: la Blanca sur les pentes de Santa Cruz, la marine en bordure de mer et la ville nouvelle appelée ville haute reconstruite après le séisme. Il s'agit surtout de la restauration de la ville en ruines, de l'adduction en eau, le tracé des voies nouvelles et la construction de bâtiments civils tel que: la mairie, la gendarmerie, l'église Saint-Louis, le tribunal, la prison, l'hôpital militaire, huit marchés et le balcon de Létang.

1.4.2 Oran, la ville civile (1848-1880)

C'est durant cette période que le Vieil Oran a été achevé. En 1848, une ordonnance érigeait Oran en commune dotée d'une municipalité. l'extension se fait vers l'Est et le Sud-est,

⁴³Bey (prononcé « bé »): nommé par le dey, chef de la régence d'Alger. le Bey est un haut fonctionnaire dans les pays occupés par l'Empire ottoman. Il est gouverneur/dirigeant des provinces de l'Algérie turque (1515-1830).

⁴⁴On appelle les Kouloughlis les descendants de Turcs ayant épousé des autochtones pendant la régence d'Alger au XVIème et XVIIème siècle(wikipedia, 2012b).

autour de la mosquée de Karguentah à l'emplacement des bâtiments militaires désaffectés. Etouffée dans son ancienne enceinte, une nouvelle enceinte militaire de 4 km est construite dans la périphérie en 1866 enserrant 75ha. Cette période a vu l'aménagement et l'extension du vieux port, la construction du bassin Aucour de 25 ha. ainsi que l'achèvement de la ligne de chemin de fer Alger-Oran et la gare en 1871. Plusieurs bâtiments publics ont été construits notamment: la préfecture, le trésor, la poste, le tribunal civil, les promenades et la mairie. Par conséquence, le centre ville se déplace des bas quartier vers la ville nouvelle ou la ville haute. Le plateau de Karguentah ou l'actuelle place du Maghreb se voit hisser de constructions.

1.4.3 La période de 1880-1900

En 1881, Oran compte 70.000 habitants répartis en trois grandes zones: la vieille ville entourée de sa muraille espagnole et ottomane, la ville nouvelle et les faubourgs extramuros (St-Eugène, Echmuhl et Gambetta). L'extension d'Oran s'effectue en tache d'huile le long des rues radiales. Les construction s'intensifient encore sur le plateau de Karguentah; de nouveaux bâtiments publics voient le jour: hôtel de ville, palais de justice, hôpital civil, théâtre, gare, lycée. Un réseau de bus s'installe et les premiers tramway électriques apparaissent en 1899. Un plan d'embellissement d'Oran et d'extension du port sont initiés.

1.4.4 La période de 1900-1939

En 1934, Oran compte 200.000 habitants. Une extension considérable de la surface bâtie est effectuée; de nouvelles voies sont tracées et de nouveaux quartiers sont développés. Ce développement se fait selon un processus de diffusion radiale par taches de lotissements. En 1922, le plan Wolff trace les grandes lignes de l'aménagement d'Oran, des habitations à bon marché, des marchés couverts, grands boulevards de ceinture de 40m(de la gare au Camp St-Philippe), un réseau d'égouts et un projet d'agrandissement du port son réalisés. Les faubourgs se développent au sud sur la route de Sénia. La première guerre mondiale de 1914-1918 freine les réalisations urbaines. A partir des années 1930, la technique du zoning de l'urbanisme moderne est appliquée à Oran en distinguant les zones de commerce, d'industries, d'agriculture, d'habitations collectives et d'habitations individuelles. En 1933, les remparts des fortifications construits en 1866 sont déclassés, la croissance urbaine de la ville ne connaît désormais plus d'obstacles. De nouvelles lignes de tramways et d'autobus sont créés. Plusieurs

bâtiments publics sont achevés à savoir; le palais des beaux-arts, les collèges, magasins, polyclinique et commissariats. Durant cette période et vu l'importance des programmes d'aménagement urbains réalisés, Oran devient une grande capitale moderne régionale de l'Algérie, Cependant, cette croissance urbaine s'arrête brutalement à cause de la seconde guerre mondiale de 1939-1945.

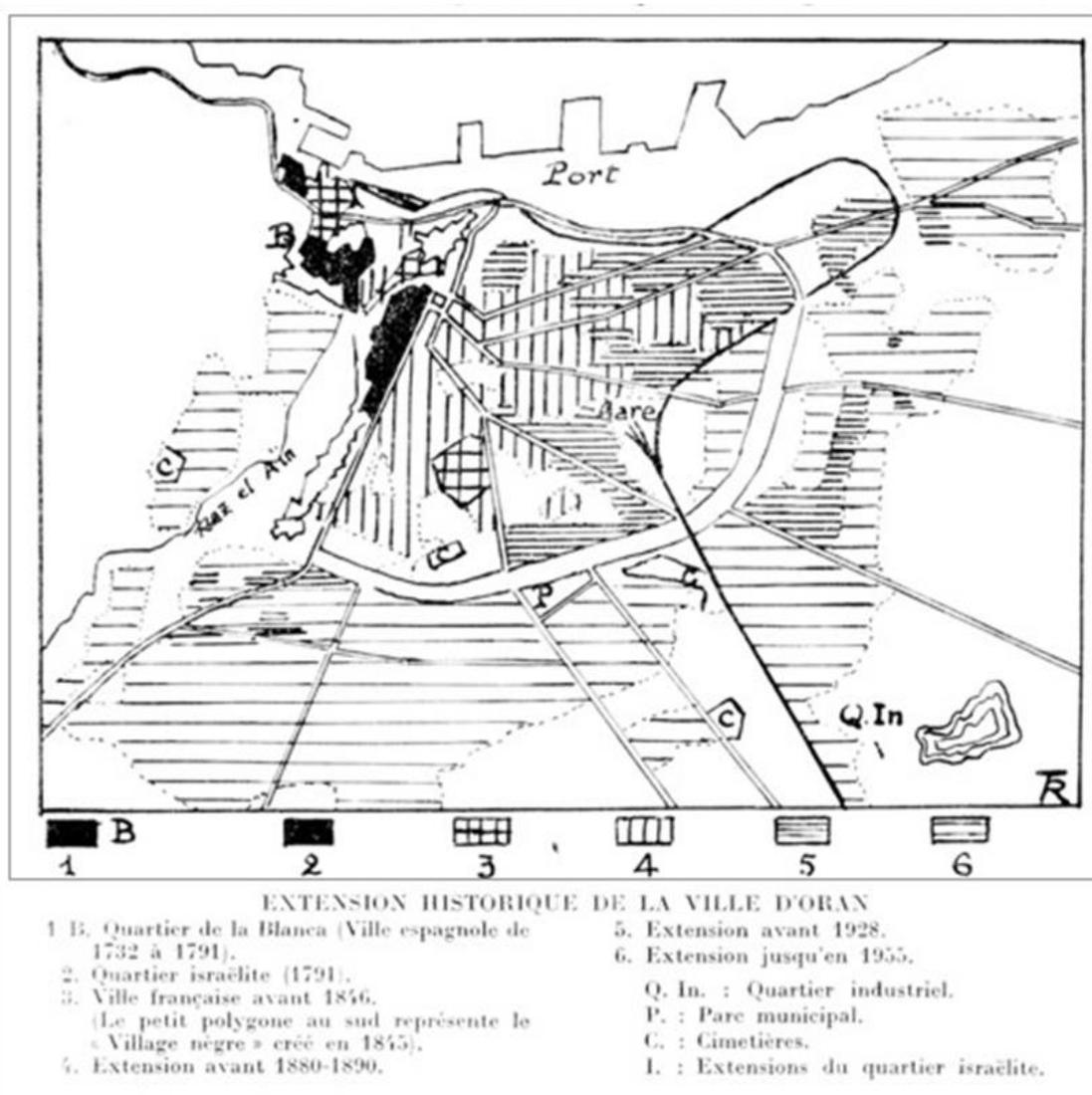


Figure 16: Carte représentant l'évolution historique de la ville d'Oran (Tinthoin, 1956).

1.4.5 La période de 1939-1962

Oran continue de s'étendre de manière concentrique. Le port continue de s'agrandir. De nouvelles constructions couvrent les pentes du massif de Santa Cruz. La construction des grands équipements se poursuit. L'aménagement complet de l'aéroport de Sénia s'achève. Le tissu urbain tend à se densifier progressivement. Les nouvelles constructions apparaissent toujours plus éloignées du centre initial. Les fonctions de la ville: commerciale, industrielle, administrative et portuaire avec une spécialisation des quartiers: la ville basse qui est proche du port comporte des quartiers de marins, d'ouvriers et de petits commerçants; le centre des affaires situés dans la ville haute, entre les places Fosh et Hoshe, la ville juive et le village Nègre réunit banques, agences de voyage, hôtels, grands cafés, gare routière, cinémas, magasins... Un deuxième boulevard périphérique ceinture les parties bâties. Le boulevard de Front-de-mer en encorbellement est réalisé en 1953. Un réseau viarie de 150 Km est remis en état avec élargissement des chaussées. L'éclairage public se perfectionne. Des jardins, lac artificiel et parc zoologiques sont créés. L'alimentation en eau et l'évacuation des eaux usées et des déchets sont assurés par le développement de réseaux adéquats. Durant cette période, la population a atteint 300.000 habitants sur une superficie bâtie de 10 Km².

1.5 La période post-indépendance de 1962 jusqu'à aujourd'hui

Les publications de (Bendjelid, 1998; Guerroudj, 2004) résument l'évolution urbaine de la ville d'Oran durant la période post-indépendance. Depuis l'Indépendance en 1962, Oran a connu une évolution urbaine et démographique considérable pour atteindre aujourd'hui plus d'un million d'habitants et 8.050 ha urbanisés. Le parc immobilier de la ville d'Oran au lendemain de l'Indépendance est très important; la vacance des immeubles a ralenti l'extension urbaine de la ville d'Oran jusqu'en 1975. Limitée au nord par la mer et à l'ouest par le Djebel de Murdjadjo, Oran s'est développée au fil du temps à partir de son noyau initial en bordure de la baie, pour s'étendre vers l'est, le sud et le sud-est. L'extension se fait principalement vers l'est de la ville en direction de Canastel et vers le sud-est sur la route Senia. Des espaces jadis tout-à-fait périphériques sont de plus en plus inclus dans l'agglomération comme la DaiaMorsly. En 1977, Oran est dotée d'un PUD qui donne naissance aux Zones d'Habitat Urbain Nouvelles (ZHUN) dans sa périphérie dans le but de répondre à la demande en logements et pour limiter la prolifération d'habitat précaire ou

informel. En 1987, la population d'Oran frise le million d'habitants. Aux anciennes fonctions d'Oran s'ajoutent les fonctions universitaires. Les phases de la croissance urbaine d'Oran sont résumées dans la carte schématisée de la Figure 17.

En 1994, les 9 arrondissements qui composaient la commune d'Oran deviennent des secteurs urbains et un nouveau découpage de la ville donne lieu à la création de trois autres secteurs portant le nombre à 12. Dans les années 2000, l'importante extension urbaine d'Oran lui a donnée le statut de métropole. En 2015, avec l'extension de la ville d'Oran, un nouveau découpage administratif au niveau des secteurs urbains est établi. Les secteurs urbains sont devenus des délégations communales, ainsi six autres délégations ont été ajoutées à la commune d'Oran, au 12 déjà existantes, totalisant un nombre de 18 délégations. En 2019, le dossier de création de ces dernières est approuvé officiellement par le gouvernement algérien. Actuellement, la commune d'Oran compte 18 délégations communales et 83 quartiers.

Le développement urbain accéléré d'Oran a entraîné une grande consommation de réserve foncière et s'est effectué sur les emprises foncières libres autour du centre colonial, ainsi que sur les terres agricoles et les espaces naturels. Ce phénomène est directement lié à une importante croissance démographique due à l'exode rural qu'a connu le pays durant les années 1960 et durant la décennie noire de 1990 à 1999. L'absence de législation en faveur de la protection de ces espaces naturels et agricoles dans les années 90 a favorisé l'étalement urbain. Au lendemain de l'indépendance, l'Algérie héritière des plans de planification urbaine français dont le PUD (Plan d'urbanisme directeur), a reconduit toutes les lois élaborées par le gouvernement français jusqu'à 1990. Les instruments d'urbanisme Algérien, les PDAU (Plans directeurs d'aménagement et d'urbanisme) et le POS (Plan d'occupation du sol) ont vu le jour à partir des années 1990. Le PDAU a délimité les zones urbanisées, à urbaniser, à urbanisation future et non urbanisables et a projeté l'extension vers l'est en raison de l'importance des réserves foncières mais également dans le but de sauvegarder les terres agricoles plus fertiles à l'ouest. La ville est morcelée en plusieurs POS. Cependant, les outils de planification urbaine paraissent inefficaces face au développement urbain accéléré. Le contexte politico-économique d'aujourd'hui ralenti un peu le développement urbain. La période de récession que connaît le pays constitue un obstacle pour plusieurs projets projetés ou en cours.

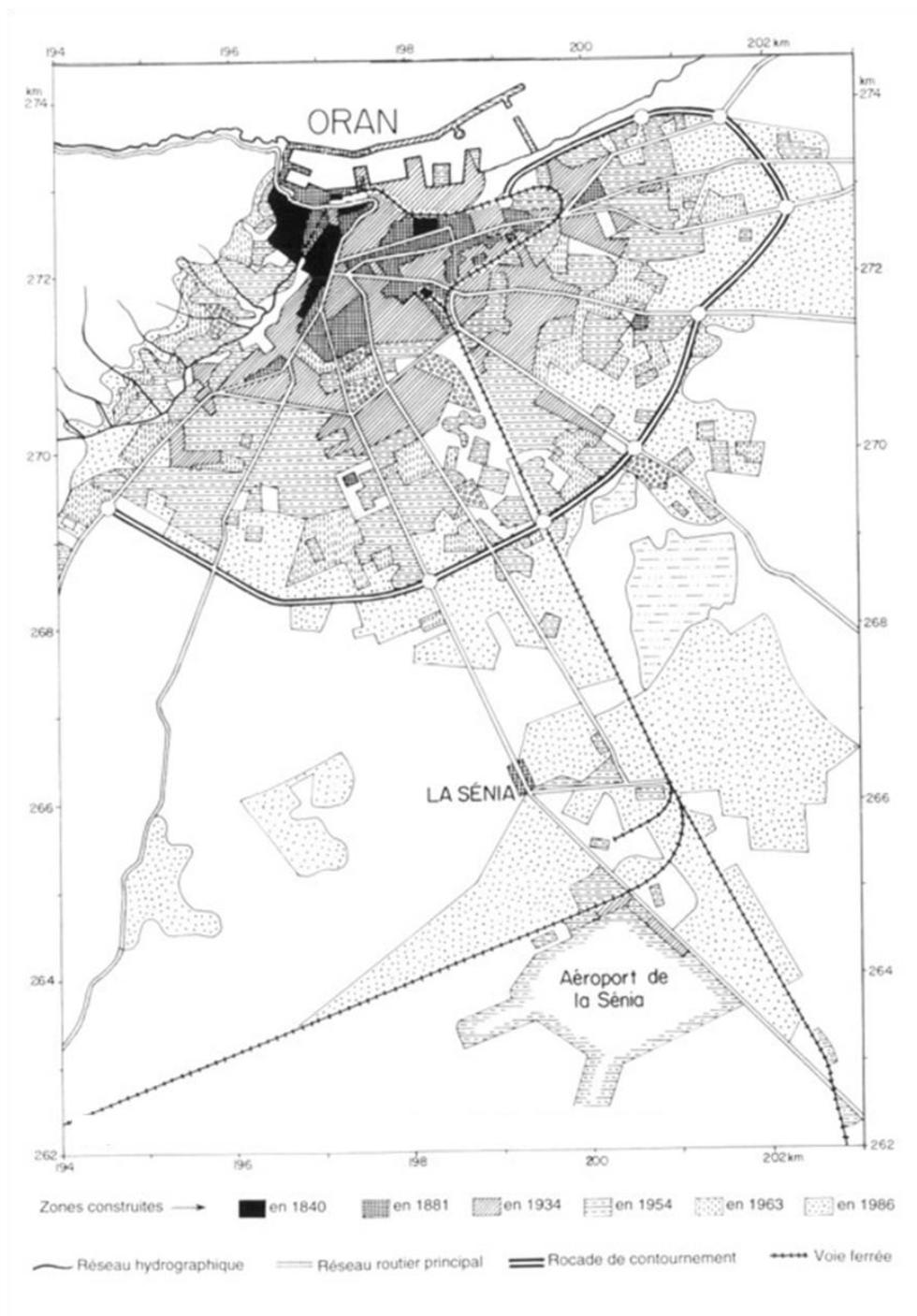


Figure 17: Carte schématique de l'évolution urbaine de la ville d'Oran selon les différentes phases (Dagorne & Fenet, 1995)

2. La structuration de la forme urbaine d'Oran au temps des épidémies

La compréhension de la structuration de l'espace urbain d'Oran nécessite de remonter dans le passé lointain. Les préoccupations de la santé publique et de l'hygiène collective sont l'un des facteurs qui ont contribué à façonner l'espace urbain d'Oran, notamment durant les épidémies du XVI^e au XX^e siècle. En plus des facteurs d'influences sur la fabrique de la forme urbaine d'Oran -étayés dans la rétrospective historique, à savoir: le relief topographique de son site, l'épaisseur historique et les différentes strates relatives aux différentes occupations qui se sont succédées- les mesures sanitaires prises pour faire face aux grandes épidémies qui ont marqué l'histoire de la ville ont joué également un rôle grandissant dans la structuration de la forme urbaine d'Oran (Kettaf, 2022). La peste et le choléra sont les épidémies qui ont sévit le plus dans la ville.

Dans son travail intitulé *"la fabrique de la ville d'Oran au temps des épidémies"*, Fadila Kettafnous explique la relation entre salubrité publique et urbanisme à Oran en examinant les travaux de René Lespès *"Oran, étude de géographie et d'histoire urbaines, qui présente l'histoire urbaine d'Oran dès les origines jusqu'aux années 1930"* (Lespès, 1938) et des articles de la revue mensuelle Chantiers nord-africains (1936, 1937) qui présentent *"les travaux d'hygiène et d'urbanisme l'historique des embellissements d'Oran"*. Il ressort de ces écrits que les épidémies ont joué un rôle prépondérant dans la transformation et la construction d'Oran.

Cependant, l'auteur souligne la rupture totale entre l'hygiène collective et l'urbanisme oranais contemporain en mettant l'accent sur les nouvelles formes urbaines notamment l'immeuble tour et son insertion dans sa parcelle qui ne semble pas respecter les principes basiques d'hygiène; d'aération et de pénétration optimale de la lumière.

2.1 Oran espagnole et Ottomane (XVI^e-XX^e siècle) frappée par la peste

Il existe un consensus commun que l'espace urbain participe à la prolifération des épidémies et que les mesures prises pour lutter contre ces dernières contribuent largement à dessiner la forme urbaine des villes. De ce fait, les principes élémentaires traçant la forme

urbaine notamment la ligne droite et la régularité reflètent les règles d'hygiène surtout en ce qui concerne l'assainissement, l'aération et la lumière.

L'organisation urbaine d'Oran, depuis son occupation espagnole au XVI^e siècle, reflète les préoccupations de l'hygiène collective jusqu'au XX^e siècle. La peste du XVI^e siècle a décimé plus de la moitié de la population à Oran(Oulebsir, 2020). Cette épidémie a touché Oran pendant les deux périodes d'occupations espagnoles (1509-1708 puis 1732-1792). Durant la première période, pour tenter de lutter contre l'épidémie, le "conduit royal" a été installé afin d'assurer l'écoulement des eaux pluviales venues de la montagne et éviter que ces eaux stagnent dans les rues boueuses et non pavées. Durant la deuxième période une préoccupation plus importante d'amélioration urbaine d'Oran a été effectuée, il s'agit pavement des rues et des places, l'élargissement des sentiers, la création de places, réalisation de ponts, portes, fontaines, l'assainissement et l'alimentation en eau(TERKI-HASSAÏNE, 2004).

Les espagnoles quittèrent définitivement Oran après le séisme de 1790. Le retour des Ottomans en 1792 a vu des actions de repeuplement et d'urbanisation pour redonner vie à la ville détruite par le tremblement de terre et l'épidémie de la peste, mais cette fois le Bey choisit de nouveaux sites hors la vieille ville (Kettaf, 2019). Cependant, la peste réapparut une nouvelle fois, peste d'Osman⁴⁵en 1794 et la peste de la Mecque⁴⁶en 1817(Lespès, 1938). C'est dans ce cadre que le Bey exigea des constructions extra-muros avec: des alignements, des angles droits et des lots structurés avec de longues voies parallèles.

2.2 Oran durant la période française et l'apparition du choléra

Kettaf écrit que *"L'expédition française en Algérie marque la transformation et le développement les plus significatifs. Elle s'illustre par l'introduction des modèles occidentaux d'aménagement urbain, dont l'outil principal est le plan d'alignement, de nivellement et des réserves. La ville française s'installa sur l'essentiel de la ville hispano-turque"*(Kettaf, 2022). L'épidémie du choléra a fait son apparition à Oran en Octobre 1834, ce qui a conduit à la

⁴⁵Peste d'Osman: appelée ainsi en mémoire du fils du Bey qui fut l'une des victimes.

⁴⁶ Peste de la Mecque: apportée par les pèlerins.

réalisation de travaux d'assainissement et de voiries pour répondre aux problématiques de la salubrité publique. Toutefois, ces actions se sont contentées dans la réparations des conduites existantes pendant dix ans, les priorités étant accordées aux objectifs militaires. Ce n'est qu'en 1840 que les premiers plans d'aménagement urbain sont établis. Des plans d'aménagement de voiries sont introduits: alignements, redressements, élargissements, percements. Les culs-de-sac, considérés comme une cause d'insalubrité ont été supprimés. Kettaf précise que " *un plan de rectification, d'alignement et de nivellement des rues de la ville fut levé et publié le 8 octobre 1840. Il montre clairement l'importance accordée à la régularité de l'espace urbain, alors particulièrement dense et tortueux. L'espace urbain est construit sur des alignements de rues et de places pour rectifier et limiter les saillies, pour aérer et renforcer la salubrité (figure 1). Cette période militaire est aussi marquée par des travaux importants pour améliorer les communications dans la ville grâce à la réalisation de nouvelles voies et à l'assainissement en matière d'égouts et d'hygiène publique*" (Kettaf, 2022).

Durant les épidémies du choléra en 1849 et 1851, et du typhus en 1867 et 1868, les priorités ont été accordées à l'hygiène collective, la ville est structurée en réseaux de grands axes rectilignes et alignés, de larges lotissements et de larges boulevards jalonnés de grandes places et alignés d'arbres à fin de permettre la circulation de l'air. Les travaux de construction qui s'étaient ralentis depuis 1866 en raison des épidémies et de la crise économique, avaient repris en 1877 avec l'établissement du régime républicain et avec la stabilité politico-économique . C'est à partir de là que la ville d'Oran a connu une véritable transformation urbaines.

Les plans d'embellissements d'Oran entrepris à la fin du xixe siècle ont fortement contribué à l'amélioration de l'hygiène collective et l'organisation urbaine. Bien que les travaux ralentissent durant la période de l'entre-deux-guerres, la loi Cornudet⁴⁷ de l'urbanisme hygiéniste et social a fait son apparition à Oran dès 1922. Cette loi a doté la ville de Plan d'Aménagement, d'Embellissement et d'Extension (PAEE) basé sur les principes hygiénistes. le plan Wolff de 1927 est établi dans le cadre de cette loi. Après la Deuxième Guerre

⁴⁷La loi Cornudet est une loi française établie en 1919, Cette loi oblige les villes françaises de 10 000 habitants et plus à se doter d'un Plan d'Aménagement, d'Embellissement et d'Extension (PAEE) intégrant des servitudes hygiénistes, archéologiques et esthétiques.

mondiale, le mouvement fonctionnaliste rejette le système rue-îlot-parcellaire jugé pathogène (Kettaf, 2022). Kettaf écrit que *"cet urbanisme fonctionnaliste avec ses grands ensembles d'habitats construits en périphérie (zones à urbaniser en priorité, ZUP) s'est poursuivi après l'indépendance avec la production de zones d'habitat urbain nouvelles (ZHUN, équivalent de la ZUP)"* (Kettaf, 2019).

2.3 Oran au XXI^e siècle: la dissociation entre l'urbanisme et l'hygiène publique

À partir des années 2000, la ville connaît des mutations urbaines principalement dues aux spéculations foncières et financières qui ne sont pas basées sur les instruments d'urbanisme règlementaires, ce qui a produit des îlots denses sans espaces extérieurs et sans retrait, qui ne tiennent pas compte des caractéristiques du tissu urbain existant et avec une emprise au sol de 90 % à 100 % de l'assiette foncière (Mouaziz-Bouchentouf, 2017). L'étude menée par Kettaf sur les modes d'insertion montre que *"des immeubles avec un ratio (hauteur du bâti/largeur du non bâti) supérieur à 4 sur les rues principales et supérieur à 7 sur les rues secondaires ont été construits. ce qui dépasse largement le ratio moyen du centre-ville (de 1,6 à 3)"* (Kettaf, 2019). Ceci a généré des problématiques de vis-à-vis, d'aération et d'ensoleillement. Rezk-kallah et al., souligne que *" Ces formes denses impactent le ressenti du piéton dans l'appréciation de l'environnement et peuvent même entraîner un sentiment d'oppression, voire de claustrophobie" les habitants vivent dès lors dans une proximité intense, les rendant certainement plus vulnérables à la transmission des virus"* (Rezk-kallah, Appert, Aiche, & Chachour, 2021).

2.4 Oran au temps de la Covid-19

La pandémie du Covid-19 a incité les chercheurs à repenser ces formes urbaines et évaluer leur impact sur la santé humaine, quelle soit physique (qualité de l'air, mobilité douce...) ou mentale en termes de perception de l'espace urbain et son ressenti. Dans ce cadre, des conférences, des journées d'étude et des séminaires ont été réalisés. A Oran, le Centre de recherche en anthropologie sociale et culturelle (CRASC) a mené des manifestations scientifiques internationales sur l'impact de la Covid-19 dans le domaine de l'urbanisme. Cela a abouti à une synthèse de rapport intitulée *"Covid19- en Algérie : enseignements et regards croisés (premiers éléments de réflexion)"* (CRASC, 2020). Dans cette synthèse de rapport,

deux chapitres, intitulés "*Covid-19 et configuration géographique et urbaine*" et "*Covid et mobilité*", sont entièrement consacrés à la Covid-19 et l'urbanisme. Les contributeurs soulignent la nécessité de réfléchir la façon dont la ville est conçue en mettant la santé humaine au cœur des recherches urbaines. Les chercheurs pointent du doigt les problématiques liées au transport public à Oran. Cependant, Kettaf précise que "*Ces réflexions ne sont, cependant, que très rarement issues d'analyses appuyées par des travaux de recherche suffisamment approfondis, et il est prématuré pour que l'on dispose de résultats crédibles[...] les savoir-faire hérités des époques hygiénistes peuvent être exploités et revisités de sorte que de meilleurs espaces puissent être créés les configurations de forme urbaine et d'aménagement des espaces publics doivent être repensées à la lumière des exigences du bien-être des habitants et de la ville saine, résiliente et vivable*" (Kettaf, 2022). Le CRASC a lancé un projet de recherche intitulé " Territoires et Pandémie" afin d'évaluer la relation entre la forme urbaine et la Covid-19.

3. Qualité de l'air à Oran

Une étude a été menée sur la qualité de l'air à Oran intitulée "*Croissance urbaine, mobilité et émissions de polluants atmosphériques dans la région d'Oran, Algérie*" (Rahal et al., 2018). Ce travail a abouti à des données concernant l'oxyde d'azotes qui est l'un des polluants majeur de l'air atmosphérique représentées dans la Figure 18.

La méthodologie utilisée est basée sur l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) et la modélisation pour une représentation spatio-temporelle du polluant. Il s'agit d'un cadastre de la répartition du polluant à travers la ville d'Oran qui évalue et fournit l'information sur la qualité de l'air. Les résultats sont obtenus en appliquant le modèle EMISENS. Le travail a consisté à étudier l'évolution de la forme urbaine et son impact sur la mobilité notamment celle relative aux déplacements motorisés. Le modèle EMISENS (EMISSIONSENSitivity) combine les deux approches «Bottom-up»⁴⁸ et «Top-down»⁴⁹ afin

⁴⁸L'approche Bottom-up est une méthode de modélisation ascendante. Cette méthode quantifie la pollution en fonction de la répartition des activités polluantes dans une ville (Abulude, Moez, A., & A., 2017).

d'obtenir des résultats crédibles en matière de l'estimation des émissions urbaines (Ho & Clappier, 2011).

La méthodologie de ce travail a consisté à classer les véhicules en catégories, puis à spécifier Des facteurs d'émission moyens pour chaque catégorie de véhicules selon la méthode de (Belalcazar et al., 2010) ou de la méthodologie européenne COPERT⁵⁰. Ce regroupement en catégories permet de calculer plus rapidement les émissions à partir des données du parc de véhicules : nombre de véhicules dans chaque catégorie, flux de véhicules, vitesse des véhicules, facteur d'émission moyen, etc. Ce modèle calcule également les incertitudes liées aux paramètres d'entrée et d'identification estimés pour améliorer significativement le résultat. Le calcul des émissions par le modèle EMISENS est basé sur un programme informatique pour calculer les émissions du trafic routier par la méthodologie COPERT (Ntziachristos et al., 2009) La visualisation et l'analyse des les résultats sont effectués sur un système d'information géographique. Le résultat de cette simulation est représenté sous la forme d'un maillage couvrant la ville d'Oran, pour chaque maille de la grille, une valeur de NOx a été attribuée (Figure 18).

3.1 Source de pollution atmosphérique à Oran

Rahal et al.,montrent que le trafic routier est la principale source de pollution atmosphérique à Oran.

3.1.1 Pollution due au trafic routier

En Algérie, les NOx sont principalement émis par le secteur des transports. En effet, 69% des émissions d'oxydes d'azote sont causées par le trafic routier (Rahal et al., 2018). Sur la base des données sur le réseau routier d'Oran, ainsi que sur l'estimation des flux de véhicules

⁴⁹ L'approche Top-down est une approche descendante. Cette méthode commence par surveiller la pollution ambiante grâce à la génération de données, puis utilise des modèles pour relier les mesures à des sources spécifiques de polluants grâce à l'analyse chimique des échantillons (Abulude et al., 2017).

⁵⁰ COPERT (Computer Program to calculate Emissions from Road Transport) est une méthodologie européenne permettant le calcul des émissions de polluants du transport routier (CNDP, 2015).

établie par Rahal et al., (2018), le flux de véhicules pour chaque zone et pour chaque catégorie de véhicules ; VP (Véhicule Particulier), VUL (Véhicule Utilitaire Léger), VL (Véhicule Lourd) et BUS ont été calculés (Tableau 5) (ajouter citation article BOUDALIA et al.,)

3.1.2 Emission de NOx par habitant

la densité d'émission de NOx par habitant et par an à Oran est de 6,3 kg/habitant/an(Rahal et al., 2018). De ce fait les émissions de NOx par habitant ont été calculées pour chaque zone de la ville d'Oran (Tableau 6)(ajouter citation article BOUDALIA et al.,).

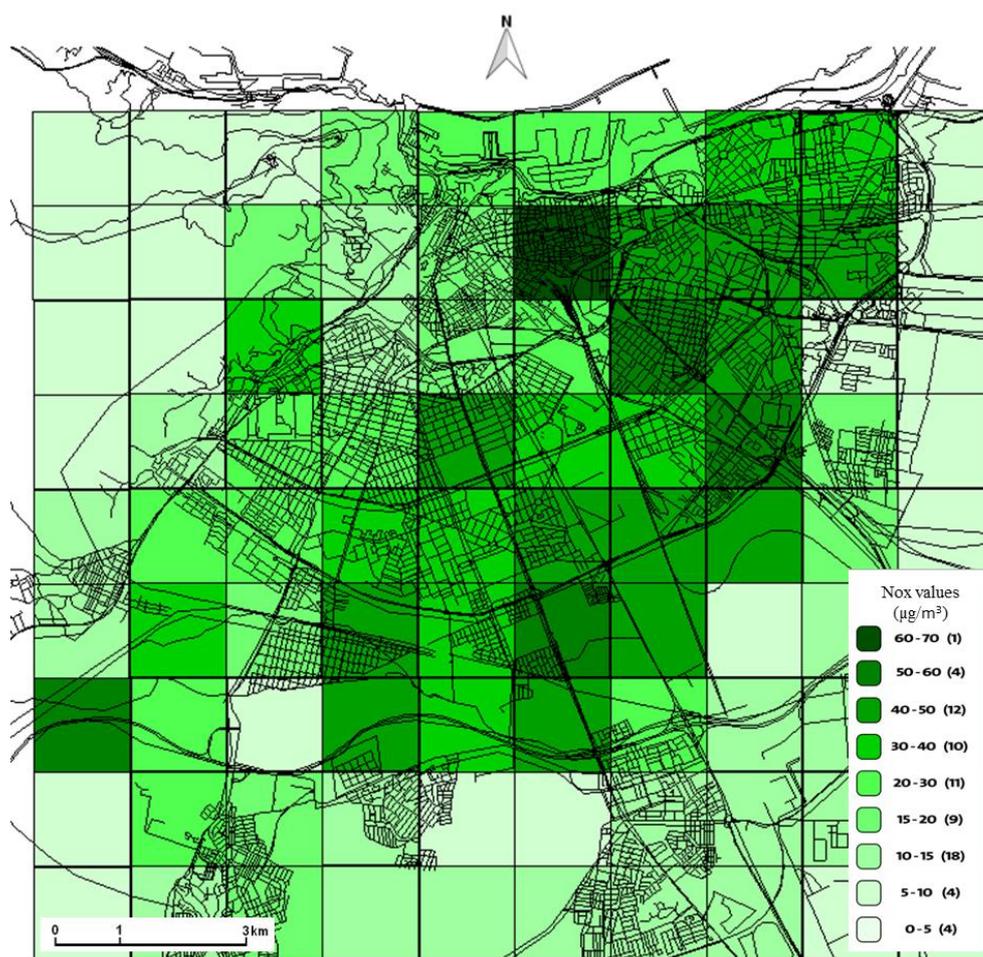


Figure 18: Les données sur la qualité de l'air à Oran (Rahal, Hadjou, Blond, & Aguejdad, 2018).

Zone	PV	VUL	VL	BUS	Valeur Nox (µg/m3)
1	61 505	20 703	6 664	2 422	60 -70
2	2 121	714	230	84	10 -15
3	4 242	1 428	460	167	10 -15
4	6 363	2 142	689	251	15 -20
5	12 725	4 283	1 379	501	20 -30
6	10 604	3 569	1 149	418	20 -30
7	8 483	2 856	919	334	20 -30
8	19 088	6 425	2 068	752	30 -40
9	23 329	7 853	2 528	919	40 -50
10	25 450	8 567	2 758	1 002	40 -50
11	16 967	5 711	1 838	668	30 -40
12	50 901	17 133	5 515	2 004	50 -60
13	46 659	15 705	5 056	1 837	50 -60
14	42 417	14 278	4 596	1 670	40 -50
15	29 692	9 994	3 217	1 169	40 -50
16	21 209	7 139	2 298	835	30 -40
17	27 571	9 280	2 987	1 086	40 -50
18	14 846	4 997	1 609	585	30 -40

Tableau 5: estimation des flux de véhicules en veh.Km.h-1((Boudalia et al., 2023)

zone	Population	Densité d'émission de NOx par habitant par an (Kg/capita/year)	Valeur Nox (µg/m3)
1	66 674	10 583	60 -70
2	20 725	3 290	10 -15
3	58 873	9 345	10 -15
4	48 194	7 650	15 -20
5	29 910	4 748	20 -30
6	25 874	4 107	20 -30
7	40 080	6 362	20 -30
8	22 477	3 568	30 -40
9	12 735	2 021	40 -50
10	7 646	1 214	40 -50
11	14 000	2 222	30 -40
12	63 700	10 111	50 -60
13	38 324	6 083	50 -60
14	42 807	6 795	40 -50
15	16 991	2 697	40 -50
16	27 630	4 386	30 -40
17	7 818	1 241	40 -50
18	11 476	1 822	30 -40

Tableau 6: Densité d'émission de NOx par habitant par an à Oran ((Boudalia et al., 2023)

Zone	Densité de population (hab./ha)	Densité de construction	Densité résidentielle (Nombre de logement/ha)	Densité d'espaces verts
1	427,4	0,7	72,2	0,001
2	265,7	0,4	43,3	0,065
3	232,7	0,5	40	0,056
4	280,2	0,7	46,6	0,067
5	137,2	0,6	19,2	0,023
6	148,7	0,5	21,7	0,025
7	200,4	0,6	26,8	0,034
8	123,5	0,5	32,1	0,011
9	84,9	0,7	33,4	0,007
10	48,7	0,4	6,6	0,004
11	140	0,6	4	0,015
12	700	0,5	24,5	0,002
13	228,8	0,5	29,9	0,002
14	221,8	0,5	31,6	0,003
15	107,2	0,7	16,7	0,006
16	153,5	0,7	23,2	0,013
17	67,4	0,5	11,2	0,005
18	61,7	0,4	10	0,01

Tableau 7: Les valeurs des indicateurs de densité urbaine pour chacune des 18 zones (Boudalia et al., 2023)

4. La mortalité attribuable à une concentration de polluants atmosphériques dépassant les recommandations de l'OMS

Dans nos travaux précédents (Boudalia et al., 2023), nous avons calculé le taux de mortalité attribuable à une concentration de polluants atmosphériques qui dépasse les valeurs seuils des recommandations de l'OMS sur la qualité de l'air en utilisant la méthodologie d'évaluation de l'impact sur la santé (EIS) (Mueller et al., 2017) en exploitant les données sur la population (n=555 935) et le taux de mortalité (ORS, 2017).

La méthodologie EIS s'effectue en suivant ces étapes: (1) nous avons identifié les niveaux d'exposition actuels (concentration en NO_x dans l'air pour chaque zone) (Tableau 5).; (2) nous avons déterminé le niveau d'exposition recommandé sur la base des lignes directrices de l'OMS qui recommande que la concentration moyenne annuelle d'exposition aux NO_x ne dépasse pas 40 µg/m³ (W. H. Organization, 2006); (3) pour chacune des 18 zones, nous avons calculé la différence entre les expositions actuelles et les expositions recommandées par l'OMS (40 µg/m³); (4) nous avons extrait la fonction exposition-réaction (FER) de la littérature: le risque relatif (RR) associé à l'exposition aux NO_x est de 1,02 (IC 95 % : 1,018-1,022) pour chaque 10 µg/ m³ au-dessus de 40 µg/ m³ (Atkinson, Butland, Anderson, & Maynard, 2018) qui quantifie la mortalité relative à l'exposition; (5) nous avons calculé le risque relatif (RR) comme indiqué dans l'équation (1) (Gowers, Miller, & Stedman, 2014), le risque relatif est égal à l'estimation du risque extraite de la littérature 1,02 (IC à 95 % : 1,018-1,022) due à l'exposition aux NO_x pour chaque 10 µg/ m³ au-dessus de 40 µg/ m³, à la puissance du rapport entre la différence d'exposition (X) et 10; (6) nous avons calculé la fraction étiologique du risque (FER) [en Anglais population attributable fraction (PAF)] selon l'équation (2) (Gowers et al., 2014); (7) pour obtenir le nombre de décès dus à l'exposition à des niveaux élevés de NO_x, on multiplie la valeur de FER par le nombre total de décès pour chaque zone divisé par 100. Le résultat est présenté dans le Tableau 8.

$$RR = RR'_{10}^x \quad (1)$$

Où RR' est le risque de mortalité relatif à l'exposition aux NOx, modélisé à l'aide d'une fonction exposition-réaction, et x est la différence d'exposition (différence entre l'exposition actuelle et 40ug/m3 recommandée par l'OMS).

$$\frac{PAF=RR-1}{RR} \quad (2)$$

zone	La mortalité attribuable
1	238 (212, 260)
12	152 (137, 166)
13	91 (83, 100)
14	52 (47, 57)
15	21 (19, 23)
17	10 (9, 10)
10	9 (8, 10)
9	15 (14, 17)
	total: 588 (529, 643)

Tableau 8: Nombre de mortalité respiratoire dans les zones avec une concentration en NOx supérieure à 40 ug/m³(Boudalia, Kasmi, & Alili, 2023).

Conclusion

Les mesures prises pour lutter contre les épidémies ont fortement contribué à dessiner la forme urbaine d'Oran. De ce fait, les principes élémentaires traçant la forme urbaine notamment la ligne droite et la régularité reflètent les règles d'hygiène surtout en ce qui concerne l'assainissement, l'aération et la lumière. Pour tenter de lutter contre la peste et le choléra, des opérations ont été réalisées, à savoir: pavement des rues et des places, l'élargissement des sentiers, la création de places, réalisation de ponts, portes, fontaines, l'assainissement et l'alimentation en eau, des alignements, des angles droits et des lots structurés avec de longues voies parallèles, des constructions extra-muros. Pour répondre aux problématiques de la salubrité publique. Des plans d'aménagement urbain sont introduits: alignements, redressements, élargissements, percements. Les culs-de-sac, considérés comme une cause d'insalubrité ont été supprimés. Ces épidémies ont structuré la ville en réseaux de grands axes rectilignes et alignés, de larges lotissements et de larges boulevards jalonnés de grandes places et alignés d'arbres à fin de permettre la circulation de l'air. Plus tard, les plans d'embellissements d'Oran et la loi Cornudet⁵¹ de l'urbanisme hygiéniste ont fortement contribué à l'amélioration de l'hygiène collective.

Cependant, le XXI^e siècle est marqué par la dissociation entre l'urbanisme et l'hygiène publique. La ville connaît des mutations urbaines principalement dues aux spéculations foncières et financières qui ne sont pas basées sur les instruments d'urbanisme réglementaires, ce qui a produit des îlots denses sans espaces extérieurs et sans retrait, qui ne tiennent pas compte des caractéristiques du tissu urbain existant et avec une emprise au sol de 90 % à 100 % de l'assiette foncière. La récente pandémie du Covid-19 a incité les chercheurs à repenser ces formes urbaines et évaluer leur impact sur la santé humaine, quelle soit physique (qualité de l'air, mobilité douce...) ou mentale en termes de perception de l'espace urbain et son ressenti.

⁵¹La loi Cornudet est une loi française établie en 1919, Cette loi oblige les villes françaises de 10 000 habitants et plus à se doter d'un Plan d'Aménagement, d'Embellissement et d'Extension (PAEE) intégrant des servitudes hygiénistes, archéologiques et esthétiques.

Chapitre II: Les SIG comme outil incontournable à l'analyse de la compacité urbaine

Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons l'évaluation de la compacité urbaine en se basant sur l'approche des indices paysagers et l'utilisation des outils SIG. Cette approche nécessite l'application de tout un processus de télédétection pour convertir les données satellitaires en images raster afin de pouvoir effectuer le calcul des indices paysagers sur le logiciel FRAGSTATS. De ce fait, dans la première partie de ce chapitre, nous expliquons en détail les notions fondamentales sur le processus de télédétection spatiale et les différentes méthodes de la classification numérique d'image. Dans un second temps, nous exposons une explication détaillée de chacun des 10 indicateurs paysagers pour l'analyse quantitative du tissu urbain d'Oran qui va servir à évaluer la compacité urbaine de chaque zone d'étude.

Par la suite, nous passons à l'application de ce processus sur notre cas d'étude en expliquant pas à pas toutes les démarches: en commençant par l'utilisation du portail de données USGS Earth Explorer pour l'acquisition des données satellitaires et le satellite Sentinel-2, en passant par l'application de l'approche de la classification supervisée pour classer les données satellitaires en classe du bâti et en classe du non bâti selon les trois phases (La phase du pré-traitement, La phase du traitement, La phase du post-traitement) pour l'obtention de l'image raster sur le logiciel QGIS et le plugin SCP, jusqu'à l'étape du calcul des indicateurs sur le logiciel FRAGSTATS.

1. L'utilisation de la géomatique dans les études urbaines

Etymologiquement, la géomatique est la combinaison syntaxique de deux mots. Le mot est composé du préfixe –géo- qui est le diminutif de géographie, et le suffixe –matique- provenant du terme –informatique-. C'est une discipline regroupant l'ensemble des pratiques, des outils, des méthodes et technologies qui permettent de collecter, d'analyser et de diffuser des données géographiques, aussi appelées "données spatiales" ou "données géospatiales". Ce sont des données numériques décrivant le territoire ou tout autre objet ou phénomène ayant une position géographique.

La géomatique englobe plusieurs domaines tels que la cartographie, la topométrie, la géodésie, la géographie, la photogrammétrie, l'arpentage, la télédétection, les Systèmes d'Information Géographique (SIG), Le Système de positionnement mondial (GPS, Global Positioning System). En procurant des données fiables, la géomatique aide à la prise de décision dans plusieurs secteurs, que ce soit dans l'aménagement du territoire, l'agriculture, l'infrastructure, l'environnement, la démographie, l'urbanisme, la santé, la sociologie, l'économie, le tourisme, le transport ainsi que la gestion des catastrophes naturelles.

Au fil du temps, et avec la croissance démographique et urbaine que connaissent nos villes, l'application de la géomatique dans les études urbaines devient de plus en plus importante. Établir une analyse à l'échelle d'un territoire nécessite de disposer de connaissances et de données pertinentes. L'analyse urbaine s'appuie alors sur les outils de la géomatique tel que la maîtrise des outils de géoréférencement, le traitement des données satellitaires ou aériennes, et la conduite de projets territoriaux intégrant des bases de données spatiales, des SIG et des compétences thématiques. Elle aide à la prise de décision soutenue par une masse considérable de données géospatiales fiables et à jour, des inventaires complets et des statistiques appropriées permettant ainsi de mieux comprendre la dynamique urbaine, faciliter l'échange d'informations entre les parties prenantes, identifier et répondre aux besoins actuels, transformer les réflexions et les solutions en actions concrètes et faisables et de modéliser et simuler des évolutions futurs de structures urbaines afin d'améliorer la qualité de vie, fournir un bon fonctionnement des villes et favoriser des établissements urbains favorables à l'environnement et à l'être humain.

L'utilisation de la géomatique dans le domaine de l'urbanisme se manifeste notamment par la production, la collecte, l'analyse et le traitement, la visualisation et la diffusion des données liées à l'aménagement du territoire et l'occupation des sols, la gestion des ressources naturelles, l'analyse de l'impact environnemental et la climatologie urbaine, la préservation des sites historiques, l'Analyse de réseaux d'accessibilité aux services et équipements, la lutte contre la pollution urbaine, la maîtrise de l'étalement urbain, la planifications des infrastructures urbaines et de transport, la gestion des déchets urbains et la prévention des risques et phénomènes majeurs.

Les villes sont liées à une très grande quantité de données, que ce soit des données environnementales, socio-économiques ou urbaines. Les outils de géomatique permettent de fournir une seule base de données ou toute ces informations sont stockées et organisées afin de faciliter l'accès à l'information et l'échange entre les planificateurs et les décideurs, fournissant ainsi une communication visuelle de l'analyse urbaine et des projets d'urbanisme pour en assurer une gestion optimale et efficiente.

2. La télédétection et les SIG au service de l'observation et l'analyse urbaine

Du fait de l'essor du phénomène urbain et son amplification durant la période post-révolution industrielle, les techniques et les outils classiques de l'acquisition des données se sont révélées incapables de suivre cette mutation et sont devenus obsolètes. Dès lors, la télédétection et les SIG ont fait leur apparition comme étant des outils de pointe pour l'analyse spatiale et constituent aujourd'hui une partie intégrante des modèles d'analyse et de prospective pour une gestion efficace et raisonnée de l'environnement urbain. Historiquement, Les technologies de télédétection et de SIG se sont développées comme deux disciplines séparées et ce n'est qu'après 20 ans que les applications de télédétection ont commencé à intégrer les données SIG dans l'analyse des images (Diwakar, 2021). La démocratisation des outils SIG et la généralisation de leur utilisation dans le domaine de télédétection vient enrichir la boîte à outils des urbanistes.

Une meilleure prise de décision nécessite une meilleure information. La télédétection et les SIG sont des outils avancés par excellence en vue d'une connaissance détaillée des milieux urbains, rendue possible aujourd'hui grâce à des capteurs à très haute résolution spatiale. Ce sont des leviers d'investigation pour faire face à toutes sortes de situations en rassemblant toutes les informations géospatiales des territoires tout en facilitant une bonne communication entre les différents acteurs, favorisant ainsi une de planification urbaine intégrée et une bonne gestion des problématiques territoriales multidimensionnelles et interdisciplinaires. En traitant les données géospatiales issues de l'imagerie satellitaire ou de la photographie aérienne à l'aide des outils de SIG, la télédétection urbaine fournit principalement le suivi de la dynamique urbaine, la mise à jour cartographique, l'analyse de la forme urbaine, la cartographie de l'occupation du sol, le suivi de l'étalement urbain, l'analyse des écosystèmes urbains et la thermographie qui étudie les îlots de chaleur et de la pollution atmosphérique des villes. Les résultats de télédétection comme les spatio cartes et les ortho images, traités au sein d'un système d'information géographique, fournissent un support d'étude et d'analyse efficace à l'échelle urbaine. Les enjeux majeurs auxquels les villes ont à faire face aujourd'hui, sont tous liés à la géographie, les SIG offrent la possibilité de visualiser les différents scénarios pour mieux appréhender les solutions possibles.

Parmi les exemples d'études urbaines qui ont utilisé la télédétection et les SIG, on cite : celui de la Chine où une modélisation spatio-temporelle a été établie pour observer les tendances d'évolution et de distribution de la population urbaine (Yue et al., 2005), de même, celui modélisant les activités humaines à fort impact environnemental (Tissot, Rouan, Tixerant, & Cuq, 2005), celui de l'Atlanta aux USA où une étude sur la climatologie urbaine a été mise au point pour localiser les sites les plus chauds (Zhou & Shepherd, 2010), celui de l'évaluation de l'accessibilité et des dynamiques spatiales des tissus urbains abordé dans 14 pays développés (Fritsch & Wyrwich, 2021) ou encore celui analysant l'hydrologie urbaine en élaborant des modèles de réseaux hydrographique en Espagne (Rodríguez-Rodríguez, Moral Martos, & Benavente, 2007).

3. Notions fondamentales sur le processus de télédétection spatiale

La télédétection est une technique d'acquisition d'informations à distance (sans contact direct avec celui-ci) sur un objet terrestre, à partir des rayonnements qu'il émet ou réfléchit.

Ces informations peuvent concerner les propriétés géométriques, physico-chimiques (température, teneur en eau, matière organique du sol, ...) et spectraux (réflexion, transmission, absorption, etc.) de l'objet, obtenues à l'aide de capteurs satellitaires ou aériens (avion, hélicoptère, drone).

Le processus de télédétection implique une interaction entre la lumière (rayonnement électromagnétique) et la cible, il se base sur la physique quantique s'appuyant sur le rayonnement électromagnétique et les l'informatique utilisant des algorithmes de traitement des images. Ce processus comprend cinq éléments essentiels; (1) la source de lumière qui peut être soit naturelle (le soleil) ou artificielle. Cette source d'énergie sert à illuminer l'objet d'intérêt. (2) La cible ; l'énergie solaire est captée par les objets sur sol, une certaine partie de cette énergie est absorbée et l'autre partie est renvoyée, c'est cette énergie réfléchi qui est captée par le capteur. (3) Le capteur ; un appareil placé sur une plateforme (satellite, avion, drone) reçoit et recueille l'énergie émise ou réfléchi par la surface éclairée, transforme et délivre l'énergie captée en signal électrique mesurable. (4) Le récepteur ; les informations envoyées par le capteur sont reçues par des antennes, ces stations de réceptions transforment le signal en données sous forme d'images brutes numériques recodées de 0 à 255. (5) la Station de traitement de données ; traduit les données en cartes exploitables avec toutes les corrections des erreurs liées au capteur. Ce processus est synthétisé dans le graphique représenté dans la Figure 19.

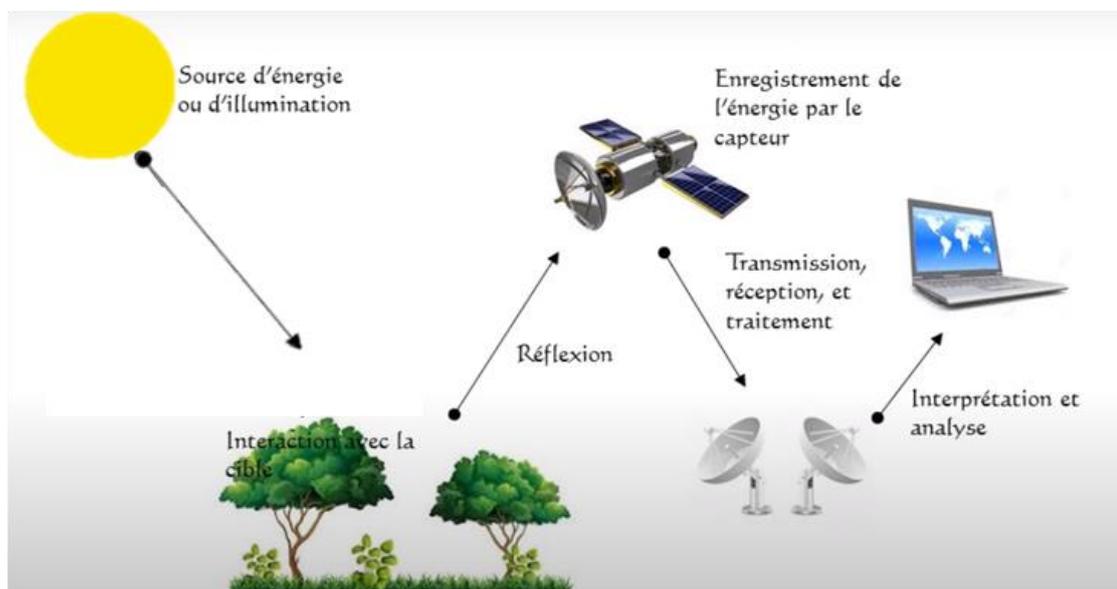


Figure 19: Graphique synthétisant le processus de télédétection.

Selon leur source lumineuse, les capteurs sont classés comme passifs ou actifs (Figure 20), produisant respectivement des images optiques et des images radar. Lorsque les ondes exploitées sont émises par le soleil, on parle de la télédétection passive. Quant à elle, la télédétection active exploite les ondes émises par un émetteur artificiel placé sur le satellite puis réfléchies par la surface de la Terre et enregistrées par un capteur placé sur ce même satellite. La télédétection active est nécessaire lorsque l'on veut acquérir des images de nuit, elle présente aussi l'avantage de traverser les contraintes de couvertures comme les nuages ils sont donc moins sensibles aux conditions météorologiques.

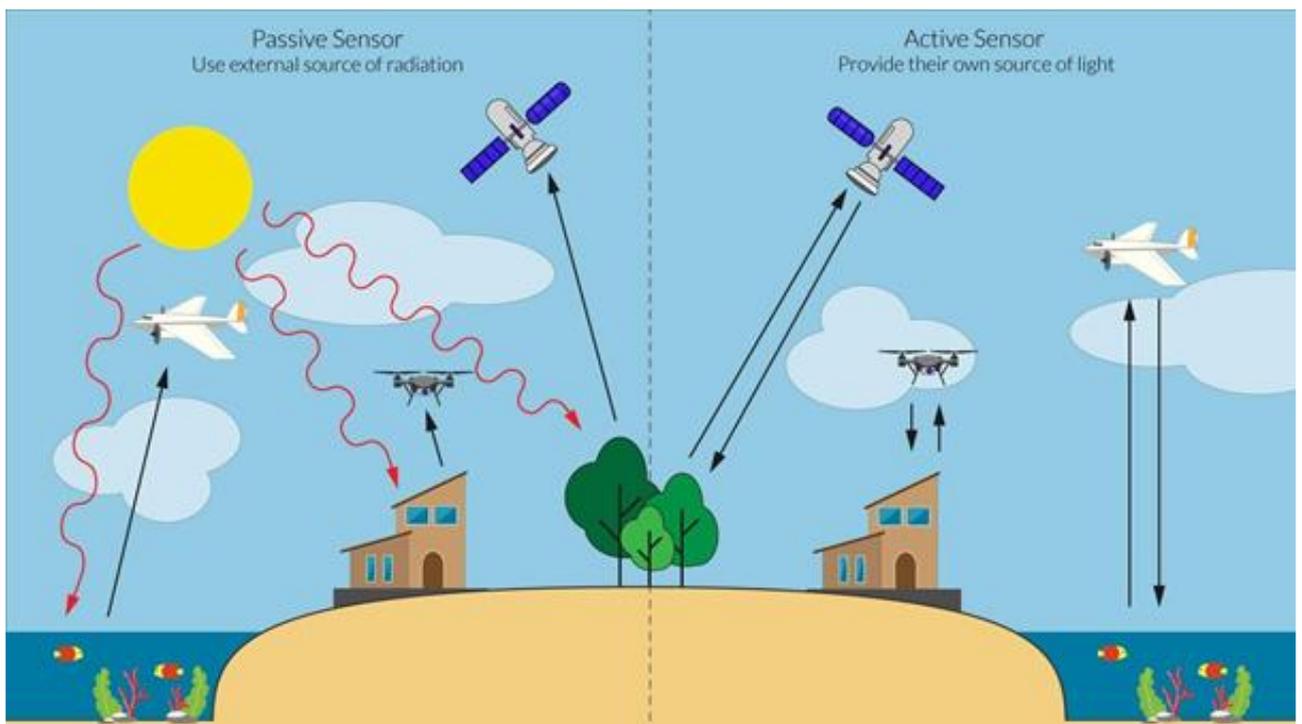


Figure 20: Différence entre la télédétection passive et active. Source : The Nature Conservancy.

L'image satellite, l'image satellitaire ou l'image spatiale désigne des images prises dans le domaine optique (lumière visible, infrarouge et ultraviolet) depuis l'espace à l'aide d'un appareillage embarqué sur un satellite. Ce sont des images numériques compilées à partir de données spectrales collectées par les capteurs servant à déterminer les propriétés d'objets naturels ou artificiels à partir du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par ceux-ci. Graphiquement, les images spatiales ressemblent beaucoup à des photos, mais elles

comportent beaucoup plus d'informations. La compréhension de ces informations nécessite en préalable la maîtrise des notions liées au rayonnement électromagnétique.

Le rayonnement électromagnétique désigne l'ensemble des radiations émises par une source, qui transportent de l'énergie et qui se déplacent à la vitesse de la lumière. Une onde électromagnétique est un ensemble de deux vecteurs orthogonaux indissociables, il s'agit du vecteur de champs électrique (E) perpendiculaire à la direction de la propagation du rayonnement, et le vecteur de champs magnétique (M) perpendiculaire au champ électrique (Figure 21). La lumière blanche est un rayonnement électromagnétique visible par l'homme, d'autres rayonnement sont invisibles à l'œil humain comme es ultraviolets, les infrarouge et les rayons.

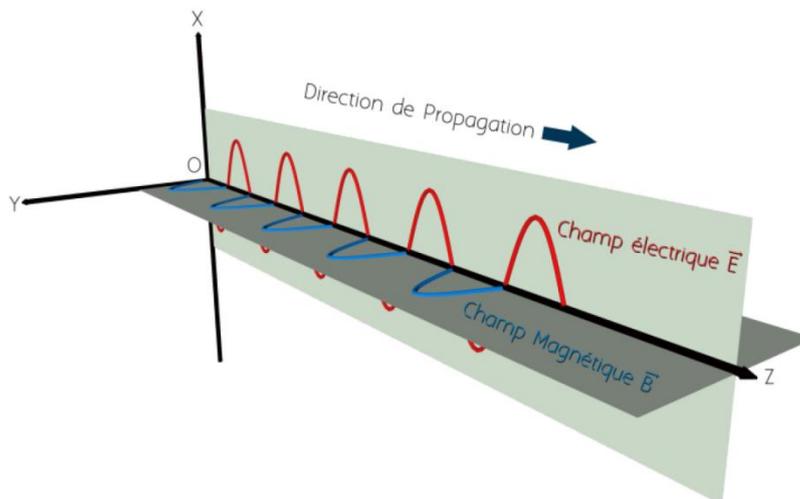


Figure 21: Les composantes d'une onde électromagnétique. Source : (Bersi, 2018).

Une onde électromagnétique se caractérise par deux grandeurs (Figure 22); (1) la longueur d'onde qui correspond à la distance entre deux crêtes successives, exprimée en mètre ou l'un de ses dérivés (nanomètre : 10^{-9} m. micromètres : 10^{-6} m. ou millimètre : 10^{-3} m centimètres) et identifiée par le symbole grec lambda (λ). C'est un courant alternatif composé oscillations ou cycles (changement du haut vers le bas puis vers le haut). (2) La fréquence ; est le nombre d'oscillations par unité de temps qu'on note ν (nombre oscillations/s ou Hertz Hz).

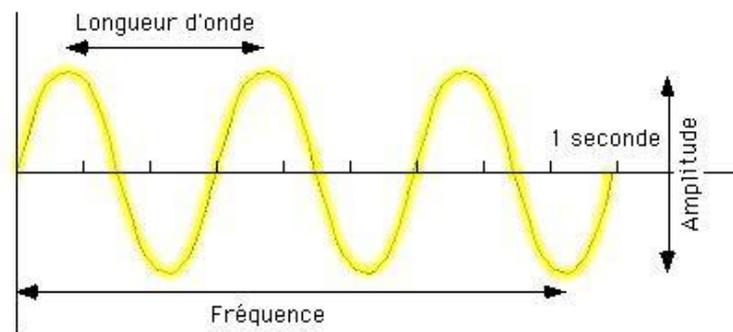


Figure 22: La longueur d'onde et la fréquence d'une onde électromagnétique. Source : Centre Canadien de Télédétection.

Le spectre électromagnétique représente le classement des rayonnements électromagnétiques par fréquence et longueur d'onde, se composant de sept domaines spectraux (Figure 23), allant des rayons gamma et des rayons X qui sont les plus petites longueurs d'onde, en passant par l'ultraviolet (UV) de 200 à 400 nm, la lumière visible de 400 à 700 nm, le proche infra-rouge (NIR : Near Infrared) de 700 à 800 nm, l'infra-rouge (IR) de 800 à 1200 nm, jusqu'aux plus grandes longueurs d'ondes qui sont les micro-ondes et ondes radio.

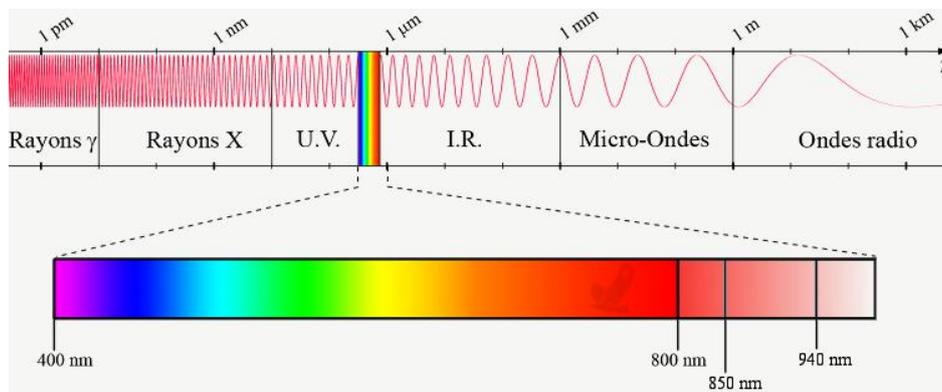


Figure 23 : les domaines du spectre électromagnétique. Source : ploufandplash |Permission:GFDL

Le spectre visible correspond à la lumière perçue par l'œil humain avec une longueur d'onde entre 400 et 700 nm. La couleur possédant la plus courte longueur d'onde est le violet, puis le bleu de 400 à 500 nm, le vert de 500 à 600 nm, alors que le rouge a la plus grande longueur d'onde 600 à 700 nm (Figure 24). La lumière blanche ou neutre est la composition de

la totalité du spectre visible. Un objet noir absorbe toutes les couleurs, et objet blanc/clair renvoie toutes les couleurs.

On constate que le domaine visible ne représente qu'une petite partie du spectre électromagnétique. Les rayonnements électromagnétiques invisibles à l'œil nu sont captés par la télédétection. Les domaines spectraux exploités en télédétection optique /passive sont les longueurs d'onde allant du visible à l'infrarouge. En télédétection radar/active le domaine spectrale exploité est le domaine des micro-ondes appelées aussi les hyperfréquences.

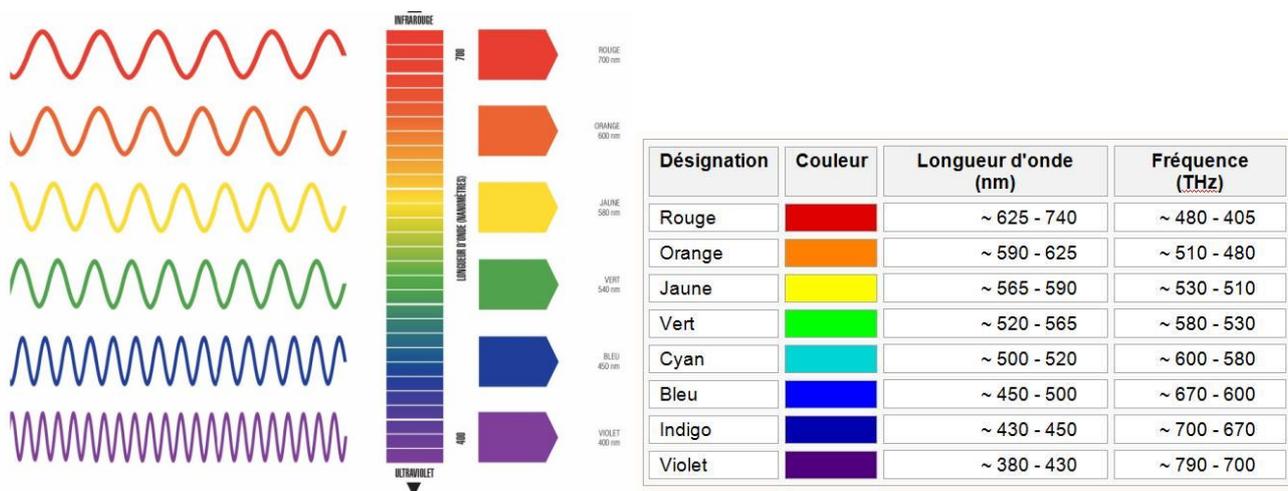


Figure 24 : Fréquences et longueurs d'ondes des couleurs. Source :Centre Canadien de Télédétection.

En télédétection, la grandeur utilisée pour décrire la teinte des pixels est la réflectance. La réflectance traduit le comportement de l'objet lorsqu'il reçoit le rayonnement solaire. Une partie est absorbée par l'objet, une partie est transmise aux surfaces sous-jacentes et une partie est réfléchi vers les capteurs (Figure 25). De ce fait, La réflectance varie selon la longueur d'onde qui est caractéristique de l'objet. Exemple ; si l'objet est jaune, il renvoie une longueur d'onde entre 565 et 590 nm, comme ça, nous pouvons interpréter que l'objet est jaune. C'est cette variation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde est appelée signature spectrale.

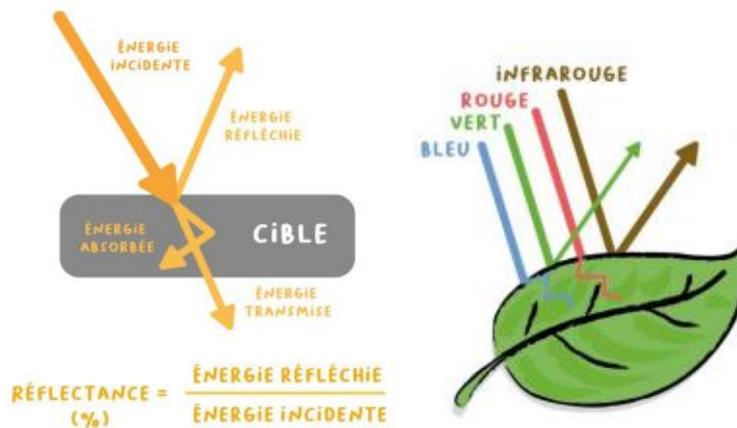


Figure 25 : la grandeur de réflectance.

La signature spectrale est la représentation graphique de la réflectance (Figure 26). On peut représenter les valeurs de réflectance des bandes selon un graphique, avec en abscisse les longueurs d'onde du spectre électromagnétique, et en ordonnée les valeurs de réflectance en %. Chaque objet à sa propre signature spectrale, sa manière unique de réfléchir la lumière selon sa taille, son orientation, sa texture, ses couleurs, sa composition chimique, sa nature et ses caractéristiques intrinsèques lorsqu'il interagit avec le rayonnement incident. C'est cette quantité d'énergie émise ou réfléchi, en fonction de sa longueur d'onde, qui permet l'identification de l'objet sur les images satellitaires et l'obtention des informations concernant sa nature, son état, sa température, sa composition chimique, sa hauteur ou sa teneur en humidité.

Prenons l'exemple des feuilles d'une plante en bonne santé, la végétation absorbe les longueurs d'onde du rouge et du bleu (pour les besoins physiologiques de la plante, puisque les végétaux convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique par le processus de photosynthèse), et réfléchit les longueurs d'ondes du vert, ainsi, nous voyons les feuilles de couleur verte. Au-delà du domaine du visible, la végétation réfléchit de manière très importante les longueurs d'ondes de l'infrarouge et du proche infrarouge (PIR). Autrement dit, les valeurs de réflectance de la végétation sont élevées dans la bande du PIR.

Les images satellites et aériennes s'appuient sur le principe de la traduction du rayonnement électromagnétique en image numérique qui est une suite de chiffres dont la valeur traduit l'intensité d'un phénomène (Figure 29). L'image satellite est décomposée en plusieurs bandes spectrales, chaque bande spectrale est une image panchromatique composée d'une grille de pixel, comportant chacun une valeur radiométrique traduisant la valeur de réflectance. Ces bandes spectrales nous permettent de tracer la signature spectrale de chaque objet. L'image satellitaire est le résultat de la superposition de différentes bandes spectrales appelées aussi canaux spectraux, celles-ci correspondent à des portions du spectre électromagnétique. Chaque bande est une image raster en niveaux de gris (en noir et blanc) dite panchromatique. Les images panchromatiques sont obtenues à partir de l'enregistrement

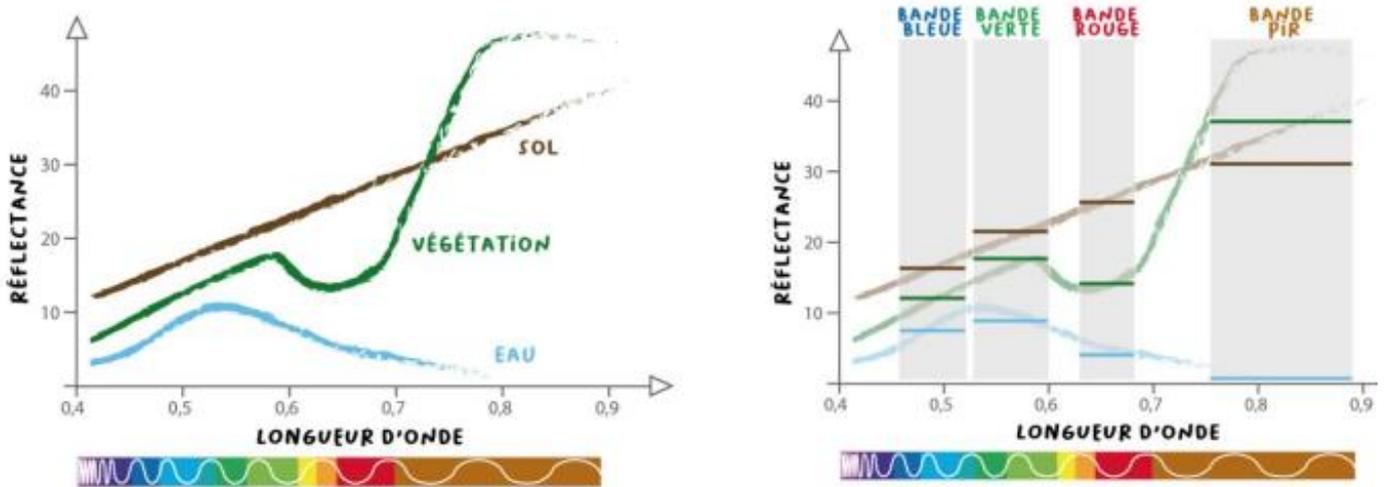


Figure 26 : Schématisation graphique représentant la signature spectrale de l'eau, la végétation et le sol nu.
Source : GeoBretagne.

du rayonnement dans un unique intervalle de longueur d'onde. Une image panchromatique est une grille composée de pixels, chaque pixel contient une valeur radiométrique entre 0-255 (qui représente la valeur de réflectance correspondante à une longueur d'onde donnée).

La qualité des images satellites dépend de la résolution spatiale et spectrale. La résolution spatiale est définie comme étant la taille du pixel. Plus la dimension des pixels est petite, plus la résolution est fine et mieux on perçoit les détails des objets. On classe ainsi les images satellites en images ; basse résolution supérieure à 1000m, moyenne résolution entre 1000 et 30m, haute résolution (HRS) entre 30 et 5m, et très haute résolution (THRS) inférieure

à 5m (Vintrou, 2012)(Figure 28 et).Les images aériennes ont une résolution spatiale plus fine (10cm- 1 m) que les images satellitaires (1 m-1 km) (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2011).



Figure 28 : image illustrant différents capteurs avec différentes résolution spatiales. Source : Radiant EarthFoundation

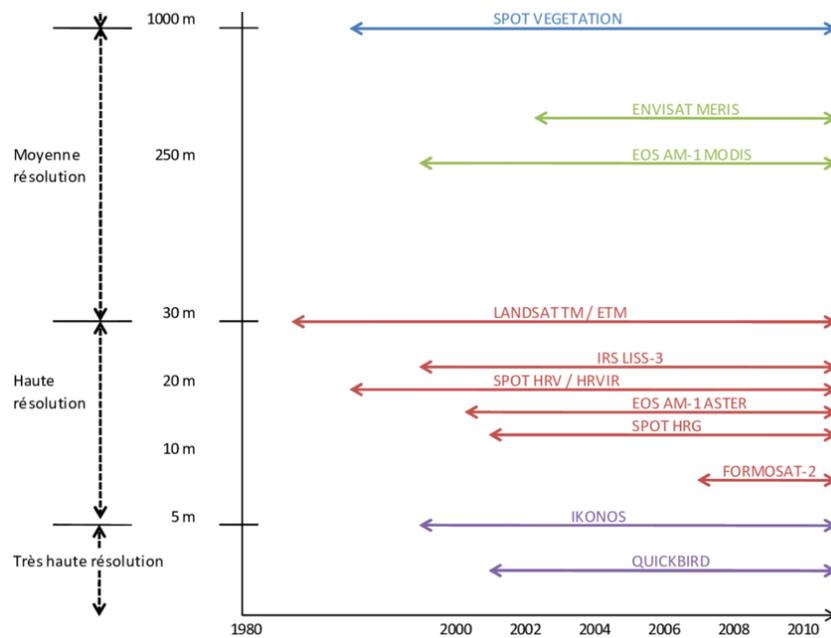


Figure 27 : Les 4 types de résolution spatiale avec des exemples de capteurs. Source : (Vintrou, 2012).

Une très haute résolution spectrale peut être favorisée au détriment de la résolution spatiale, on peut par exemple identifier les différentes espèces végétales grâce images hyper-spectrales. Les signatures spectrales sont mieux captées quand le capteur a plus de bande spectrales, on parle ainsi de la résolution spectrale (

Figure 30). La résolution spectrale correspond aux nombres et à la finesse des bandes spectrales que contient le capteur. Selon ses caractéristiques, le capteur produit des images multi-spectrales, contenant au minimum trois bandes; la bande du rouge, la bande du vert et la bande du bleu (RVB), ou des images hyper-spectrales contenant des dizaines voire des

centaines

de

bandes.

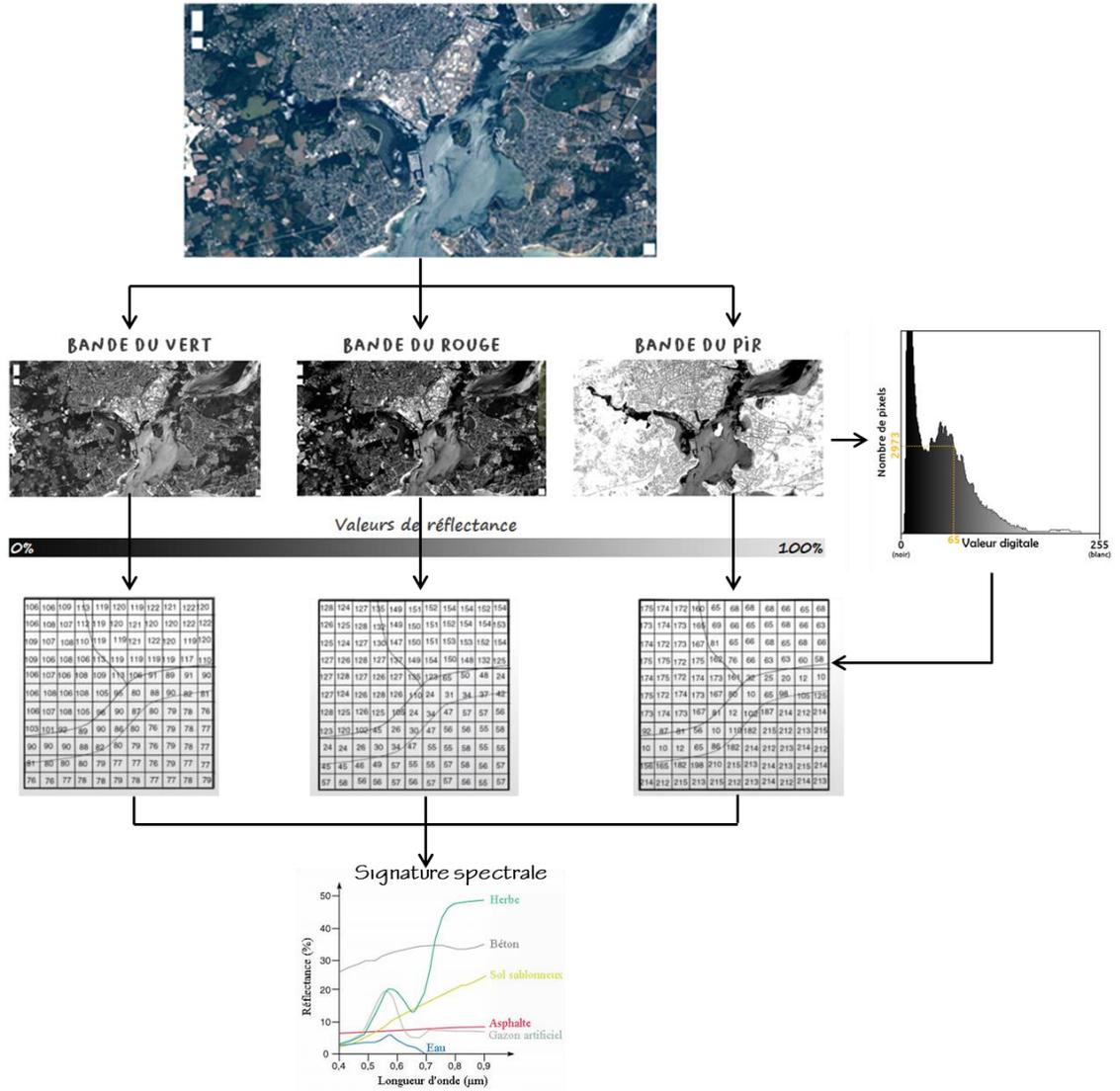


Figure 29 : les bandes spectrales de l'image satellitaire.

Plus le capteur possède des petites fenêtres de longueurs d'onde, plus les fenêtres des différents canaux sont étroites et donc plus il produit une haute résolution spectrales.

A l'inverse des images panchromatiques, les images multi-spectrales sont affichées en couleurs résultant de l'assemblage d'au moins trois bandes spectrales. Cet affichage en couleur s'obtient en additionnant les trois couleurs primaires que sont le bleu, le rouge et le vert. Ce principe d'addition des couleurs est la base de la notion de composition colorée.

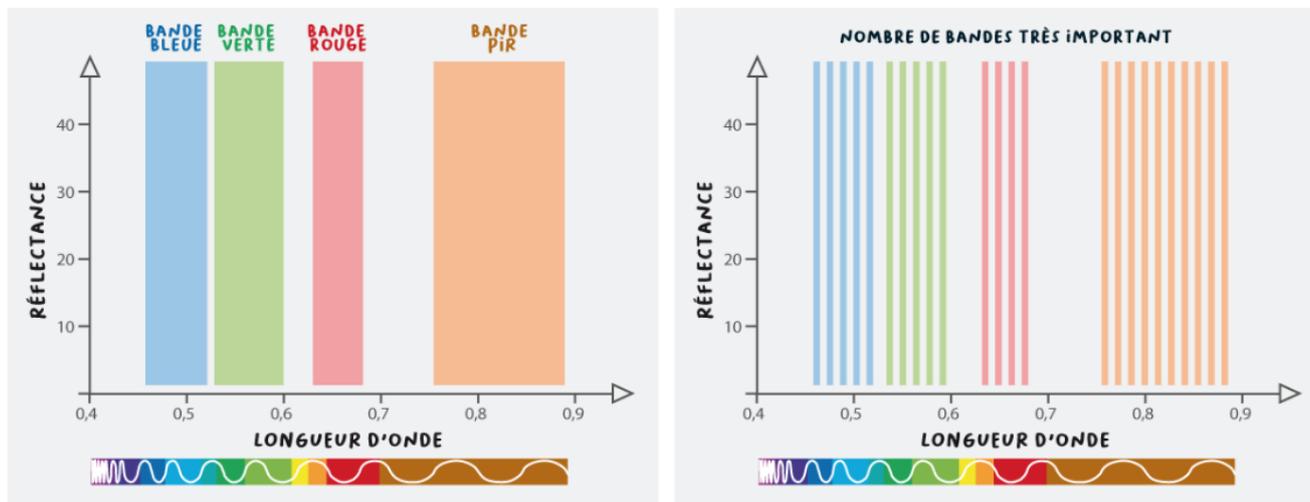


Figure 30 : le graphique gauche représente un capteur à 4 bandes couvrant. Sur le second graphique, plusieurs bandes sont enregistrées. Source : GeoBretagne.

Afin de faciliter l'interprétation des images satellites et de pouvoir visualiser et mettre en évidence l'information utile, il convient d'utiliser la combinaison/la composition colorée. Il en existe deux types. La composition colorée vraies couleurs consiste à affecter aux trois bandes spectrales (bleu, rouge, vert) leurs vraies couleurs (Figure 31). Quant à elle, La composition colorée fausse couleur affecte la bande infrarouge au rouge, la bande rouge au vert et la bande verte au bleu (Figure 32), cela permet de rendre visibles des informations non perçues par œil humain.

Deux autres types de résolution peuvent caractériser la capacité technique des capteurs satellitaires qui sont la résolution temporelle et la résolution radiométrique. La résolution temporelle désigne la fréquence à laquelle les images satellitaires sont enregistrées pour une zone donnée. Les satellites survolent les mêmes endroits à un intervalle de temps réguliers, généralement, les satellites mettent entre 1 et 16 jours pour repasser au-dessus de la même zone (Jensen, 2000). La résolution radiométrique est la capacité du capteur à détecter des

petites variations d'énergie électromagnétique. La résolution radiométrique est mesurée en bits et elle est plus fine lorsque le nombre de bits est élevé.

L'utilisation des données de télédétection se décline selon trois grandes approches: la photo-interprétation ; c'est la plus ancienne technique d'analyse d'images, elle se base sur l'interprétation visuelle par l'être humain, utile pour identifier les grandes catégories d'occupation du sol. La photogrammétrie est une technique qui permet de déterminer les

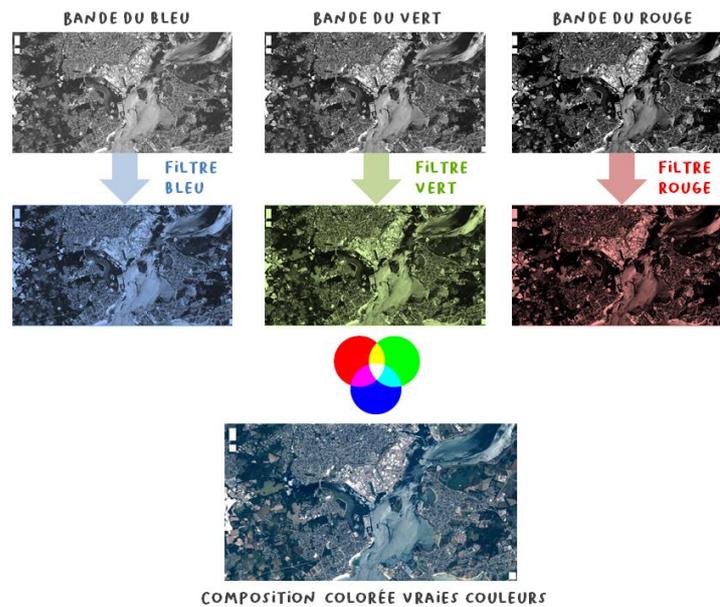


Figure 31 : Composition colorée vraies couleurs. Source : GeoBretagne.

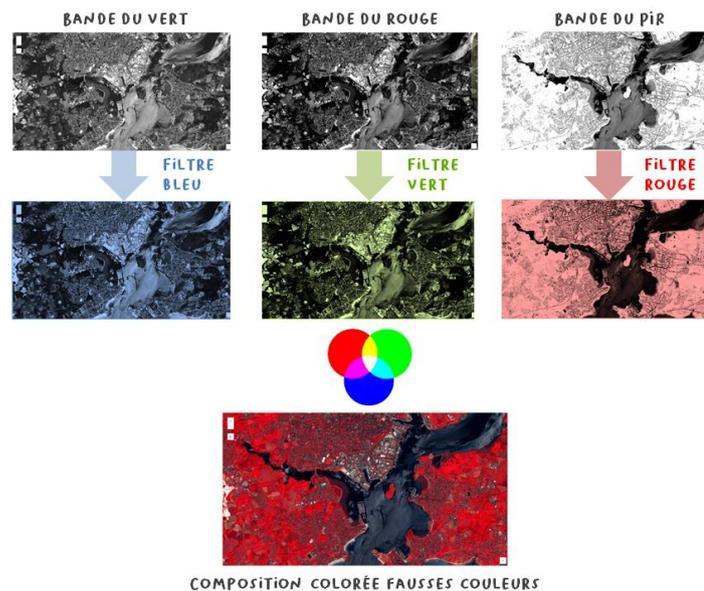


Figure 32 : Composition colorée fausses couleurs. Source : GeoBretagne.

dimensions, les volumes, les hauteurs, les distances et les angles des objets à partir des mesures effectuées sur des images aériennes se basant sur l'effet stéréoscopique obtenu à partir d'images acquises selon des points de vue différents d'une même scène et la classification numérique d'images.

4. La classification numérique d'image

La classification numérique d'image est le processus d'attribution des différents types d'occupation du sol (classes) à leurs pixels correspondants dans l'image en se basant sur l'information spectrale contenue dans les valeurs des différentes bandes spectrales (Figure 33). Elle implique l'utilisation d'un algorithme qui assigne des étiquettes à chacun des pixels composant l'image pour classer chaque pixel individuellement en leur attribuant une classe thématique particulière.

L'objectif de ce traitement numérique d'image est l'exploitation des données satellitaires pour produire des cartes thématiques. Le résultat de l'image classifiée est une mosaïque de pixels appartenant chacun à une classe thématique particulière.

On distingue deux types de classes : la classe d'information et la classe spectrale. La classe d'information est la catégorie d'intérêt ou le type d'occupation du sol que l'on cherche à identifier (bâti, agriculture, eau...). La classe spectrale est un groupe de pixels homogènes possédant des caractéristiques spectrales similaires. L'objectif de la classification est de lier les différentes classes spectrales à leurs classes d'informations correspondantes.

La classification se fait par un algorithme de classification qui trace des diagrammes en nuages de points/diagrammes de dispersion que l'on appelle "l'espace caractéristique" entre toutes les valeurs des pixels des bandes spectrales que comporte le capteur satellitaire ; une image satellitaire à 6 bandes spectrales va avoir donc 15 diagrammes en nuages de points. L'espace caractéristique est une représentation graphique de toutes les valeurs des pixels de 2 bandes spectrales, l'une représentée dans l'axe des X et l'autre dans l'axe des Y (Figure 35).

Les pixels appartenant à la même classe thématique et ayant des caractéristiques similaires se retrouvent proches les uns des autres dans l'espace caractéristique, quelle que soit la distance qui les sépare sur le terrain et dans l'image, ils formeront un groupe dans l'espace caractéristique, ce groupe sera affecté à une classe thématique.

Il existe trois techniques de classification d'image : la classification supervisée et la classification non supervisée basées sur l'approche « orientée-pixel », et une troisième technique basée sur l'approche « orientée-objet ».



Figure 33 : Classification d'une image spatiale (à gauche : l'image satellite, à droite : le résultat de classification). Source : (Kim & Yeom, 2012).

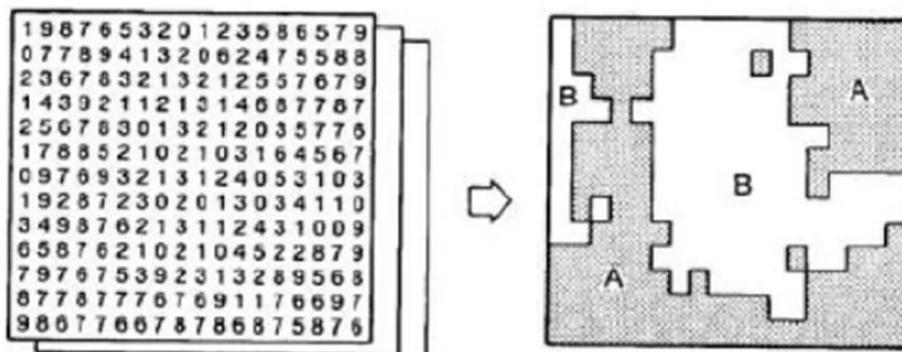


Figure 34 : A gauche : Image numérique comportant les valeurs de réflectance. A droite : image classifiée obtenue après le regroupement des pixels ayant des valeurs spectrales similaires.

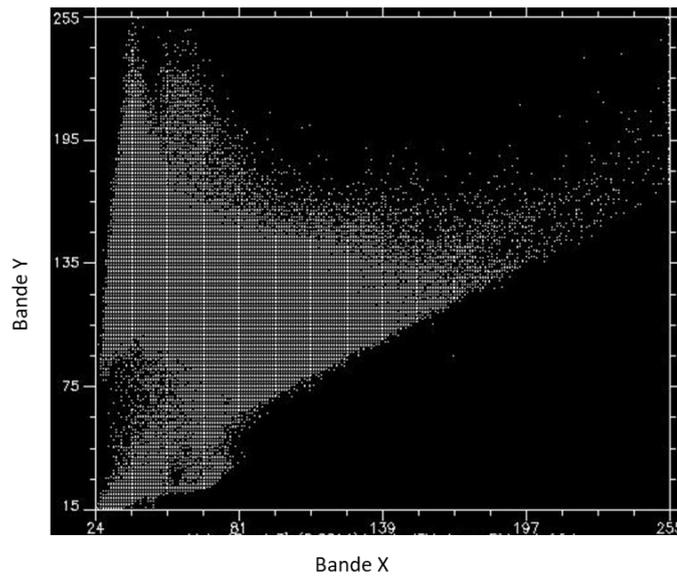


Figure 35: L'espace caractéristique représentant graphiquement toutes les valeurs des pixels de 2 bandes spectrales. Source : Anders Knudby.

La classification supervisée

Cette technique est appliquée lorsque les classes thématiques sont ciblées préalablement. En sélectionnant des échantillons représentatifs de chaque classe d'occupation du sol, on apprend à l'algorithme de classification à reconnaître ces classes. Les échantillons d'entraînement sélectionnés doivent être assez homogènes. Le logiciel utilise ces échantillons d'entraînement et génère leur propre fichier de signature spectrale, ensuite, il les applique au reste de l'image pour classifier chaque pixel de l'image (Figure 36). L'opérateur supervise donc la classification par une méthode de numérisation visuelle en se basant sur sa familiarité avec les régions géographiques. Les informations numériques de chacune des bandes et de chaque pixel sont exploitées pour que le logiciel détermine de façon automatisée les classes spectrales, ensuite les affecter aux classes d'information aux propriétés similaires en utilisant un algorithme qui détermine la signature spectrale.

Les algorithmes les plus utilisés pour la classification supervisée sont : le classificateur à distance minimale et le classificateur à maximum de vraisemblance.

Le classificateur à distance minimale calcule la distance euclidienne, dans l'espace caractéristique, entre chaque pixel et le centre de tous les pixels appartenant aux classes thématiques, puis attribue le pixel à la classe d'information ayant la plus courte distance euclidienne (Figure 37).

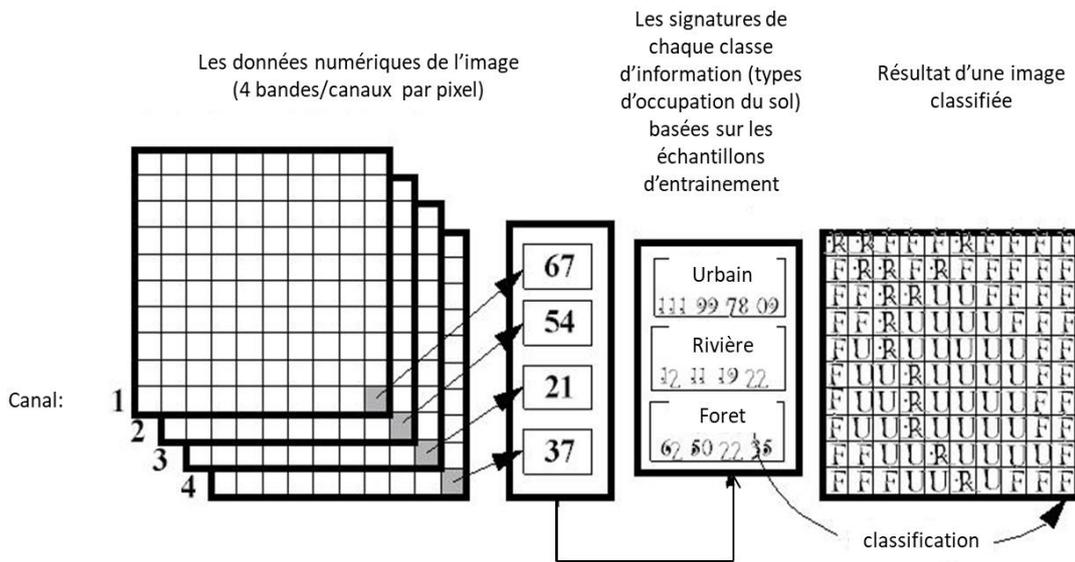


Figure 36 : Le processus de la classification numérique supervisée de l'image.

Le Classificateur à maximum de vrai semblance calcule la probabilité qu'un pixel donné appartienne à une classe spécifique. Cet algorithme suppose que la distribution des valeurs des pixels de chaque bande et de chaque classe suit la loi normale, appelée aussi la loi gaussienne⁵². Les valeurs des pixels des bandes sont représentées dans l'axe des X, par contre l'axe des Y représente le nombre de pixels de chaque classe ayant une valeur donnée dans

⁵² La loi normale, appelée aussi la loi gaussienne, est un graphe où les données forment une courbe en cloche (Wikipedia, 2013).

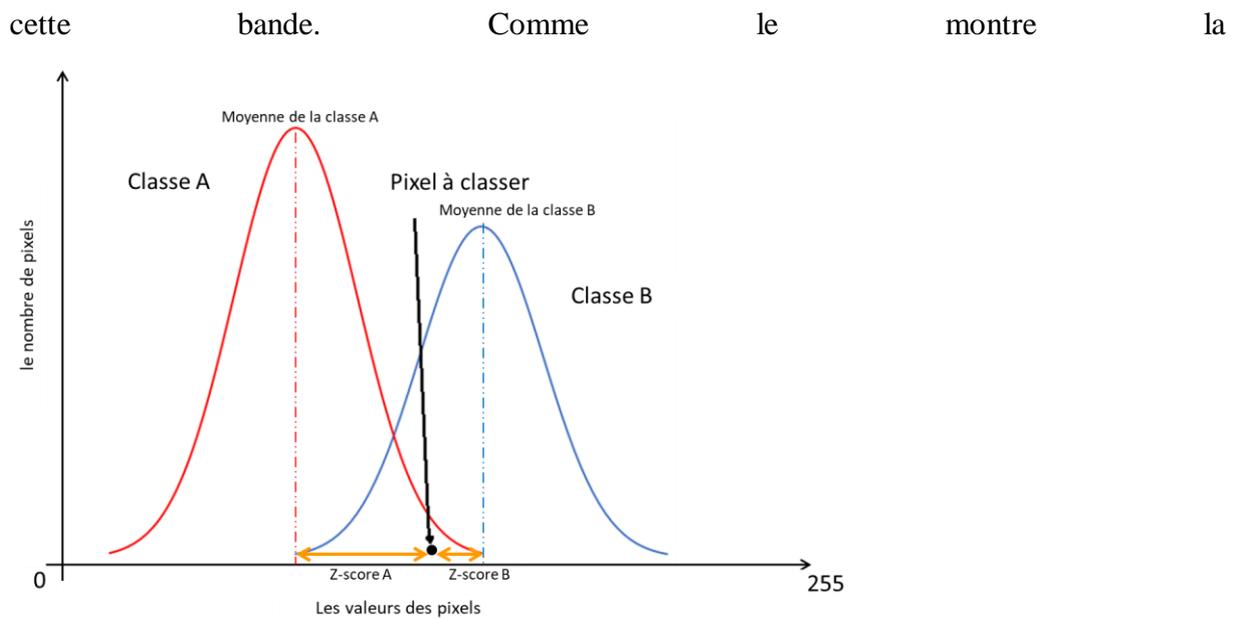
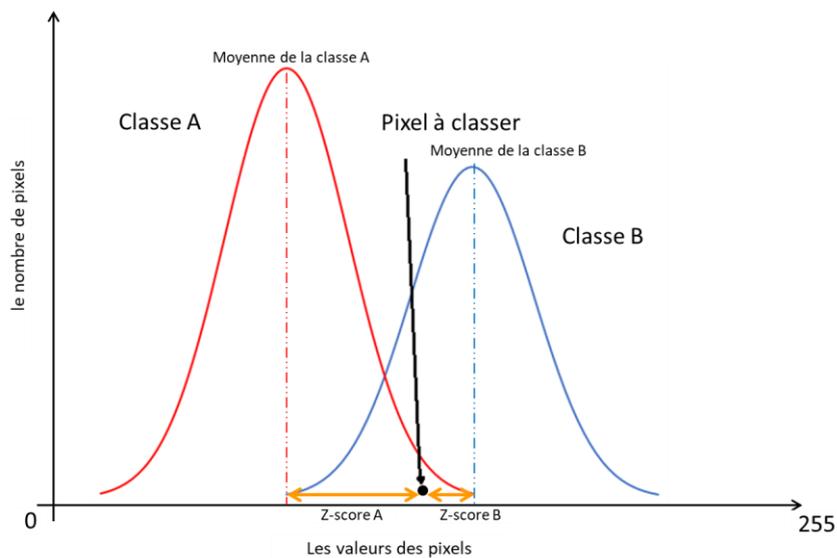


Figure 38, les pixels ayant les valeurs radiométriques les plus élevées appartiennent à la classe B. La classe A comporte des valeurs radiométriques faibles. Cependant les pixels se trouvant dans le chevauchement des deux classes nécessitent un calcul de probabilité pour affecter ces pixels à la bonne classe. Pour se faire, l'algorithme calcule d'abord la moyenne (M) et l'écart type (σ)⁵³ de chaque classe. Ensuite il calcule le Z-score qui représente le nombre d'écart types qui nous séparent de la moyenne. Dans la



⁵³ L'écart type représente la largeur de la courbe, il sert à mesurer la dispersion de l'ensemble des valeurs autour de la moyenne (Wikipedia, 2012a).

Figure 38) les deux courbes de classes ont la même largeur, donc le même écart types, mais puisque le pixel à classer se trouve à une distance plus courte de la moyenne de la classe B que de la classe A, il sera affecté à la classe B.

Passons maintenant à une représentation bidimensionnelle de deux bandes et trois classes. Dans ce cas les écarts types de la bande 1 (axe des X) et la bande 2 (axe des Y) sont représentés sous forme de contours d'équiprobabilité. Lorsque les contours de deux classes se chevauchent, le pixel sera affecté à la classe où le contour d'équiprobabilité dans lequel se trouve le pixel, est le plus proche du centre de la classe. Par exemple, le pixel en rouge sur la Figure 39 se trouve dans le deuxième contour d'équiprobabilité de la classe A alors qu'il est situé dans le troisième de la classe B, le classificateur de vraisemblance maximale affecte donc le pixel à la classe A en raison de sa plus grande probabilité d'appartenir à cette classe, tandis que l'algorithme de distance minimale qui est basé sur la distance euclidienne la plus courte classerait ce point dans la classe B. dans la littérature, plusieurs publications traitant la comparaison entre ces deux algorithmes de classification suggèrent que l'algorithme de vraisemblance maximale produit des résultats plus précis que l'algorithme de distance minimale (García-Dorado & Gallego, 2004; Schucany, Lindsey, & Gray, 1982; Woodward, Parr, Schucany, & Lindsey, 1984).

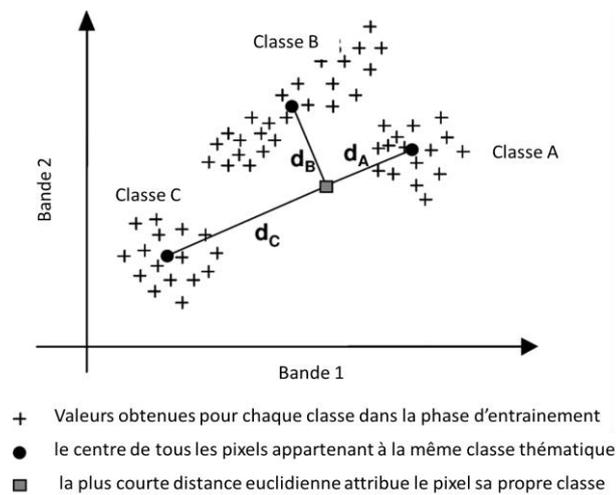


Figure 37 : Le principe du classificateur à distance minimale. Source : (Gonçalves, Fonte, Júlio, & Caetano, 2009).

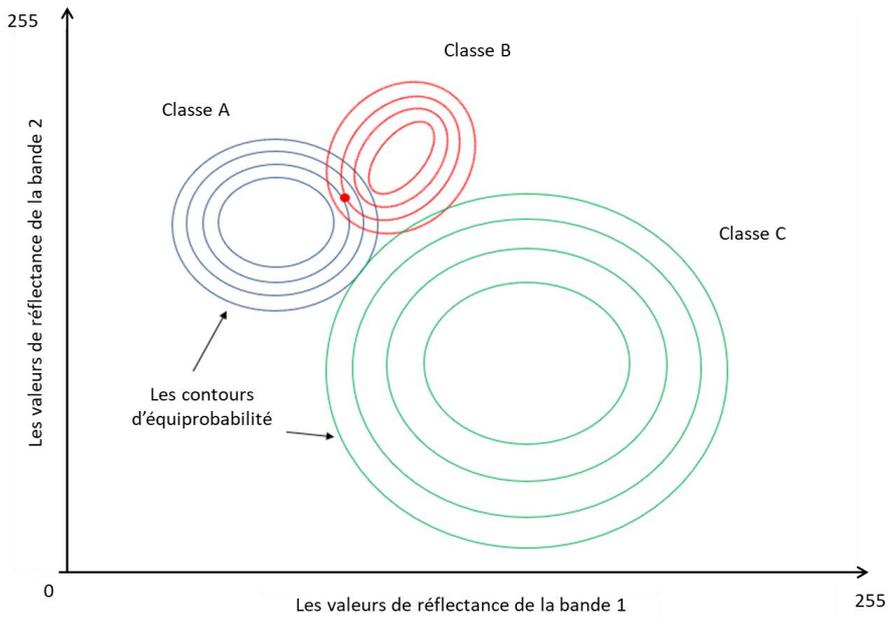


Figure 39 : Représentation bidimensionnelle de la classification par maximum de vraisemblance avec deux bandes et trois classes. Source : Anders Knudby.

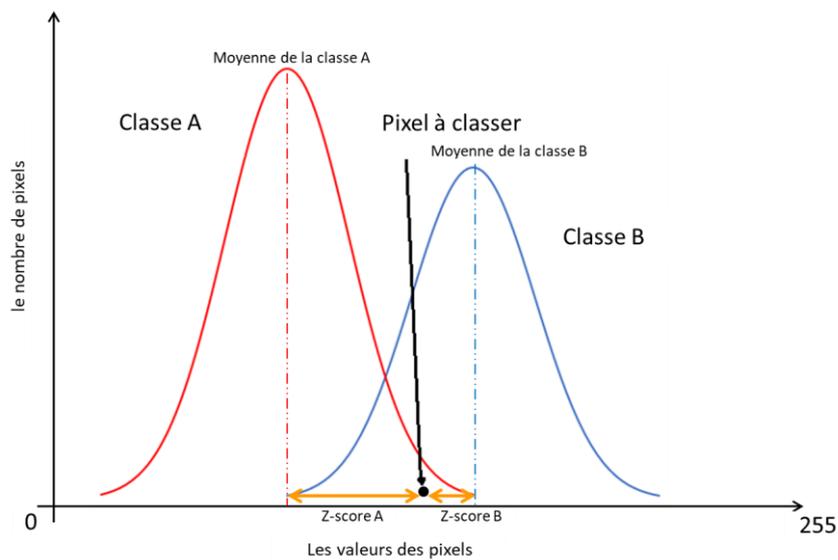


Figure 38 : Représentation simplifiée (unidimensionnelle) de la classification par maximum de vraisemblance avec deux classes

4.2 La classification non supervisée

Il s'agit d'une technique de classification automatisée par ordinateur. Dans la classification non supervisée, l'algorithme regroupe les pixels ayant des propriétés similaires (signatures spectrales similaires), les groupes de pixels créés sont ensuite analysés par l'opérateur qui procède à l'attribution de chaque classe spectrale à sa classe thématique appropriée. Cette technique est basique car nous n'avons pas besoin de créer des échantillons d'entraînement, il suffit de choisir le nombre de groupes de pixels que l'on souhaite générer.

Les deux algorithmes les plus utilisés dans la classification non supervisée sont l'algorithme de K-mean et l'algorithme ISODATA. Ces derniers suivent une procédure itérative similaire qui consiste d'abord à déterminer aléatoirement des centres initiaux des classes. Dans la deuxième étape, ces algorithmes assignent chaque pixel à la classe où le centre de classe se trouve le plus proche du pixel, ensuite des nouveaux centres de classes sont calculés sur la base de tous les pixels composant la classe.

La différence entre ces deux algorithmes réside dans le nombre de classes à produire. Dans l'algorithme K-mean, le nombre de classe est déterminé a priori par l'utilisateur alors que dans le classificateur ISODATA, le nombre de classes est déterminé par l'algorithme.

L'algorithme ISODATA présente une certaine affinité en fusionnant les classes qui ont des centres très proches ou qui ont un nombre de pixel inférieur à un certain seuil, ou en divisant les classes ayant un écart-type dépassant une valeur prédéfinie ou qui ont un nombre de pixels qui dépasse le double du nombre minimum des pixels.

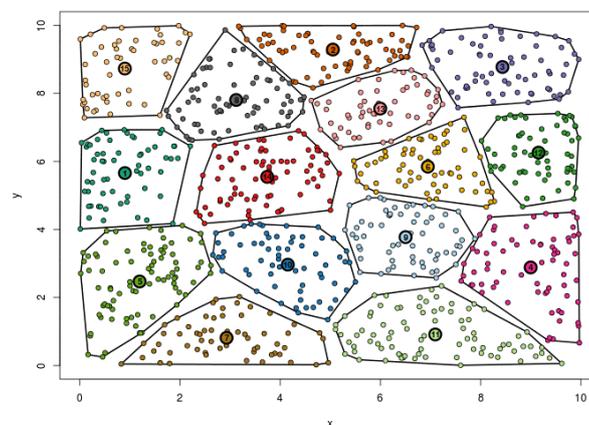


Figure 40 : dans la classification non supervisée, les groupes de pixels sont créés sur base de leur similarité.

4.3 La classification orientée-objet

Au fil du temps, les approches de classification numérique des images se sont développées pour s'adapter au développement de la résolution spatiale. La classification supervisée et la classification non supervisée sont des approches orientées-pixel, c'est-à-dire, basées sur le traitement des propriétés de chaque pixel composant l'image. L'avènement de l'image à très haute résolution a donné naissance à une nouvelle approche de classification appelée l'approche orientée-objet (Figure 41). En fait, une image à très haute résolution est une image très dense en terme de pixels, c'est-à-dire, c'est une mosaïque de tous petits pixels couvrant chacun une toute petite surface de la terre, ce qui donne un niveau très élevée de détails.

En revanche, une très haute résolution de l'image présente l'inconvénient de produire des signatures spectrales très hétérogènes pour une même cible. Par exemple, en zone urbaine, un pixel de 30m ne pose pas de problème d'identification de l'objet, par contre une résolution spatiale inférieure à 1m produit de différentes signatures spectrales pour un même édifice comme les parties ombragées ou éclairées. Dans ce cas, un traitement basé sur un groupe de pixels est beaucoup plus significatif qu'un traitement basé sur chaque pixel individuellement, il facilite ainsi l'interprétation de l'image.

De ce fait, l'analyse par pixel est devenue obsolète pour un traitement d'images à très haute résolution. Pour remédier à ce problème, l'approche orientée-objet a vu le jour. Cette approche se base sur la notion de segmentation, qui divise l'image en "segments" ou en ce qu'on appelle "objets". Les objets générés sont de géométries différentes. Ces segments sont des groupes de pixels homogènes de propriétés spectrales et spatiales similaires. La signature spectrale d'un segment est alors calculée à partir de la moyenne de l'ensemble des valeurs des pixels qui le constituent.

Cette approche repose sur deux étapes; la première est la division de l'image en segments contigus et homogènes, la deuxième est la classification de ces segments.

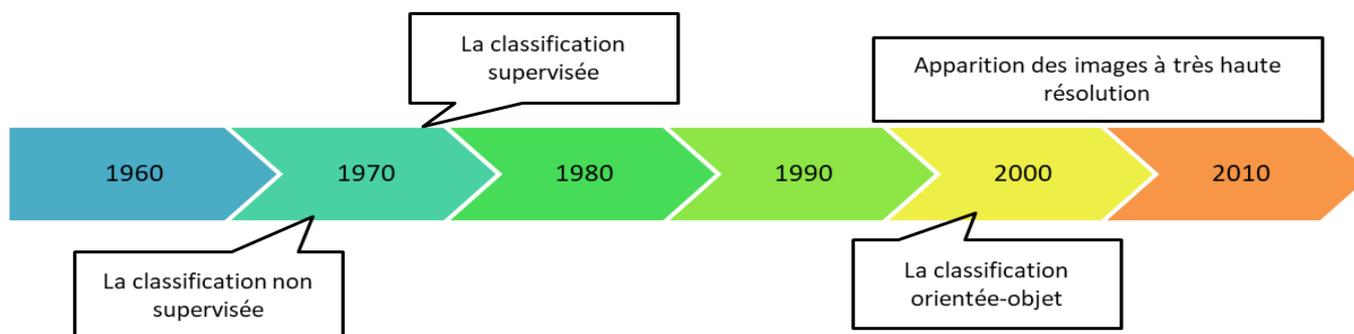


Figure 41 : Frise chronologique décrivant le développement des approches de classification des images.
Source :GISGeography.

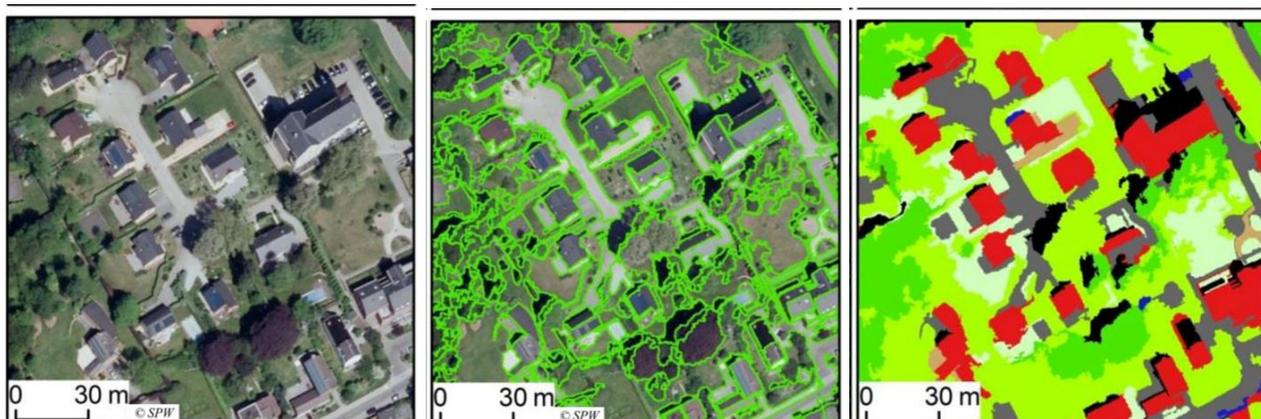


Figure 42: la première illustration représente une image satellitaire, la deuxième représente une image segmentée. La troisième illustration est une image classifiée. Source : (Grippa et al., 2016).

5. Analyse quantitative du paysage pour l'évaluation de la compacité urbaine

5.1 Les indices paysagers

Les indices paysagers (IP), appelés aussi les métriques spatiales, sont des expressions mathématiques développées pour quantifier multiples aspects des paysages. Les IP permettent une analyse quantitative du paysage pour décrire objectivement la composition et la configuration spatiale, à l'inverse d'une définition subjective de l'homme (Baskent & Jordan, 1995; Crowley, 1989; Turner, 2002). Ces derniers quantifient les attributs spatiaux des éléments composant le paysage et analysent leur disposition les uns par rapport aux autres au sein de celui-ci partir de données images. Les IP tiennent en compte les caractéristiques des patches ; leur taille, leur nombre, leur forme, leur densité et leur voisinage (Gustafson, 1998).

Il existe deux catégories d'IP : ceux quantifiant la configuration spatiale et ceux quantifiant la composition spatiales. En ce qui concerne la composition, les IP évaluent de quoi est composé le paysage ; c'est-à-dire la variété et la quantité des classes sans prendre en compte leur disposition les unes par rapport aux autres dans la mosaïque paysagère⁵⁴, ni leur arrangement spatiale. Les IP relatifs à la composition quantifient donc l'abondance, la richesse, la dominance et la diversité des classes. L'abondance se rapporte à la proportion de chaque classe occupant le paysage, la richesse se réfère au nombre de classes présents au sein de la mosaïque, la dominance indique la prépondérance des différentes classes et la diversité englobe les mesure de la richesse et de l'abondance (Olago, 1996).

D'autre part, la configuration spatiale se rapporte à la distribution physique, à l'arrangement, et le positionnement des classes au sein de la mosaïque paysagère évaluant ainsi le caractère spatiale (taille, forme, juxtaposition, cohésion, agrégation...) des différents patches composant les classes (Forman, Foreman, & Godron, 1986; Sharma et al., 2015; Uuemaa, Antrop, Roosaare, Marja, & Mander, 2009).

⁵⁴ La mosaïque paysagère est un patchwork de différents composants assemblés pour former un paysage global. La composition réelle d'une mosaïque et la façon dont ses composants sont distribués et sont uniques dans chaque paysage (Blandin, 2009).

On distingue trois niveaux d'analyse pour les IP. Le calcul de ces derniers peut se faire : (1) à l'échelle des patches; le patch est un groupe de pixels de même type de classe directement voisins (Urban, O'Neill, & Shugart, 1987). (2) à l'échelle de la classe, la classe est un type d'occupation du sol, c'est le regroupement de patches qui partagent une modalité commune d'occupation du sol comme les patches de forêt, d'agriculture ou d'urbain (Elif, Topaloglu, Sallib, & Yay Algan, 2018). 'Le type de patch' veut dire donc une classe. (3) à l'échelle du paysage; le paysage regroupe tout types de patches confondus, il correspond à la mosaïque paysagère dans son ensemble.

Le calcul des indices paysagers s'effectue sur des images en mode raster. Le mode raster est très utilisé dans le domaine de la télédétection, pour stocker les données géospatiales captées par un satellite et qui sont prises sur la surface terrestre. Un raster est une matrice de pixels, c'est une grille composée d'une suite de chiffres. Chaque pixel contient une valeur représentant des informations. Les photographies aériennes et les images satellitaires sont des images raster. Les données stockées sur les rasters représentent des phénomènes réels comme les données sur l'occupation du sol, la température et l'altitude. La classification d'une image satellite selon les catégories d'occupation du sol résulte une image raster en attribuant une valeur catégorielle⁵⁵ à chaque pixel à partir des valeurs multispectrales contenues dans les bandes spectrales composant les images géospatiales. Les images satellites combinent, sur plusieurs canaux, des mesures différentes de radiométrie qu'il faut combiner au moyen de compositions colorées. Le raster obtenu comporte un compte numérique et il est déterminé par une résolution spatiale (la taille du pixel).

L'autre mode des données géographiques pour visualiser et représenter la carte géospatiale d'une façon numérique est le mode vectoriel. Contrairement aux images rasters, les images vectorielles ne sont pas composées de pixels mais de formes géométriques qui traduisent le monde réel en dessinant les contours des objets. Il existe trois grands types de géométrie : les points, les lignes et les polygones.

⁵⁵ Une valeur catégorielle est une donnée associée à une catégorie spécifique, comme exemple une modalité d'occupation du sol (Wikipedia).

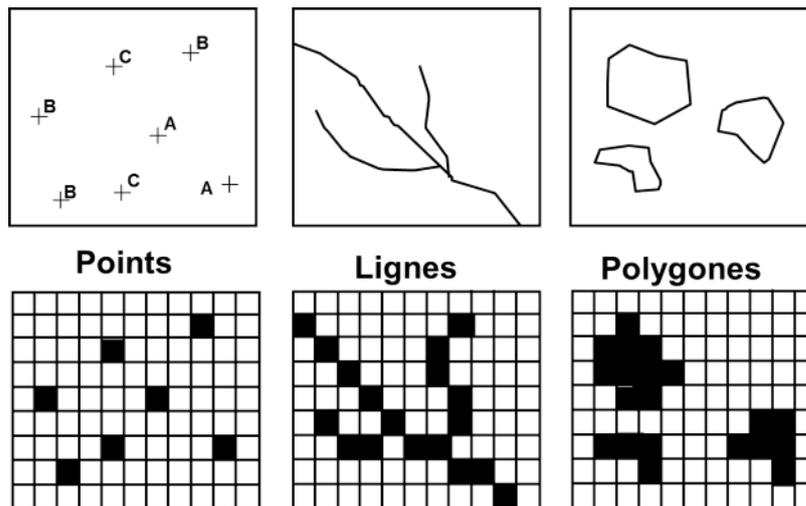


Figure 43 : Les deux modes des données géographiques : en haut les images en mode vecteur, en bas les images en mode raster (Selvam, Manisha, Vidhya, & Venkatramanan, 2019).

5.2 FRAGSTATS, un outil d'une analyse quantitative de la structure du paysage urbain

Le calcul des indices paysagers se fait sur le logiciel FRAGSTATS (Kevin McGarigal & Barbara J. Marks, 1995). FRAGSTATS est un outil informatique développé par des chercheurs à l'université de Massachusetts en 1995. Ce logiciel traite les données raster sous format ASCII⁵⁶ pour le calcul des indices paysagers. Sur FRAGSTATS, les indices paysagers sont regroupés selon les trois niveaux d'analyses; l'échelle des patchs, des classes et l'échelle du paysage. A l'intérieur de chaque groupe d'échelle d'analyse, les indices sont organisés en fonction de l'aspect de la structure du paysage qu'ils calculent. De ce fait, dans chaque groupe d'échelle d'analyse, on retrouve six groupes d'indices : (1) les indices basés sur le calcul des surfaces et des périmètres, (2) les indices analysant la forme, (3) les indices basés sur le calcul du noyau, (4) les indices traitant le contraste, (5) les indices qui examinent l'agrégation et en derniers (6) les indices analysants la diversité (Figure 44). Parmi ces indices, il y a ceux qui traitent la composition spatiale et ceux qui analysent la configuration spatiale.

⁵⁶ASCII : American Standard Code for Information Interchange (Code américain normalisé pour l'échange d'information) est un format des fichiers textes, c'est une norme informatique de codage de caractère (LAROUSSE).

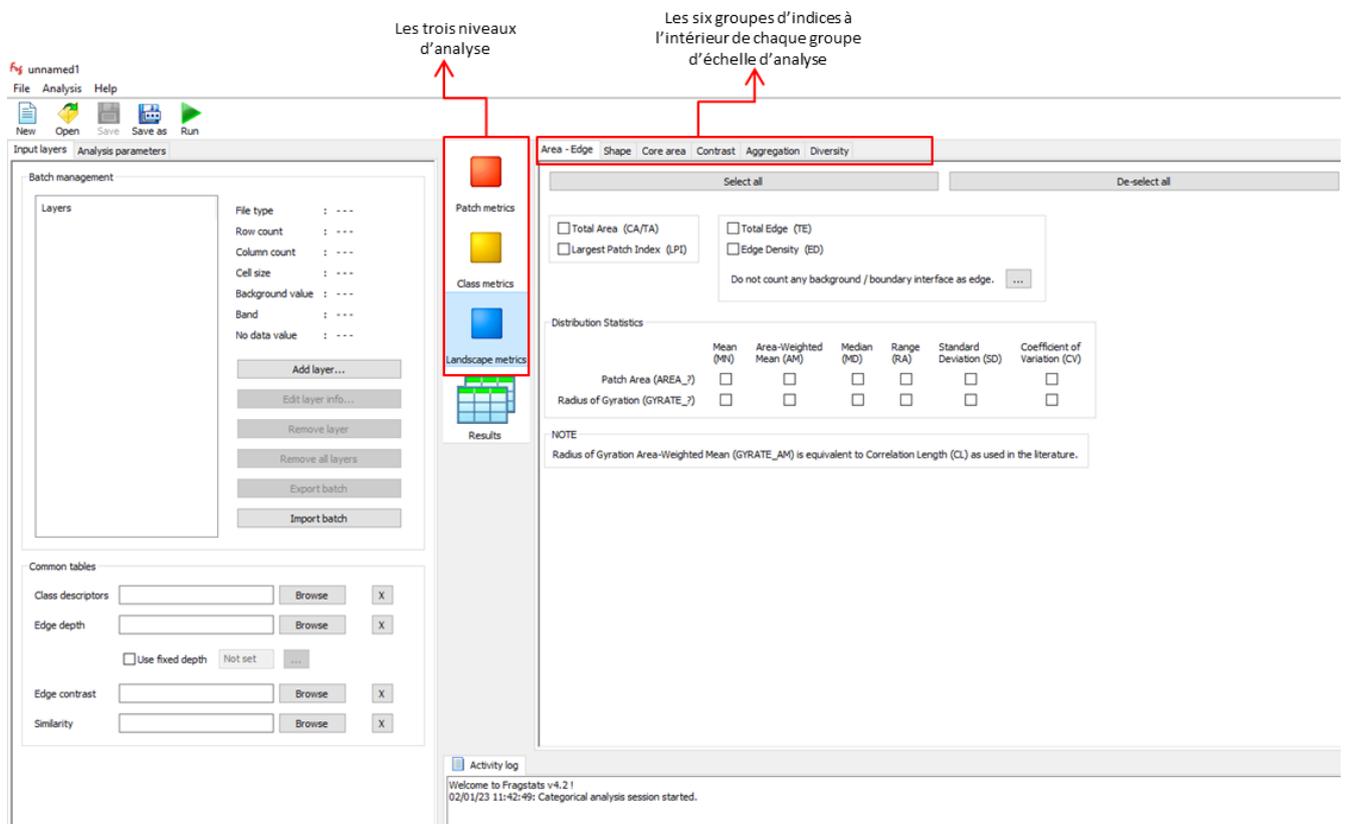


Figure 44 : L'interface d'utilisateur de l'outil FRAGSTATS et l'organisation des groupes d'indices en fonction des trois échelles d'analyse et l'aspect de la structure du paysage calculé.

5.3 Les indices paysagers utilisés pour le calcul de la compacité urbaine

5.3.1 L'inde de forme (SHAPE-SI)

L'indice de forme désigné par SHAPE ou SI (Shape Index) est l'un des indices qui analysent la configuration spatiale. Au fait, la complexité des formes est liée à la géométrie des patchs. Cet indice calcule la complexité de la géométrie des patchs qui peut être irrégulière ou simple et compacte. Plus la forme est simple, plus elle est compacte, inversement, plus elle est irrégulière, plus elle est moins compacte. Etant donné que le "carré" est la forme la plus régulière et compacte, l'indice SHAPE mesure la complexité des formes des patchs en les comparant à une forme standard carrée de même taille (Baskent & Jordan, 1995; Crowley, 1989; Gustafson, 1998; Gustafson & Parker, 1992; K. McGarigal & Barbara J. Marks, 1995). SHAPE est exprimé par le rapport périmètre/surface. Une forte valeur de SI indique que la forme du patch est complexe et irrégulière et donc pas compacte. Ainsi, SHAPE est égal au périmètre du patch (m) divisé par la racine carrée de la surface du patch (m²), ajustée par une constante pour s'adapter à une forme carrée selon la formule (1) (Pradhan, 2017). SHAPE égale à 1 lorsque le patch est carré et augmente sans limite à mesure que la forme du patch devient plus irrégulière.

$$\text{SHAPE} = \frac{0.25P_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \geq 1 \quad (1)$$

Où :

p = périmètre du patch (m)

a = surface du patch (m²)

5.3.2 Indice de forme du paysage (LSI)

L'indice de forme du paysage désigné par LSI (Landscape Shape Index) traite la complexité des formes urbaines. Cet indice caractérise la notion de fragmentation en calculant l'agrégation des éléments. Plus les patchs sont irréguliers et complexes, plus leurs périmètres augmentent et donc plus le paysage est fragmenté et moins compacte. LSI est alors égal à la longueur totale des périmètres (m) divisée par la surface totale du paysage (m²) ajustée par

une constante pour s'adapter à une forme compacte de même surface selon la formule(2)(Aguéjda & Hubert-Moy, 2016; Lambert, 2010; Long & Leveiller, 2016). Une forte valeur de LSI indique que le paysage est fragmenté. Plus la longueur des périmètres des patchs est élevée, plus le paysage est fragmenté, plus il est moins compacte. Inversement, plus LSI s'approche de 1, plus les patchs sont plus compactes et donc plus le paysage est agrégé.

$$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}} \geq 1 \quad (2)$$

Où :

E= longueur totale des périmètres d'un type de patchs dans une classe ou de tous les patchs dans un paysage (m).

A= surface totale du paysage (m²).

5.3.3 La densité de lisières (ED)

La densité de lisières, appelée aussi densité de bordures, désignée par ED (EdgeDensity) est un indice spatial qui nous une information sur la longueur des bordures des patchs par unité de surface. Plus les patchs ont des formes irrégulières et complexes, plus leur longueur de lisière augmente, plus le paysage est fragmenté et donc plus il est moins compacte. ED est exprimé par le rapport entre la longueur totale du périmètre des patchs urbains (m) divisée par la superficie totale du paysage (m²), multiplié par 10.000 pour convertir à l'hectare selon la formule (3) (Hargis, Bissonette, & David, 1998; Lisiak, Borowiak, Kanclerz, Adamska, & SzymbDczyk, 2018; Ma, Hietala, Kuussaari, & Helenius, 2013; Nerrière, 2008).

$$ED = \frac{E}{A} (10.000) \geq 0 \quad (3)$$

Où :

E= longueur totale des bordures des patchs en (m).

A= surface totale du paysage (m²).

5.3.4 L'indice du cercle circonscrit

L'indice du cercle circonscrit, désigné par CERCLE est un indice qui mesure l'élongation des patchs à l'intérieur d'une zone d'étude donnée. Une faible valeur de CERCLE indique un patch très étroit et donc une compacité élevée de celui-ci. Inversement, une très forte valeur de cet indice indique un patch allongé et donc une faible compacité de ce dernier. CERCLE égal à 1 moins le rapport entre la surface du patch et la surface plus petit cercle circonscrit selon la formule (4) (Herold, Scepan, & Clarke, 2002; Zhang & Li, 2013).

$$\text{CERCLE} = 1 - \left(\frac{a_{ij}}{a_{ijs}} \right), \quad 0 \leq \text{CERCLE} \leq 1(4)$$

Où :

a_{ij} = surface du patch ij (m²).

a_{ijs} = surface du plus petit cercle circonscrit autour du patch ij (m²).

5.3.5 Densité des patchs

Cet indice est désigné par PD (Patch Density). PD nous donne une information sur le nombre de patchs d'une classe donnée par unité de surface. PD égale au nombre des patchs d'une classe donnée divisé par la surface totale du paysage, multiplié par 10.000 et 100 pour convertir à l'hectare comme le montre l'équation (5) (Bian, Wang, Wang, Yu, & Qian, 2018; Lisiak et al., 2018).

$$PD = \frac{N_i}{A}(10,000)(100) \quad PD > 0(5)$$

Où :

n_i = nombre de patches d'une classe i.

A= surface totale du paysage (m²).

5.3.6 L'indice du plus grand patch

L'indice du plus grand patch désigné par LPI (Largest patch index), représente le degré de fragmentation du paysage urbain. En mesurant la taille des patches, cet indice nous donne une information sur la superficie qu'occupe le plus grand patch dans une zone d'étude donnée. Les zones compactes présentent généralement une forte densité de population et de construction, et donc une faible fragmentation. Une valeur élevée de LPI indique une faible fragmentation et donc une forte compacité urbaine. En revanche, plus la valeur de LPI est faible, plus les patches que composent le paysage urbain sont petits, plus la mosaïque urbaine est fragmentée et donc plus elle est moins compacte. Comme le montre la formule (6) LPI est égal à la superficie du plus grand patch du paysage (m²) divisée par la superficie totale du paysage (m²), multiplié par 100 (pour convertir en pourcentage)(Bian et al., 2018; Herzog et al., 2001; Y. Jia, Tang, Xu, & Yang, 2019).

$$LPI = \frac{\text{MAX}(a_{ij})}{A}(100), \quad 0 < LPI \leq 100\% \quad (6)$$

Où :

a_{ij} = la surface du patch ij (m²).

A = surface totale du paysage (m²).

5.3.7 Rayon de giration

Le rayon de giration est désigné par GYRATE. Cet indice mesure l'extension du patch. Il traduit la distance à laquelle un patch s'étend dans le paysage. Une valeur élevée de cet indice indique une faible compacité urbaine. GYRATE est égal à la distance moyenne (m) entre chaque pixel du patch et le centroïde du patch selon la formule (7)(Keitt, Urban, & Milne, 1997; Kupfer, 2012). GYRATE vaut 0 lorsque le patch est constitué d'un seul pixel et augmente sans limite lorsque le patch s'étend. Le GYRATE atteint sa valeur maximale lorsque le patch couvre l'ensemble du paysage.

$$\text{GYRATE} = \sum_{r=1}^z \frac{h_{ijr}}{z} \quad (7)$$

Où :

h_{ijr} = la distance entre chaque pixel ijr [situé à l'intérieur du patch] et le centroïde du patch $ij(m)$.

z = nombre de pixels à l'intérieur du patch ij .

5.3.8 L'indice d'agrégation

Comme son nom l'indique, cet indice caractérise la notion d'agrégation. Ce dernier est désigné par AI (Aggregation Index). Selon la formule (8), AI est égale au nombre d'arrêtes adjacentes, de jointures communes des pixels de classe i divisé par le nombre maximum possible d'arrêtes adjacentes des pixels de classe i (cad quand la classe i est agglomérée en un seul patch compacte), multiplié par 100(He, Dezonias, & Mladenoff, 2000; Shu, Bó, Jia, & Liu-qiang, 2011). Une valeur de AI qui s'approche de 0 indique qu'il y a très peu d'arrêtes adjacentes ; cad très peu de jointures communes entre les pixels de la classe i , ce qui indique une dispersion spatiale. AI vaut 100% quand tous les pixels de la classe i sont agrégés en un seul patch, cela indique l'agrégation et la compacité. Une très forte valeur de AI indique que les patches composant une classe i ont une grande taille et sont donc moins nombreux.

$$AI = \left(\frac{g_{ij}}{\max g_{ij}} \right) * (100), \quad 0 \leq AI \leq 100(8)$$

Où :

g_{ii} = nombre d'arrêtes adjacentes, de jointures communes des pixels de classe i.

$\max g_{ii}$ = le nombre maximum possible d'arrêtes adjacentes des pixels de classe i (cad quand la classe i est agglomérée en un seul patch compacte).

5.3.9 L'indice d'équitabilité de Simpson

L'indice d'équitabilité de Simpson désigné par SIEI (Simpson's Evenness Index) est un indice spatiale qui traite la composition de la mosaïque urbaine. Cet indice mesure la distribution et l'abondance des types de patches (classes) au sein du paysage urbain. Une distribution égale de la surface paysagère résulte une valeur maximale de SIEI, dans ce cas, les différentes classes ont une abondance similaire. SIEI varie entre 0 et 1; il vaut 0 lorsque le paysage est dominé par une seule classe et vaut 1 lorsqu'il y a une distribution équitable des différentes classes au sein du paysage. SIEI est égale à 1 moins la somme de l'abondance proportionnelle de chaque classes (types de patches) au carré, divisé par 1 moins 1 divisé par le nombre de classes selon la formule (9) (Lambert, 2010; Smith & Wilson, 1996).

$$SIEI = \frac{1 - \sum_{i=1}^m P_i^2}{1 - \left(\frac{1}{m}\right)} \quad (9)$$

Où :

P_i = Proportion du paysage occupée par le type de patches (classe) i

m = nombre de types de patches (classes) présents au sein du paysage.

5.3.10 L'indice de diversité de Shannon

Un autre indice qui analyse la composition spatiale est l'indice de diversité de Shannon désigné par SHDI (Shannon's Diversity Index). Plus sensible aux types de patchs rares, cet indice prend en compte le nombre de classes (la diversité) et l'abondance de chaque classe au sein de la mosaïque urbaine. En d'autres termes, cet indice mesure l'hétérogénéité en combinant la richesse et la régularité⁵⁷. Une forte valeur de SHDI indique une distribution équitable de la surface paysagère entre les classes (pour un nombre de classe constant) et/ou une diversité élevée c.à.d. le nombre de classe est lui-même élevé. Une faible valeur de SHDI indique une distribution inégale de la surface paysagère entre les classes (pour un nombre de classe constant) et/ou une faible diversité c.à.d. le nombre de classe et lui-même faible. SHDI est égal à la somme, pour tous les types de patchs, de l'abondance proportionnelle de chaque type de patchs multipliée par Ln de cette proportion selon la formule (10)(Ortiz-Burgos, 2016; Tente, Oloukoi, & Toko, 2019).

$$SHDI = -\sum_{i=1}^m (P_i * \ln P_i) \quad (10)$$

Où :

P_i = proportion du paysage occupé par les types de patchs (classe) i .

⁵⁷ La richesse fait référence au nombre de classes et la régularité fait référence à l'homogénéité des classes. Plus les proportions sont égales pour chacune des classes, plus le paysage est homogène et équitable (Roberts, 2019).

Indices paysagers	Désignation	Formule	Unité	Description	Intervalle
Indice de forme	SHAPE PE-SI	$\text{SHAPE} = \frac{0.25P_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}}$ <p>p = périmètre du patch (m) a= surface du patch (m²)</p>	/	-Une forte valeur de SI indique que la forme du patch est complexe et irrégulière et donc pas compacte.	$SI \geq 1$
Indice de forme du paysage	LSI	$\text{LSI} = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$ <p>E= longueur totale des périmètres d'un type de patches dans une classe ou de tous les patches dans un paysage (m) A= surface totale du paysage (m²)</p>	/	-Une forte valeur de LSI indique que le paysage est fragmenté. -Plus la longueur des périmètres des patches est élevée, plus le paysage est fragmenté, plus il est moins compacte. -Inversement, plus LSI s'approche de 1, plus les patches sont plus compactes et donc plus le paysage est agrégé.	$LSI \geq 1$
densité de lisières	ED	$\text{ED} = \frac{E}{A}(10.000)$ <p>E= longueur totale des bordures des patches (m). A= surface totale du paysage (m²).</p>	Mètres/ hectares	- Plus les patches ont des formes irrégulières et complexes, plus leur longueur de lisière augmente, plus le paysage est fragmenté et donc plus il est moins compact.	$ED \geq 0$
L'indice du cercle circonscrit	CER CLE	$\text{CERCLE} = 1 - \left(\frac{a_{ij}}{a_{ij}^s} \right)$ <p>a_{ij} = surface du patch ij (m²). a_{ij}^s = surface du plus petit cercle</p>	/	-Une faible valeur de CERCLE indique un patch très étroit et donc une compacité élevée de celui-ci. Inversement, une très forte valeur de cet indice indique un patch allongé et donc une faible compacité de ce dernier.	$0 \leq \text{CERCLE} \leq 1$

		circonscrit autour du patch ij (m ²).			
Densité des patches	PD	$PD = \frac{N_i}{A}(10,000)(100)$ <p>n_i = nombre de patches d'une classe i. A= surface totale du paysage (m²).</p>	N ombre par 100 hectares	- PD nous donne une information sur le nombre de patches d'une classe donnée par unité de surface.	PD > 0
L'indice du plus grand patch	LPI	$LPI = \frac{MAX(a_{ij})}{A}(100)$ <p>a_{ij} = la surface du patch ij (m²). A = surface totale du paysage (m²).</p>	%	<p>-Une valeur élevée de LPI indique une faible fragmentation et donc une forte compacité urbaine. En revanche, plus la valeur de LPI est faible, plus les patches que composent le paysage urbain sont petits, plus la mosaïque urbaine est fragmentée et donc plus elle est moins compacte.</p> <p>-LPI approche 0 lorsque le plus grand patch est petit. -LPI vaut 100 lorsque le paysage entier est constitué d'un seul patch.</p>	0 < LPI ≤ 100%
Rayon de giration	GYR ATE	$GYRATE = \sum_{r=1}^z \frac{h_{ijr}}{Z}$ <p>h_{ijr} = la distance entre chaque pixel ijr [situé à l'intérieur du patch] et le centroïde du patch ij (m). z = nombre de pixels à l'intérieur du patch ij.</p>	m ètre	<p>-Une valeur élevée de cet indice indique une faible compacité urbaine.</p> <p>-GYRATE=0 lorsque le patch est constitué d'un seul pixel et augmente sans limite lorsque le patch s'étend. Le GYRATE atteint sa valeur maximale lorsque le patch couvre l'ensemble du paysage.</p>	GYRATE ≥ 0

L'indice d'agrégation	AI	$AI = \left(\frac{g_{ij}}{\max g_{ij}} \right) * (100)$	%	<p>-Une valeur de AI qui s'approche de 0 indique qu'il y a très peu d'arrêtes adjacentes ; cad très peu de jointures communes entre les pixels de la classe i, ce qui indique une dispersion spatiale.</p> <p>- AI vaut 100% quand tous les pixels de la classe i sont agrégés en un seul patch, cela indique l'agrégation et la compacité.</p> <p>- Une très forte valeur de AI indique que les patches composant une classe i ont une grande taille et sont donc moins nombreux.</p>	$0 \leq AI \leq 100$
L'indice d'équitabilité de Simpson	SIEI	$SIEI = \frac{1 - \sum_{i=1}^m P_i^2}{1 - \left(\frac{1}{m}\right)}$ <p>P_i = Proportion du paysage occupée par le type de patches (classe) i</p> <p>m = nombre de types de patches (classes) présents au sein du paysage.</p>	/	<p>- SIEI varie entre 0 et 1; il vaut 0 lorsque le paysage est dominé par une seule classe et vaut 1 lorsqu'il y a une distribution équitable et homogène des différentes classes au sein du paysage.</p>	$0 \leq SIEI \leq 1$
L'indice de diversité de Shannon	SHDI	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i * \ln P_i)$ <p>P_i = proportion du paysage occupé par les types de patches (classe) i.</p>	/	<p>-une forte valeur de SHDI indique une distribution équitable de la surface paysagère entre les classes (pour un nombre de classe constant) et/ou une diversité élevée c.à.d. le nombre de classe est lui-même élevé.</p> <p>-une faible valeur de SHDI indique une distribution inégale de la surface paysagère entre les classes (pour un nombre de classe constant) et/ou une faible diversité c.à.d. le nombre de classe et lui-même faible.</p>	$SHDI \geq 0$

Tableau 9 : Description détaillée des indices paysagers utilisés dans l'analyse de la compacité urbaine de la ville d'Oran.

6. Application sur le cas d'étude (la ville d'Oran)

6.1 L'utilisation du portail de données USGS Earth Explorer

L'acquisition des données satellitaires de notre aire d'étude a été réalisée via le portail des données USGS EarthExplorer(USGS : United States GeologicalSurvey/ littéralement "Institut d'études géologiques des États-Unis"). USGS est une base de données de télédétection satellitaire établie par un organisme gouvernemental américain qui se consacre aux Terres, contenant une vaste collection de données géospatiales (des images satellites, des données radar, des graphiques linéaires numériques, des modèles numériques d'élévation, des données sur la couverture terrestre, des données cartographiques numériques...), permettant d'obtenir des données sur des périodes chronologiques en spécifiant un large éventail de critères de recherche et en choisissant parmi une longue liste, des images satellitaires à travers la navigation via une carte interactive ou la saisie des coordonnées spécifiques de l'aire d'étude.

USGS gère un ensemble de jeux de données de cinq domaines qui sont : la biologie, la géographie, la géologie, l'eau et les informations géospatiales. Il est possible d'accéder à chacun des départements à partir de la base de données USGS.

Nous avons sélectionné un intervalle de dates très récent couvrant la période du printemps 2021 pour une meilleure discrimination de la couverture végétale, avec une valeur de couverture de nuages très faible pour éviter les obstacles atmosphériques et l'apparition d'une couverture nuageuse sur l'image satellitaire de l'aire d'étude(Figure 45).

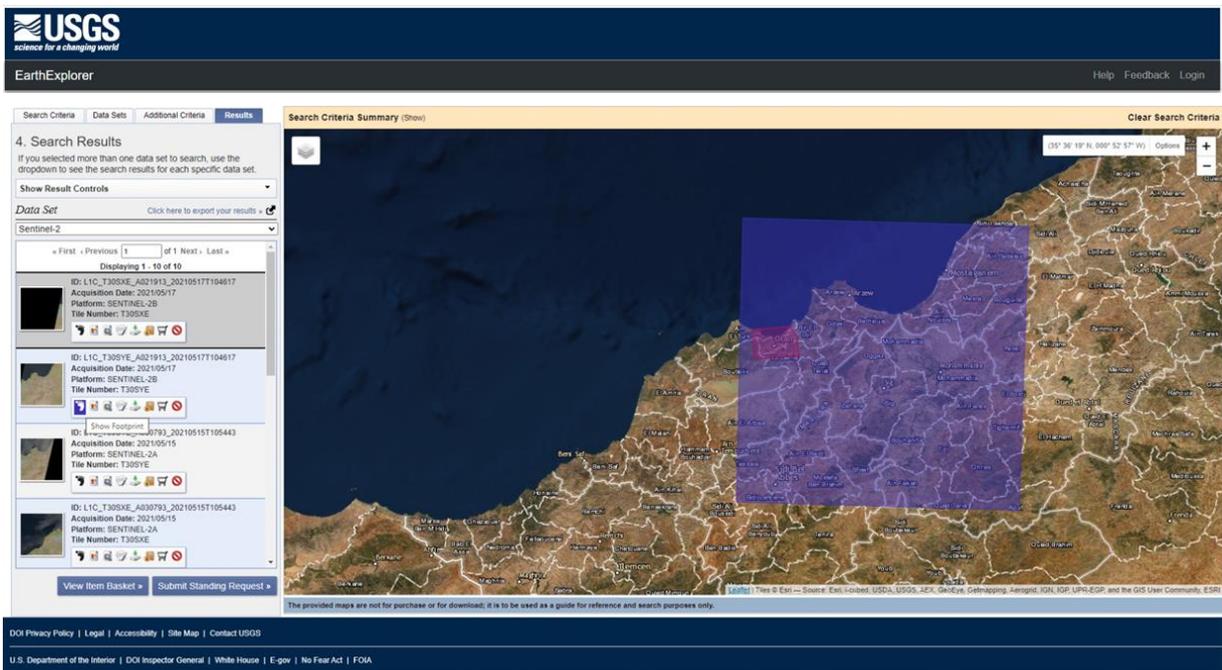


Figure 45: L'utilisation du portail de données géospatiales USGS Earth Explorer pour l'acquisition des données satellitaires de notre aire d'étude.

6.2 Le choix du satellite Sentinel-2

Sentinel-2 est une série de satellites d'observation de la terre, composée de deux satellites : Sentinel-2A lancé le 23 Juin 2015 et le Sentinel-2B lancé en 2017 qui fournit des données sur le monde entier. Le satellite Sentinel-2B est caractérisé par une production d'images satellites multi-spectrales à haute résolution entre 10m/20m/60m en fonction des 13 bandes spectrales (4 bandes visibles, 6 bandes infrarouges et 3 bandes à ondes courtes (SWIR)) allant du visible au moyen infra-rouge (Figure 46 et

N° de bande	Bandes spectrales Sentinel-2	Région	Longueur d'ondes (nm)	Résolution spatiale (m)
1	Bande 1	Aérosol	443	60
2	Bande 2	Bleu	490	10
3	Bande 3	Vert	560	10
4	Bande 4	Rouge	665	10
5	Bande 5	Bord rouge de végétation (VegetationRededge)	705	20
6	Bande 6	Bord rouge de végétation	740	20
7	Bande 7	Bord rouge de végétation	783	20
8	Bande 8	Proche infrarouge (NIR)	842	10
9	Bande 8a	Bord rouge de végétation	865	20
10	Bande 9	Vapeur d'eau	945	60
11	Bande 10	Infrarouge à ondes courtes (SWIR-cirrus)	1375	60
12	Bande 11	Infrarouge à ondes courtes (SWIR)	1610	20
13	Bande 12	Infrarouge à ondes courtes (SWIR)	2190	20

Tableau 10) avec une fauchée⁵⁸ de 290 Km qui est un large champ de vue et une revisite fréquente tous les cinq jours.

⁵⁸ La fauchée est la surface que couvre le satellite lorsqu'il est en orbite autour de la terre (Taconet, 2019).

Ces spécificités font de lui un outil puissant pour le contrôle de l'environnement, l'observation de l'occupation des sols ainsi que la gestion des catastrophes naturelles comme les glissements de terrain, les éruptions volcaniques, les inondations et les incendies.

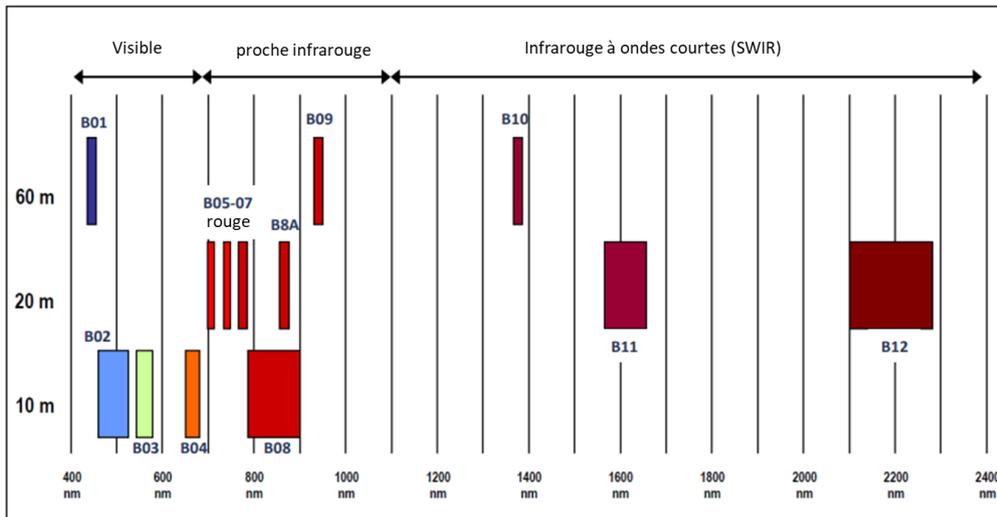


Figure 46 :Représentation des positions des bandes spectrales du satellite Sentinel-2 en fonction de leur longueur d'onde en nanomètre ainsi que de leur résolution spatiale en mètre (Gatti & Bertolini, 2018).

Après avoir sélectionné le satellite Sentinel-2B et l'intervalle de date ainsi que les critères de recherches, parmi les images disponibles, nous avons opté pour une image datant du 17 Mai 2021.

L'image Sentinel-2 acquise est traitée jusqu'au niveau 1C (Figure 48 et Figure 47), couvrant 9 tuiles⁵⁹ de 100*100km², Chaque tuile reçoit 13 bandes spectrales en format JPEG, représentant pour une résolution de 10 mètres, 120 Millions de pixels. Ce résultat est une ortho-image qui est une projection cartographique acquise en utilisant le système Modèles Numériques de Surface (MNS)⁶⁰ pour corriger les distorsions de l'objectif, la non verticalité de l'axe de prise de vue, la rotondité de la terre et le relief du sol naturel. Chaque pixel est ainsi localisé par des coordonnées géographiques. Les mesures radiométriques des pixels sont

⁵⁹ Les tuiles sont des fichiers image au format PNG représentant le globe terrestre(Gascon et al., 2014).

⁶⁰MNS : les modèles numériques de surface (MNS) sont des représentations simplifiées de l'altimétrie du sol qui reproduisent la forme de la surface terrestre en incluant tous les éléments permanents et visibles du paysage tels que le sol et les bâtiments("Modèle numérique de surface (MNS),").

fournies par La réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA :Top of Atmosphere)⁶¹.Les produits de niveau 1C sont rectifiés géométriquement. Le traitement de niveau 1C comprend : les corrections géométriques, le traitement radiométrique (conversion en réflectance) et la prévisualisation des images et la génération des masques pour les pixels défectueux et la couverture nuageuse(Figure 49).

N° de bande	Bandes spectrales Sentinel-2	Région	Longueur d'ondes (nm)	Résolution spatiale (m)
1	Bande 1	Aérosol	443	60
2	Bande 2	Bleu	490	10
3	Bande 3	Vert	560	10
4	Bande 4	Rouge	665	10
5	Bande 5	Bord rouge de végétation (VegetationRededge)	705	20
6	Bande 6	Bord rouge de végétation	740	20
7	Bande 7	Bord rouge de végétation	783	20
8	Bande 8	Proche infrarouge (NIR)	842	10
9	Bande 8a	Bord rouge de végétation	865	20
10	Bande 9	Vapeur d'eau	945	60
11	Bande 10	Infrarouge à ondes courtes (SWIR-cirrus)	1375	60
12	Bande 11	Infrarouge à ondes courtes (SWIR)	1610	20
13	Bande 12	Infrarouge à ondes courtes (SWIR)	2190	20

Tableau 10 : Caractéristiques des bandes spectrales de Sentinel-2 (Taconet, 2019).

⁶¹TOA : La réflectance au sommet de l'atmosphère est la réflectance mesurée par un capteur spatial volant au-dessus de l'atmosphère terrestre. Ces valeurs de réflectance comprennent les contributions des nuages et des aérosols et gaz atmosphériques(Beltrando, 2011).

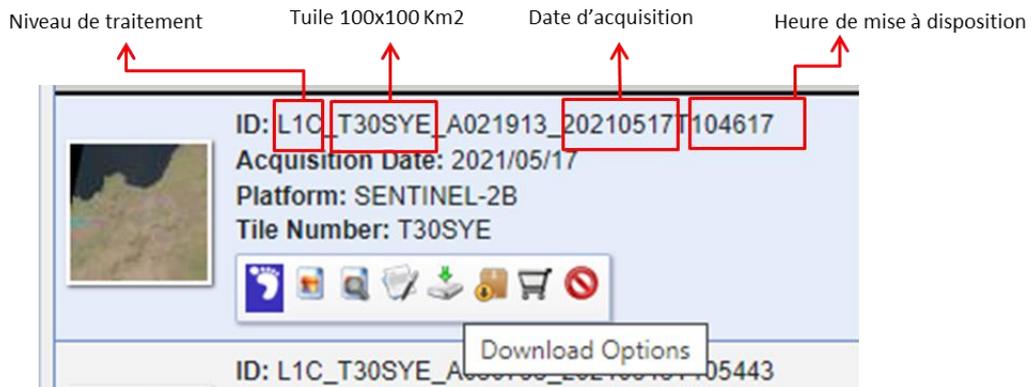


Figure 48 : La description du fichier des données Sentinel-2 acquises sur la région d'Oran via le portail des données USGS.

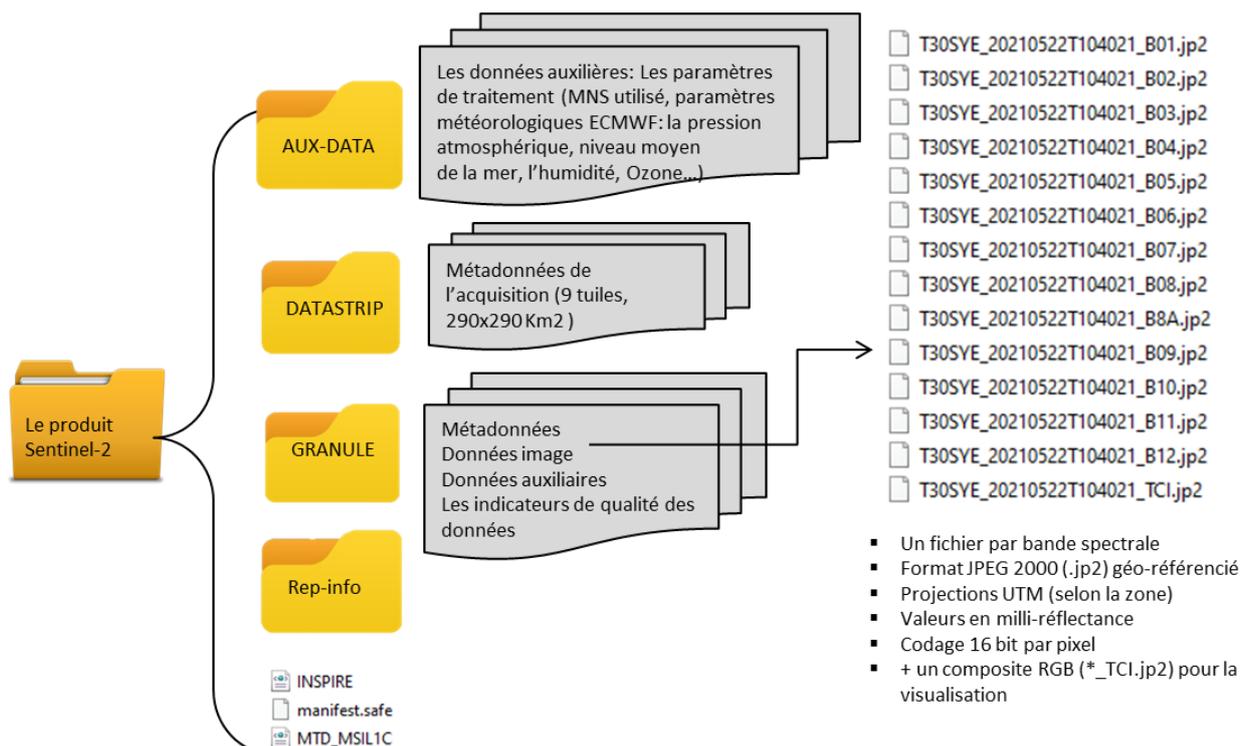


Figure 47 : Le fichier des données Sentinel-2 est composé de plusieurs dossiers, les images de chaque bande au format .jp2 se trouvent dans le dossier GRANULE>>IMG_DATA.

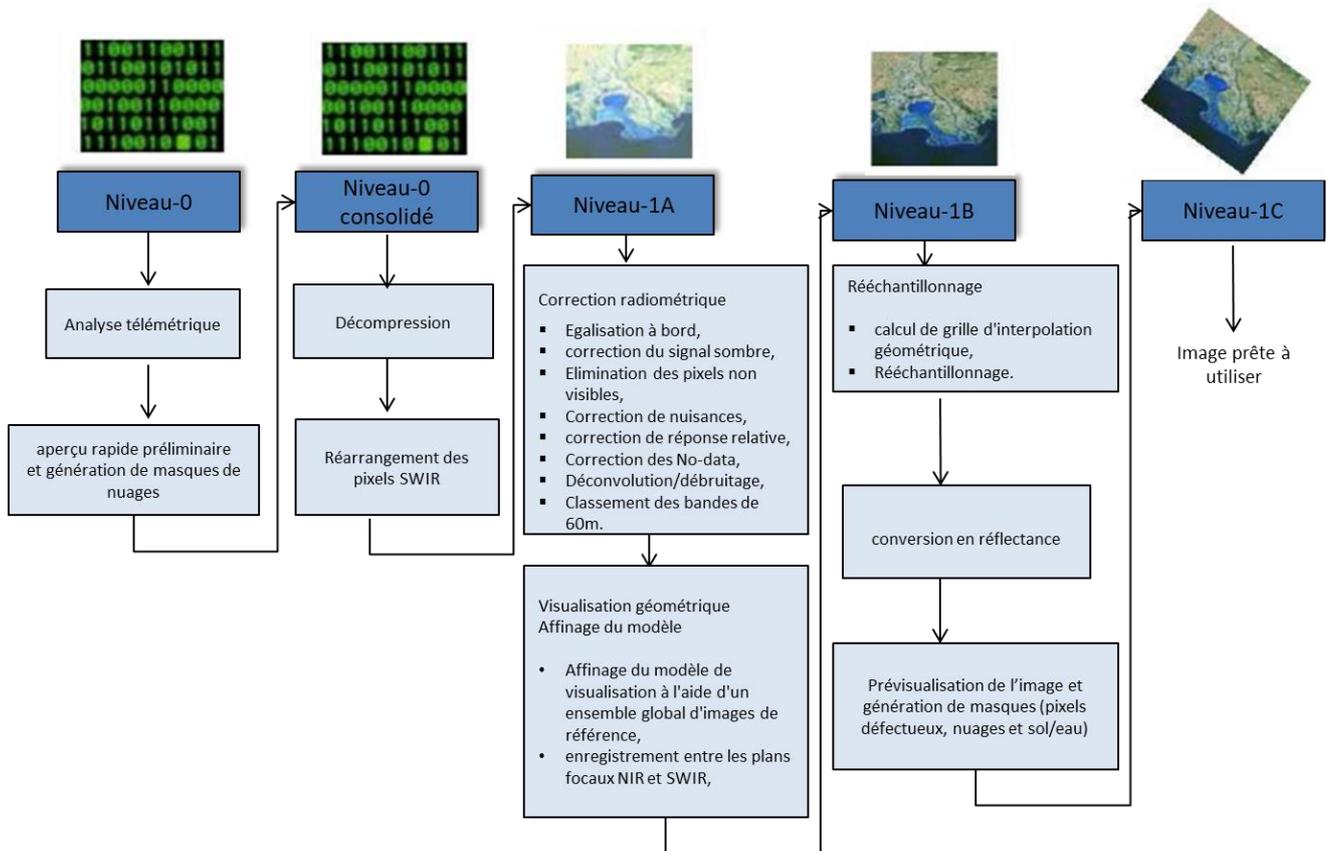


Figure 49 : La chaîne de production et les étapes du traitement systématique des images Sentinel-2 jusqu'au niveau 1C (Gascon et al., 2014).

Le choix de l'approche de la classification supervisée

Parmi les trois approches de classification des images satellites, nous avons opté pour l'approche de la classification supervisée. Une image à très haute résolution ne garantit pas forcément un bon résultat de classification si l'on n'utilise pas la bonne technique de classification. Chaque méthode a ses propres avantages et inconvénients. Il convient donc d'utiliser l'approche la plus adéquate à l'étude afin d'obtenir une précision maximale de l'image classifiée. Le choix de la technique de classification a reposé sur plusieurs critères : (1) la résolution spatiale de l'image satellitaire; étant donné que l'image satellite de la région d'Oran acquise depuis le satellite Sentinel-2 est une image à haute résolution (10m), l'approche orientée-objet, bien qu'elle est très avancée, n'est pas adéquate à notre étude, car cette technique, comme évoqué dans la partie théorique page-141, nécessite une image à très

haute résolution⁶². A notre échelle d'étude (ville d'Oran), une image à haute résolution est suffisante pour atteindre l'objectif de l'étude qui est la classification de l'occupation du sol. Les images à très haute résolution sont utilisées dans des études nécessitant un niveau élevé de détail comme l'identification des espèces végétales qui va au-delà du domaine du visible pour l'analyse de la structure de la feuille. Les images à très haute résolution sont payantes et leur prix dépend de la superficie de la zone d'étude, l'année d'acquisition et de la résolution de l'image, plus la résolution est petite plus l'image est chère.

(2) la connaissance à priori des classes d'information⁶³ ; le but de notre analyse est d'obtenir une image classifiée représentant la classe du bâti et la classe du non bâti. Puisque l'on connaît à priori les classes à reproduire, il convient d'utiliser la classification supervisée. La classification non supervisée est utilisée dans le cas où l'on ne connaît pas les classes à priori, dans ce cas, c'est à l'algorithme de regrouper les pixels ayant des propriétés similaires (signatures spectrales similaires) et de générer leurs classes.

(3) La précision du résultat de la classification ; bien que la classification supervisée nécessite plus de temps et d'efforts pour la sélection des échantillons d'entraînement et elle n'est pas automatisée par l'ordinateur comme la classification non supervisée, elle a été recommandée par de nombreux auteurs dans la littérature pour sa grande précision (Bharatkar & Patel, 2013; el Kharki, Mechbouh, Ducrot, Rouchdi, & Mvogo Ngonu, 2021; Ge, Bai, Wang, & Cao, 2012; Mr, Dr, & Dr. Iyyanki, 2015).

⁶² Une image à très haute résolution est une image possédant une résolution inférieure à 5 mètres (Puissant & Weber, 2003).

⁶³ Les classes d'information sont des catégories d'intérêt/les types d'occupation du sol que l'on cherche à identifier dans les images (Puissant & Weber, 2003).

6.3 L'ajout du plugin SCP à logiciel QGIS

Afin de pouvoir réaliser la classification supervisée sur QGIS (QGIS, 2022), il est nécessaire d'abord de procéder à l'installation du plugin⁶⁴ de la classification semi-automatique SCP (Semi-Automatic Classification Plugin) (Congedo, 2021). Ce plugin Python⁶⁵ ajoute des fonctionnalités de classification supervisée de l'occupation du sol des données satellitaires de télédétection et fournit des outils pour le pré-traitement et le post-traitement des images spatiales (Figure 50). Cet outil automatise les phases de la classification

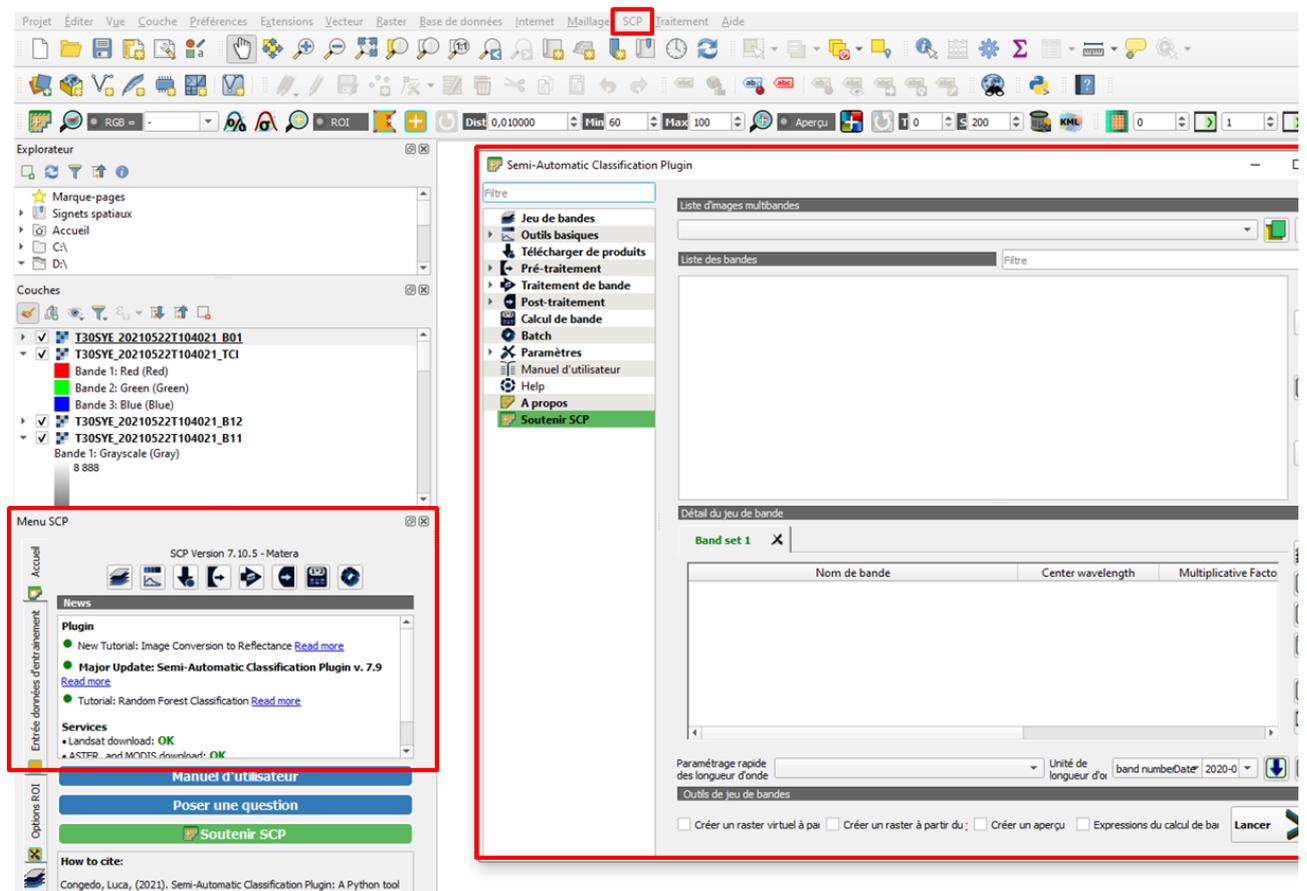


Figure 50 : L'interface utilisateur du plugin SCP pour QGIS.

⁶⁴Plugin : Un plugin, appelé aussi module d'extension, module externe, greffon, plugiciel, ainsi qu'add-in ou add-on. est un outil qui permet d'ajouter des fonctions supplémentaires à un logiciel principal. Un plugin ne peut pas fonctionner seul car il est entièrement dépendant de son logiciel hôte ("Dictionnaire du webmastering,").

⁶⁵Python est un langage de programmation utilisé pour automatiser certains enchaînements d'actions répétitives grâce à des bibliothèques spécialisées (Anabtawi, 2023).

allant de la phase de prétraitement pour la préparation des données à l'analyse et la conversion des valeurs de réflectances, puis la phase du traitement pour effectuer la classification de l'occupation du sol, jusqu'à la phase de post-traitement pour évaluer et rectifier l'exactitude du résultat de la classification.

6.4 Les étapes de classification des données satellitaires acquises sur la ville d'Oran en classe du bâti et en classe du non bâti

Les étapes de la classification des données satellitaires acquises sur la ville d'Oran se sont déroulées en trois phases :

6.4.1 La phase du prétraitement

Cette phase est elle-même divisée en plusieurs étapes. D'abord, nous avons utilisé les bandes spectrales illustrées dans le

N° de bande	Bandes spectrales Sentinel-2	Région	Longueur d'ondes (nm)	Résolution spatiale (m)
1	Bande 1	Aérosol	443	60
2	Bande 2	Bleu	490	10
3	Bande 3	Vert	560	10
4	Bande 4	Rouge	665	10
5	Bande 5	Bord rouge de végétation (VegetationRededge)	705	20
6	Bande 6	Bord rouge de végétation	740	20
7	Bande 7	Bord rouge de végétation	783	20
8	Bande 8	Proche infrarouge (NIR)	842	10
9	Bande 8a	Bord rouge de végétation	865	20
10	Bande 9	Vapeur d'eau	945	60
11	Bande 10	Infrarouge à ondes courtes (SWIR-cirrus)	1375	60
12	Bande 11	Infrarouge à ondes courtes (SWIR)	1610	20
13	Bande 12	Infrarouge à ondes courtes (SWIR)	2190	20

Tableau 10 contenues dans les données satellitaires du Sentinel-2 acquises sur la ville d'Oran via le portail des données géospatiales USGS en les important sur le logiciel QGIS.

Ensuite, afin de réduire le temps du traitement et d'alléger le calcul, nous avons procédé au découpage des rasters⁶⁶ du jeu de bandes spectrales selon la délimitation de notre aire d'étude. La troisième étape consiste à la conversion des valeurs des pixels en valeurs décimales de réflectance. Les informations nécessaires à la conversion sont contenues dans le fichier des métadonnées (MTD) comme le montre la Figure 47. Après un certain temps de calcul, les bandes converties sont chargées et affichées par des couches dont le nom débute par RT.

La quatrième étape a nécessité la détermination d'une composition colorée fausses couleurs (RVB) tel qu'expliquer dans la partie théorique page 132. Après plusieurs essais, nous avons déterminé une combinaison colorée composée de 8-2-4 ; c'est-à-dire, nous avons affecté la bande 8 (la bande du Proche infrarouge (NIR)) au canal rouge, la bande 2 (la bande du bleu) au canal vert et la bande 4 (la bande du rouge) au canal bleu. Ces trois bandes (8-2-4) ont une résolution de 10m. Cette combinaison nous a permis de ressortir le bâti en contraste par rapport aux autres éléments composant le paysage et qui sont le non bâti. A ce stade, une bande virtuelle est créée, ce qui permet l'affichage et la visualisation de la combinaison colorée.

Dans la cinquième étape, nous avons procédé à la création du fichier d'entraînement afin de collecter les échantillons et de calculer leur signature spectrales qui est l'élément clé de la classification. Pour se faire, nous avons créé deux macro-classes (bâti et non bâti). Ensuite, dans chaque macro-classe nous avons créé des classes. Chaque échantillon d'entraînement est identifié par un ID classe et il est assigné à une classe d'occupation du sol à travers la macro-classe. Les macro-classes sont donc composées de différentes signatures spectrales. Ces dernières contiennent différentes classes, chaque classe à sa propre signature spectrale.

⁶⁶ Un raster est une image matricielle composée de cellules organisées en lignes et en colonnes. Chaque cellule de cette grille est un pixel unique. Chaque pixel a des valeurs (valeurs pour définir sa couleur ou sa valeur de réflectance). C'est l'association de tous les pixels, chacun à une certaine place dans l'espace de la grille, qui crée une image ("Wikitionnaire,").

Pour un bon résultat de classification, nous avons séparé les signatures spectrales des différents éléments composant le paysage urbain en créant une classe pour chaque élément et en sélectionnant plusieurs échantillons d'entraînement pour chaque classe. De ce fait, nous avons créé plusieurs classes pour la macro-classe du bâti: classe des constructions en béton, classes des constructions métalliques et classes pour les toitures en tuile et pour la macro-classe du non bâti, nous avons créé les classes suivantes : la classe représentant l'eau pour la sebkha, une classe pour la mer, une classe pour l'agriculture, une classe pour les reliefs de terrain, une classe pour la végétation et les espaces verts, classe de la voirie et une classe pour les terrains libres et sans végétation.

Les échantillons d'entraînement ont été créés par deux méthodes ; soit en dessinant manuellement des polygones, soit en procédant à une méthode automatique à l'aide d'un algorithme de croissance de région⁶⁷; c'est-à-dire, en sélectionnant un pixel particulier, l'algorithme se charge à sélectionner les pixels voisins similaires.

6.4.2 La phase du traitement

Dans cette phase, il convient de sélectionner un algorithme classificateur. Cet algorithme utilise les signatures spectrales de chaque classe calculées dans la phase précédente de prétraitement pour classer chaque pixel de l'image raster. Parmi les deux algorithmes de la classification supervisée, nous avons opté pour la classificateur à maximum de vraisemblance car, comme expliqué dans la page135, cet algorithme a tendance de produire des résultats plus précis.

Les différents éléments composant le paysage urbain peuvent avoir des signatures spectrales similaires. Dans ce cas, les pixels risquent d'être mal classés car l'algorithme est incapable de discriminer correctement ces signatures. Comme le montre la (Figure 52), nous avons donc procédé d'abord à l'évaluation de

⁶⁷Un algorithme de croissance de région est une technique séquentielle de segmentation d'images basée sur les régions. Elle consiste à assembler les pixels en régions plus grandes en fonction de pixels de départ, de critères de croissance et de conditions d'arrêt prédéfinis(WiKipedia).

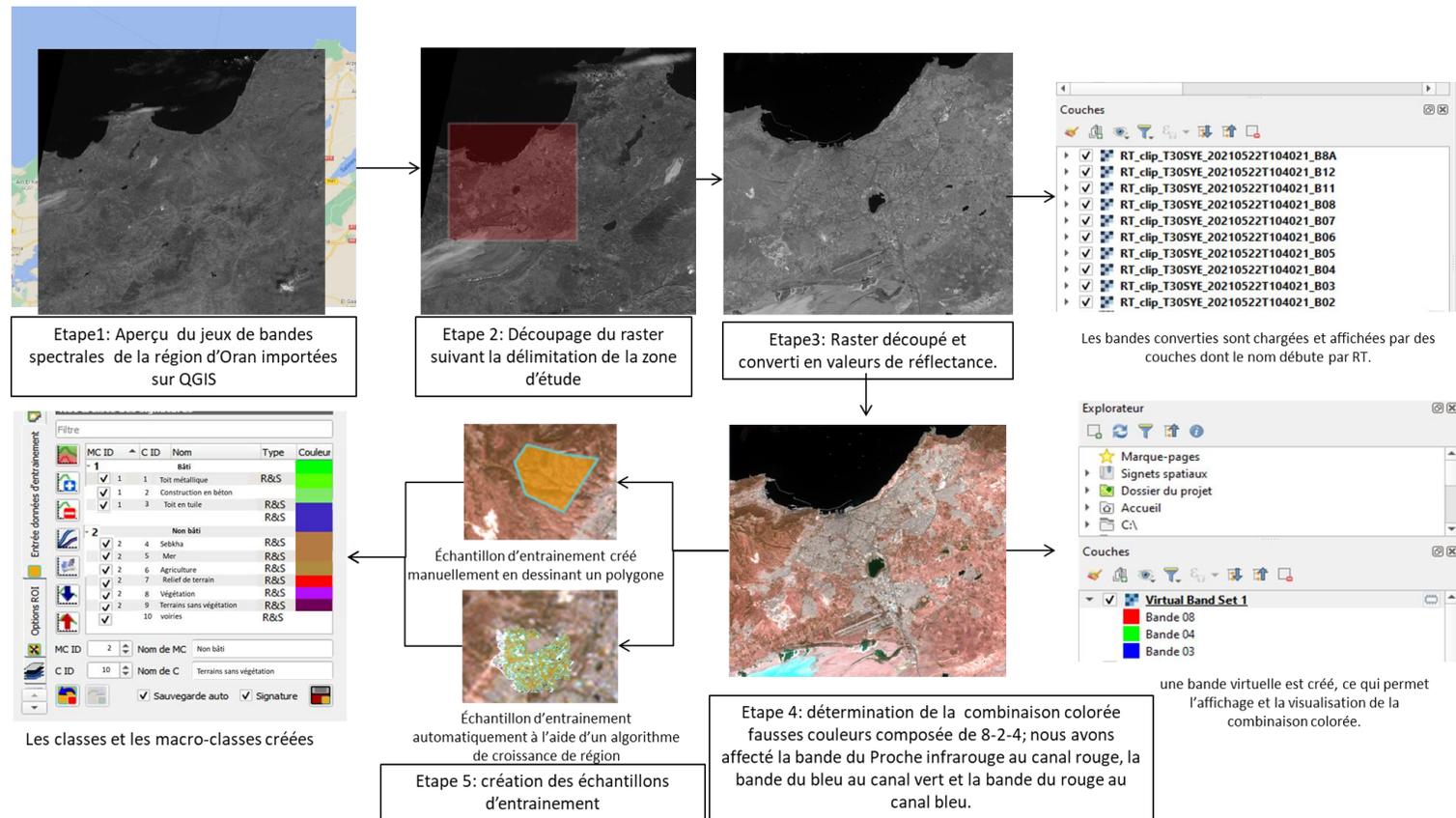


Figure 51: Le processus de la phase du prétraitement de la classification des données satellitaires.

la distance spectrale⁶⁸ des différentes signatures des classes que nous avons créées, puis nous avons rectifié les signatures similaires en retraçant d'autres échantillons représentatifs des classes. Bien entendu, le concept de distance déterminé est celui de l'algorithme de vraisemblance maximale. Après s'être assuré que les pixels sont affectés aux bonnes classes à travers une prévisualisation des résultats de la classification, nous avons lancé la classification de l'image entière.

6.4.3 La phase du post-traitement

Dans cette phase, nous avons procédé à la correction et la rectification du résultat de la classification obtenu lors de la phase du traitement Figure 52 pour éliminer les pixels isolés ou mal classés en utilisant l'outil 'cribler la classification'.

Le résultat final de la classification est représenté dans la

Figure 54.

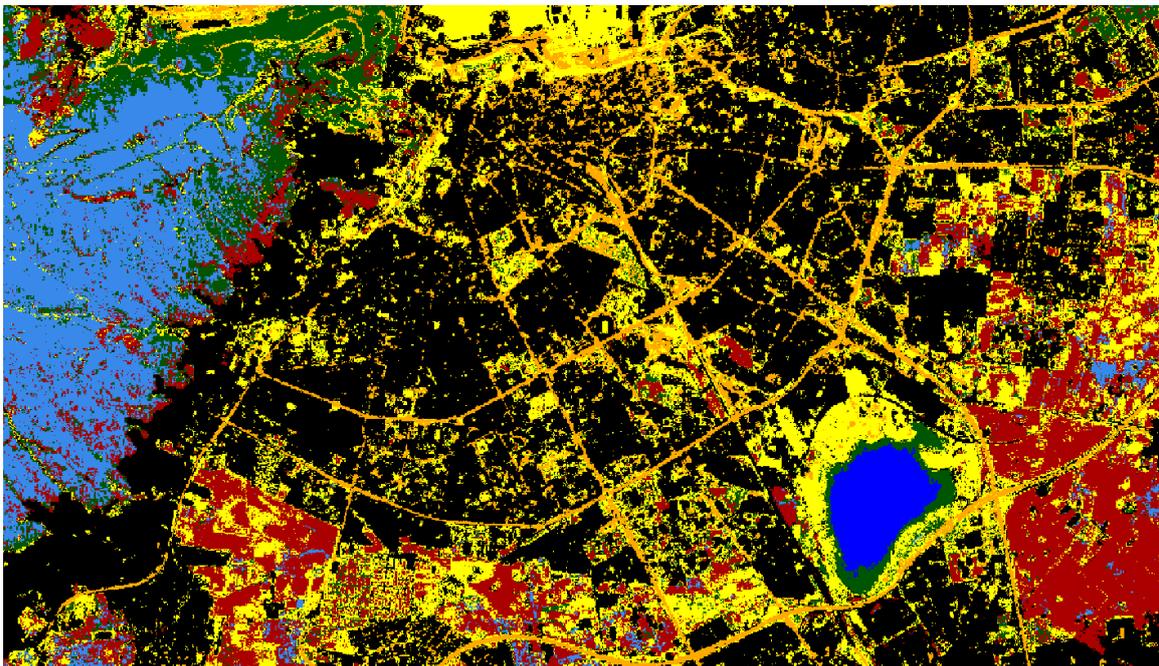


Figure 52 : Résultat de la classification avant la phase du post-traitement.

⁶⁸ La distance spectrale est la séparabilité entre les signatures des classes créées afin de trouver les signatures similaires pour éviter les erreurs de classification (Jovanović & Stanić, 2012).

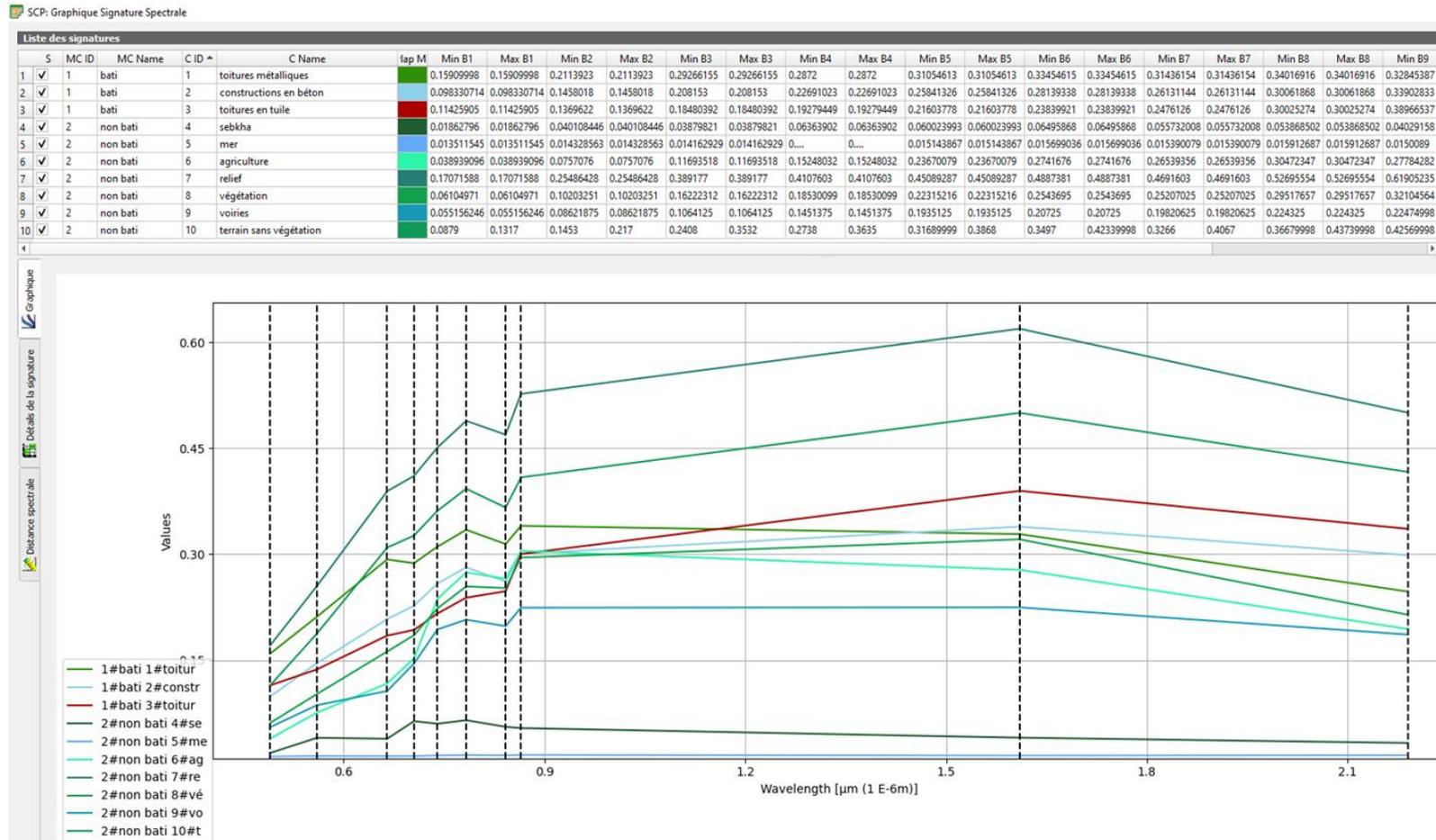


Figure 53: Evaluation de la distance spectrale des différentes classes créées et rectification des signatures spectrales similaires.

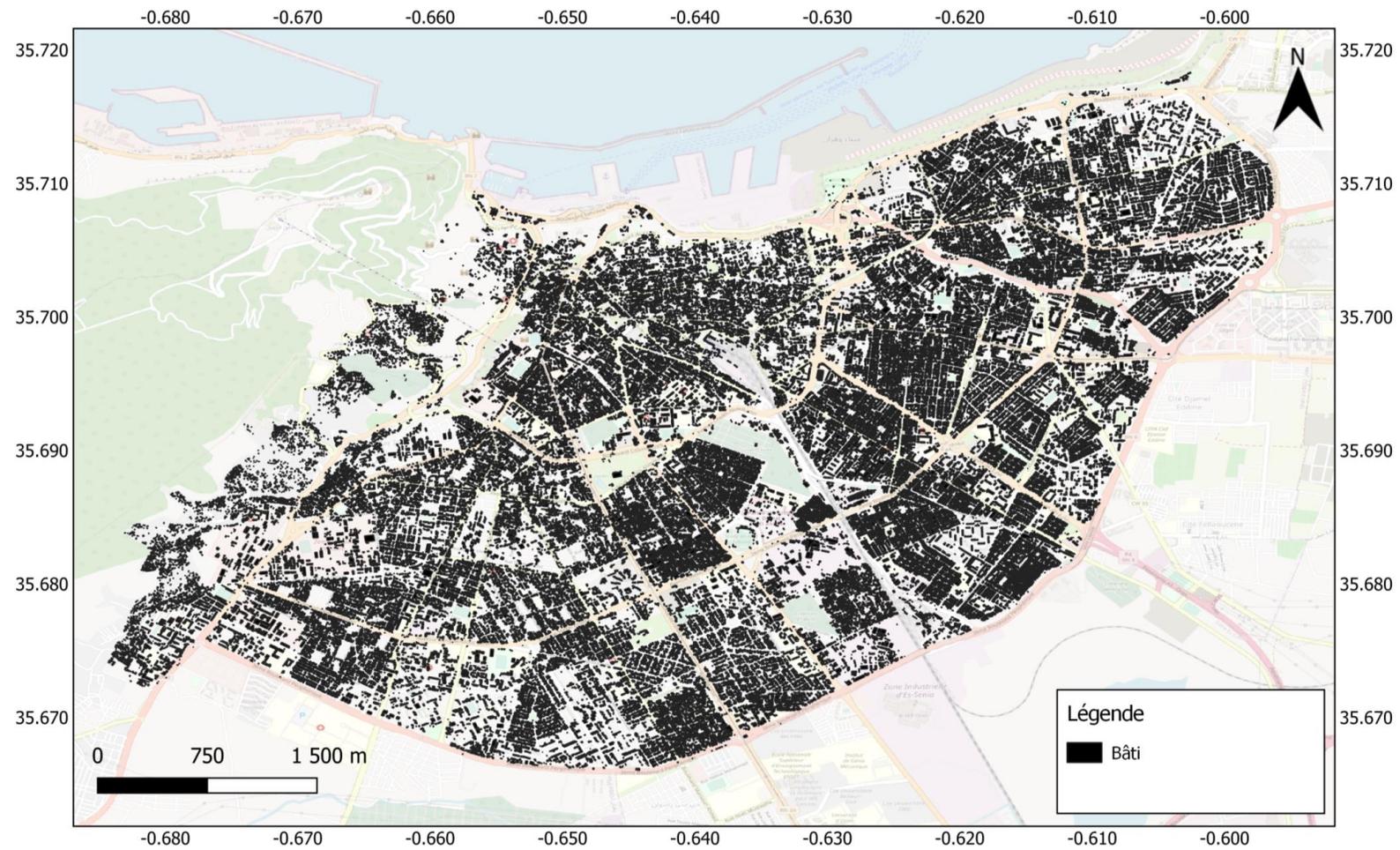


Figure 54 : Résultat final de la classification.

6.5 Matériel utilisé pour le calcul des indices paysagers de l'image Raster sur FRAGSTATS

Afin de pouvoir effectuer le calcul des indices paysagers de l'image raster de la ville d'Oran que nous avons obtenue à l'aide du processus de télédétection et de classification sur QGIS, il convient de convertir le fichier raster en fichier ASCII⁶⁹. Etant donné que la superficie de notre aire d'étude de la ville d'Oran est très importante (64 Km²), la conversion de son image raster en format ASCII produit un fichier très volumineux, ce qui rend la tâche du calcul sur FRAGSTATS impossible à effectuer. De ce fait, nous avons procédé à l'extraction d'une image raster pour chacune des 18 zones d'études. Ces dernières, ont-elles-aussi une taille de fichier non négligeable, qui varie entre 1 et 6 gigaoctet. Ce qui a causé des beugues et un dysfonctionnement du logiciel FRAGSTATS. Pour remédier à ce problème, nous avons réfléchi à l'utilisation du matériel puissant et performant. Aussi, puisque notre emprise de travail est grande, une deuxième difficulté a été rencontrée par rapport au temps de calcul, accru par le nombre d'indices à calculer (10 indices paysagers), qui peut aller jusqu'à plusieurs jours pour chaque zone. De ce fait, nous avons utilisé un ensemble de matériel composé de 4 unités centrales performantes(

Tableau 11 et Figure 55) afin de faciliter et accélérer le calcul. Nous avons lancé le calcul de chacun des 10 indices par chacun des 18 fichiers ASCII après plusieurs manipulations sur le logiciel FRASTATS.

7. Délimitations des 18 zones d'étude de la ville d'Oran

En raison de l'hétérogénéité du tissu urbain de la ville d'Oran, nous fondons notre étude sur un découpage de la ville en plusieurs zones homogènes. Pour se faire, nous nous sommes basés sur le découpage de la ville en POS établi dans le PDAU (PDAU, 2000)(Figure 56). Ce découpage est basé sur la délimitation des zones ayant un tissu urbain homogène et possédant des caractéristiques similaires (Figure 57).

⁶⁹ASCII : American Standard Code for Information Interchange (Code américain normalisé pour l'échange d'information) est un format des fichiers textes, c'est une norme informatique de codage de caractère ("code ASCII,").



Figure 55 : Matériel utilisés pour le calcul des indices paysagers de l'image Raster sur FRAGSTATS.

Processeur	Intel® Core™ i7-6900K CPU @ 3.20 GHz
Mémoire RAM	32,0 Go
Type du système	64 bits
Carte graphique	GeForce 1050 ti STO
Carte mère	Rampagextreme

Tableau 11 : Caractéristiques de chacune des 4 unités centrales utilisées.



Figure 56: Délimitation de la ville d'Oran en zone de POS (PDAU, 2000)

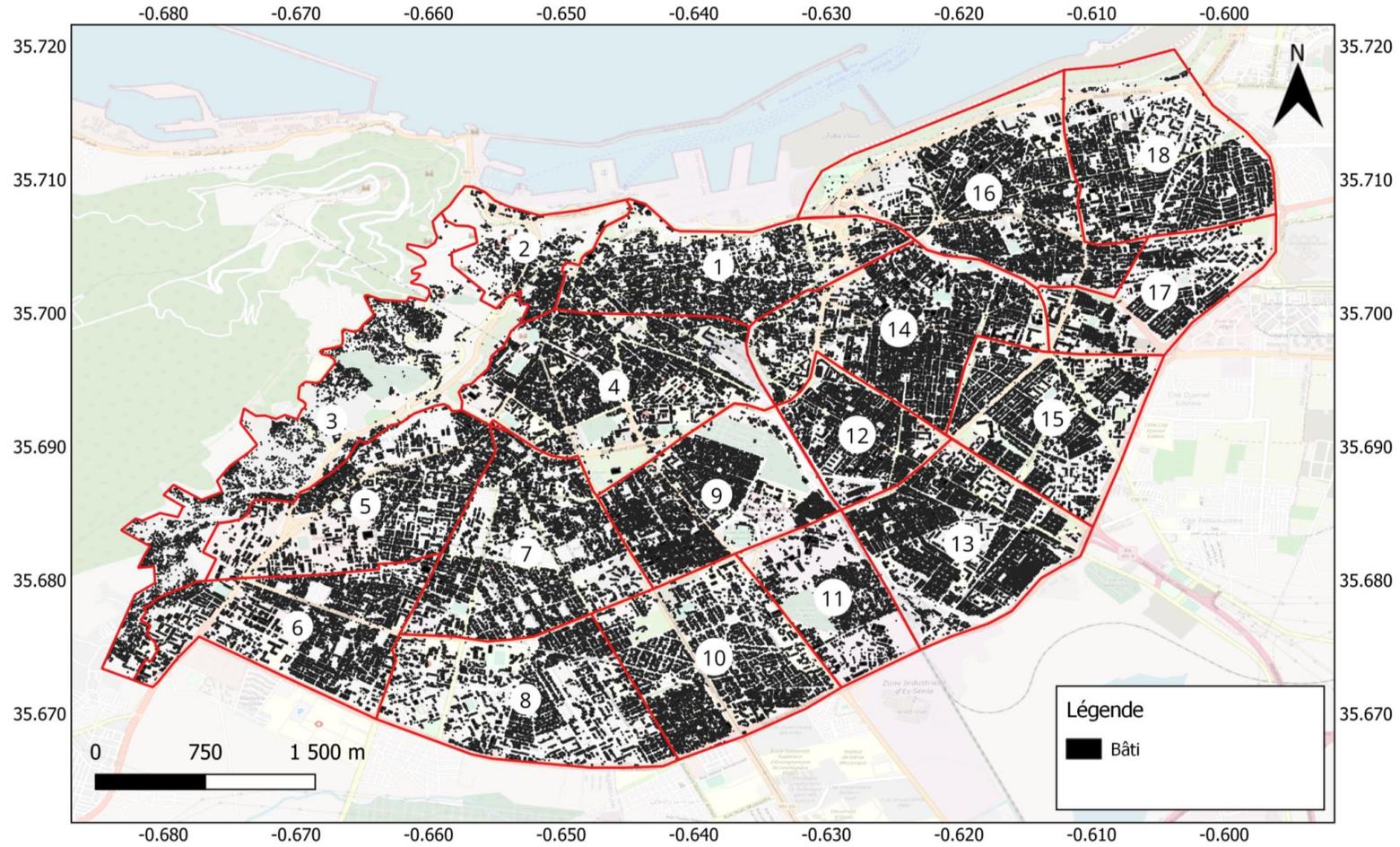


Figure 57 : Délimitation des 18 zones d'étude.

Conclusion

l'application du processus de télédétection et la classification supervisée de l'image satellitaire en passant par les trois phases de classification (La phase du prétraitement, la phase du traitement et la phase du post-traitement) , nous ont permis d'obtenir une image raster avec 2 classes (le bâti en noir et le non bâti en blanc). Le suivi minutieux et rigoureux de chacune des étapes du processus nous a permis de produire une image raster avec une précision maximale qui s'adapte parfaitement avec les occupations du sol réelles. C'est cette image que nous avons introduit comme une donnée d'entrée sur le logiciel FRAGSTATS pour le calcul des indicateurs paysagers, après plusieurs manipulations et longues heures de calcul, nous avons obtenu le résultat de chacune des 18 zones d'études que nous allons interpréter dans le chapitre suivant.

Chapitre III.:

Résultat et discussion

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus à l'issue de l'étude quantitative du tissu urbain de la ville d'Oran pour l'évaluation de la compacité urbaine de chacune des 18 zones à l'aide de l'utilisation des indices paysagers pour décrire objectivement sa composition et sa configuration spatiale en quantifiant les attributs spatiaux des éléments composant le tissu urbain , en tenant compte de leurs caractéristiques (taille, nombre, forme, densité, voisinage...) et en analysant leur disposition les uns par rapport aux autres au sein de la mosaïque urbaine à partir des données images en mode raster.

Dans un premier temps, nous exposons en détail les résultats de chacun des 10 indicateurs calculés, en indiquant leur description et en fournissant une signification du résultat obtenu en fonction de si c'est une faible valeur, une valeur moyenne ou une forte valeur. Cette technique nous permet de classer chaque zone dans l'une des trois catégories de compacité (zone à faible compacité, zone compacte et zone très compacte) et cela en croisant le résultat de tout les indicateurs. Dans un second moment, nous procédons à l'interprétation des résultats en y superposant les données sur la qualité de l'air (concentration en NOx) pour ensuite comparer ces deux données pour chaque zone. Nous ressortons alors avec une conclusion qui va infirmer ou confirmer notre hypothèse.

1. Résultats de l'analyse de la compacité urbaine d'Oran à l'aide de l'utilisation de l'approche des indices paysagers

Dans notre étude, nous nous sommes basés sur l'approche des indices paysagers pour l'analyse de la compacité urbaine, développée par Abdullahi & Pradhan dans l'ouvrage intitulé "*Spatial Modeling and Assessment of Urban Form Analysis of Urban Growth: From Sprawl to Compact Using Geospatial Data*" ou "*Modélisation spatiale et évaluation de la forme urbaine Analyse de la croissance urbaine : de l'étalement à la compacité à l'aide de données géospatiales*" (Abdullahi & Pradhan, 2017).

L'analyse quantitative du tissu urbain de la ville d'Oran pour l'évaluation de la compacité urbaine de chacune de ses 18 zones à l'aide de l'utilisation des indices paysagers a permis de décrire objectivement sa composition et sa configuration spatiale en quantifiant les attributs spatiaux des éléments composant le tissu urbain, en tenant compte de leurs caractéristiques (taille, nombre, forme, densité, voisinage...) et en analysant leur disposition les uns par rapport aux autres au sein de celui-ci partir de données images en mode raster. Les indices paysagers quantifiant la composition spatiale évaluent de quoi est composé le paysage ; c'est-à-dire la variété et la quantité des classes sans prendre en compte leur disposition les unes par rapport aux autres dans la mosaïque paysagère, ni leur arrangement spatiale. Les IP relatifs à la composition quantifient donc l'abondance⁷⁰, la richesse⁷¹, la dominance⁷² et la diversité des classes⁷³. D'autre part, la configuration spatiale se rapporte à la distribution physique, à l'arrangement, et le positionnement des classes au sein de la mosaïque paysagère évaluant ainsi le caractère spatiale (taille, forme, juxtaposition, cohésion, agrégation...) des différents patchs composant les classes. (Forman et al., 1986; Sharma et al., 2015; Uemaa et al., 2009)

⁷⁰L'abondance se rapporte à la proportion de chaque classe occupant le paysage

⁷¹ La richesse se réfère au nombre de classes présents au sein de la mosaïque

⁷²La dominance indique la prépondérance des différentes classes

⁷³ La diversité englobe les mesure de la richesse et de l'abondance

Le calcul des indices paysagers s'est effectué sur l'image en mode raster⁷⁴ que nous avons obtenu par processus de télédétection à partir d'une image satellite et dans lequel sont stockées les données géospatiales captées par le satellite Sentinel-2 et qui sont prises depuis la surface terrestre. Les données stockées sur l'image raster représentent des informations réelles sur l'occupation du sol. Le passage de l'image satellite vers l'image raster a nécessité la classification de l' image satellite selon les catégories d'occupation du sol en attribuant une valeur catégorielle⁷⁵ à chaque pixel à partir des valeurs multispectrales contenues dans les bandes spectrales composant les images géospatiales. Les images satellites combinent, sur plusieurs canaux, des mesures différentes de radiométrie qu'il faut combiner au moyen de compositions colorées. Le raster obtenu comporte un compte numérique et il est déterminé par une résolution spatiale (la taille du pixel).

Le calcul des indices paysagers s'est effectué sur le logiciel FRAGSTATS (Kevin McGarigal & Barbara J. Marks, 1995). Ce logiciel traite les données raster sous format ASCII⁷⁶ pour le calcul des indices paysagers. Sur FRAGSTATS, les indices paysagers sont regroupés selon les trois niveaux d'analyses; l'échelle des patches, des classes et l'échelle du paysage. A l'intérieur de chaque groupe d'échelle d'analyse, les indices sont organisés en fonction de l'aspect de la structure du paysage qu'ils calculent. De ce fait, dans chaque groupe d'échelle d'analyse, on retrouve six groupes d'indices : (1) les indices basés sur le calcul des surfaces et des périmètres, (2) les indices analysant la forme, (3) les indices basés sur le calcul du noyau, (4) les indices traitant le contraste, (5) les indices qui examinent l'agrégation et en derniers (6) les indices analysants la diversité. Parmi ces indices, il y a ceux qui traitent la composition spatiale et ceux qui analysent la configuration spatiale.

⁷⁴Un raster est une matrice de pixels, c'est une grille composée d'une suite de chiffres. Chaque pixel contient une valeur représentant des informations. Les photographies aériennes et les images satellitaires sont des images raster. Les données stockées sur les rasters représentent des phénomènes réels comme les données sur l'occupation du sol, la température et l'altitude.

⁷⁵ Une valeur catégorielle est une donnée associée à une catégorie spécifique, comme exemple une modalité d'occupation du sol (Wikipedia).

⁷⁶ASCII : American Standard Code for Information Interchange (Code américain normalisé pour l'échange d'information) est un format des fichiers textes, c'est une norme informatique de codage de caractère (LAROUSSE).

Le résultat du calcul des 10 indices paysagers est présenté dans le Tableau 12.

L'indice de forme (SHAPE ou SI) est l'un des indices qui analysent la configuration spatiale. Cet indice calcule la complexité de la géométrie des patches qui peut être irrégulière ou régulière et compacte. Plus la forme s'approche du carré, plus elle est régulière et donc plus elle est compacte. Inversement, plus elle est irrégulière, plus elle est moins compacte. Une forte valeur de SI indique que la forme du patch est complexe et irrégulière et donc moins compacte. Ainsi, SHAPE égale à 1 lorsque le patch est carré et augmente sans limite à mesure que la forme du patch devient plus irrégulière. La valeur la plus forte de SI est observée dans la zone 3 avec une valeur égale à 1.51. Comme le montre l'histogramme de l'indicateur SI, on peut classer le résultat des valeurs de SI en trois catégories; (1) des valeurs faibles entre 1.04 et 1.15; (2) des valeurs moyennes entre 1.2 et 1.4 et (3) des valeurs fortes entre 1.45 et 1.51. Les zones possédant une forte valeur de SI indiquent que les espaces bâtis ont une forme irrégulière et donc moins compacte. A l'inverse, les zones ayant une valeur de SI s'approchant à 1, indique la régularité des formes qui s'approche d'un carré. la zone 12 présente la plus faible valeur de SI (SI=1.04) ce qui indique la forte régularité des patches dans cette zone.

L'indice de forme du paysage LSI (Landscape Shape Index) traite la complexité des formes urbaines. Plus les patches sont irréguliers et complexes, plus leurs périmètres augmentent et donc plus le tissu est fragmenté et moins compacte. Une forte valeur de LSI indique que le tissu est fragmenté. Plus la longueur des périmètres des patches est élevée, plus le paysage est fragmenté, plus il est moins compacte. Inversement, plus LSI s'approche de 1, plus les patches sont plus compactes et donc plus le paysage est agrégé. Pour la classe du bâti, la plus faible valeur de LSI est observée dans la zone 1 (LSI=6.3), ce qui est indique que la longueur des périmètres des ses patches est réduite et donc les formes urbaines sont agrégés. D'autres zones possèdent des valeurs de LSI supérieurs à 50. Les espaces bâtis dans ces zones sont alors fragmentés vu la longueur importante des périmètres de ses patches bâtis. La zone 3 possède la plus forte valeur de LSI (LSI= 54).

L'indicateur de densité de lisières/ de bordures ED est un indice spatial qui nous donne une information sur la longueur des bordures des patches par unité de surface. Plus les patches ont des formes irrégulières et complexes, plus leur longueur de lisière augmente, plus le tissu

est fragmenté et donc plus il est moins compacte. Comme nous pouvons le voir sur l'histogramme de l'indicateur ED, la zone 17 possède la plus faible valeur de ED (ED= 210), la zone possédant la plus forte valeur de ED est la zone 3 (ED= 2063). On peut constater que les plus faibles valeurs de ED varient entre 200 et 600; la longueur de bordures des patches bâtis de ces zones est réduite par rapport aux autres zones, cela indique que ces dernières possèdent une forme régulière et moins complexe. Les plus fortes valeurs de ED sont supérieures à 1300.

L'indice du cercle circonscrit CERCLE mesure l'élongation des patches à l'intérieur de la zone d'étude. Une faible valeur de CERCLE indique un patch très étroit et donc une compacité élevée de celui-ci. Inversement, une très forte valeur de cet indice indique un patch allongé et donc une faible compacité de ce dernier. La zone 1 possède la plus faible valeur (CERCLE= 0.05). Comme le montre l'histogramme de l'indicateur CERCLE, les faibles valeurs varient entre 0.05 et 0.2. Les plus fortes valeurs sont entre 0.5 et 0.6.

L'indicateur de densité de patch PD nous donne une information sur le nombre de patches d'une classe donnée par unité de surface. On remarque que la densité des patches est très élevée dans les zones 1, 2, 10,12,13, 14,15,17 avec une valeur PD supérieure à 1500. Les patches du bâti sont très présents dans ces zones. A l'inverse, les valeurs de densité de patches dans la classe du non bâti qui varient entre 160 et 531 sont très faibles. La zone 14 possède la plus forte densité de PD (4176). Les zones 4,3 et 2 possèdent les plus faibles valeurs de PD (inférieures à 2100) avec en parallèle une très forte densité de patches de la classe du non bâti. Le reste des zones présente des valeurs intermédiaires.

L'indice du plus grand patch LPI représente le degré de fragmentation du tissu urbain. En mesurant la taille des patches, cet indice nous donne une information sur la superficie qu'occupe le plus grand patch dans chaque zone d'étude. Les zones compactes présentent généralement une forte densité de population et de construction, et donc une faible fragmentation. Une valeur élevée de LPI indique une faible fragmentation et donc une forte compacité urbaine. En revanche, plus la valeur de LPI est faible, plus les patches qui composent le paysage urbain sont petits, plus la mosaïque urbaine est fragmentée et donc plus elle est moins compacte. D'après l'histogramme de l'indicateur LPI, nous pouvons constater que les zones possédant une forte valeur de LPI sont les zones avec un LPI supérieur à 3. Les plus faibles valeurs de LPI varient entre 0.1 et 0.17.

Le rayon de giration GYRATE mesure l'extension du patch. Il traduit la distance à laquelle un patch s'étend dans le paysage. Une valeur élevée de cet indice indique une faible compacité urbaine. Les valeurs les plus élevées comme nous pouvons le constater sur l'histogramme sont supérieures à 3. GYRATE vaut 0 lorsque le patch est constitué d'un seul pixel et augmente sans limite lorsque le patch s'étend. Le GYRATE atteint sa valeur maximale lorsque le patch couvre l'ensemble de la zone d'étude. Les zones possédant les plus fortes valeurs de cet indicateur sont les zones 2, 3 et 4 avec un GYRATE supérieur à 3.

L'indice d'agrégation AI, Une valeur de AI qui s'approche de 0 indique qu'il y a très peu d'arrêtes adjacentes ; c'est à dire très peu de jointures communes entre les pixels de la classe, ce qui indique une dispersion spatiale. D'après l'histogramme de AI, nous pouvons constater que les valeurs les plus faibles sont inférieures à 30. Les valeurs les plus fortes varient entre 60 et 90. AI vaut 100% quand tous les pixels de la classe sont agrégés en un seul patch, cela indique l'agrégation et la compacité.

L'indice d'équitabilité de Simpson SIEI traite la composition de la mosaïque urbaine. Cet indice mesure la distribution et l'abondance des types de patches (classes) au sein du paysage urbain. Une distribution égale de la surface paysagère résulte une valeur maximale de SIEI, dans ce cas, les différentes classes ont une abondance similaire. SIEI varie entre 0 et 1; il vaut 0 lorsque le paysage est dominé par une seule classe et vaut 1 lorsqu'il y a une distribution équitable des différentes classes au sein du paysage. Comme nous pouvons le voir que l'histogramme de SIEI; les fortes valeurs de SIEI varient entre 0.3 et 0.6 et ce dans les zones 5, 6, 7, 8, 11, 16 et 18. Ces valeurs indiquent que ces zones présentent une abondance et une distribution plus ou moins équitable entre la classe du bâti et la classe du non bâti. En revanche, les autres zones avec SIEI inférieur à 0.2 sont caractérisées par une dominance d'une seule classe qu'elle soit la classe du bâti ou la classe du non bâti pour les zones 2, 3 et 4.

Comme SIEI, l'indice de diversité de Shannon SHDI analyse lui aussi la composition spatiale. Cet indice prend en compte le nombre de classes (la diversité) et l'abondance de chaque classe au sein de la mosaïque urbaine. En d'autres termes, cet indice mesure

l'hétérogénéité en combinant la richesse et la régularité⁷⁷. Une forte valeur de SHDI indique une distribution équitable de la surface paysagère entre les classes du bâti et du non bâti. Les zones présentant une forte valeur de SHDI sont les zones 5, 6, 7, 8, 11, 16 et 18. Une faible valeur de SHDI indique une distribution inégale de la surface paysagère entre les classes. Les zones présentant une forte valeur de SHDI sont les zones 1, 9, 10, 12, 13, 14, 15 et 17 et sont dominées par la classe du bâti et les zones 2, 3 et 4 et sont dominées par la classe du non bâti.

2. Interprétation des résultats

En résumé, nous pouvons classer les zones selon le résultat du calcul des indices paysagers (Tableau 13) en trois catégories: zone à (1) forte ; à (2) moyenne ou à (3) faible compacité urbaine, et y superposer les données sur la qualité de l'air (concentration en NOx) (Tableau 14) pour comparer ces deux données pour chaque zone. Pour faciliter le classement des zones en très compactes, compactes et moins compactes, nous synthétisons ci-après le classement des valeurs des indices paysagers.

Pour les zones très compactes; les indicateurs de configuration spatiale présentant de faibles valeurs indiquent que les patchs bâtis ont une forme régulière (SI), étroite (CERCLE), moins étendue (GYRATE), moins complexe (LSI) et avec une longueur de bordures moins importantes (ED). Les deux autres indicateurs de configuration spatiale présentant de fortes valeurs indiquent que le tissu urbain est moins fragmenté (LPI) et très agrégé (AI). D'autres part, les zones très compactes sont les zones avec les indicateurs de composition spatiale présentant une forte densité du patch bâti (PD) et avec une dominance de la classe du bâti (faible valeur de SIEI) et une hétérogénéité élevée du tissu urbain (faible valeur de SHDI; pas de diversité de classe et distribution inégale entre les classes de la mosaïque paysagère). En se basant sur cette description et selon le résultat présenté dans le Tableau 12 on peut classer les zones 1 (Hai El Amir), 9 (Hai El Hamri), 10 (Hai Es Salem), 12 (El Khalidia), 13 (Hai Ibn Sina), 14 (Hai El Makari), 15 (Dar El Beida) et 17 (Hai Ibn Rochd II) comme des zones très compactes.

⁷⁷ La richesse fait référence au nombre de classes et la régularité fait référence à l'homogénéité des classes. Plus les proportions sont égales pour chacune des classes, plus le paysage est homogène et équitable (Roberts, 2019).

La forte compacité urbaine dans ces zones s'explique par la forte densité de population , la forte densité de construction et la forte densité résidentielle avec une faible présence d'espaces verts (Tableau 7) et un fort flux de véhicules et donc une émission élevée de polluants (Tableau 5). Comme le montre la Figure 18, ces zones ont une concentration en NOx entre 40-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les zones 9, 10, 14, 15 et 17 ; entre 50-60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les zones 12 et 13 et entre 60-70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la zone 1. Ces valeurs dépassent le seuil des recommandations de l'OMS qui est de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figure 10). On déduit de cette comparaison que les zones les plus compactes sont exposées à une forte pollution de l'air.

Pour les zones les moins compactes; les indicateurs de configuration spatiale présentant de fortes valeurs indiquent que les patchs bâtis ont une forme très irrégulière (SI), large (CERCLE), étendue (GYRATE), complexe (LSI) et avec une longueur de bordures très importantes (ED). Les deux autres indicateurs de configuration spatiale présentant de faibles valeurs indiquent que le tissu urbain est très fragmenté (LPI) et moins agrégé (AI). D'autres part, les zones moins compactes sont les zones avec les indicateurs de composition spatiale présentant une forte densité du patch non bâti (PD) et avec une dominance de la classe du non bâti (faible valeur de SIEI) et une hétérogénéité élevée du tissu urbain (faible valeur de SHDI; pas de diversité de classe et distribution inégale entre les classes bâti et non bâti au sein de la mosaïque paysagère) . En se basant sur cette description et selon le résultat présenté dans le Tableau 12, on peut classer les zones 2 (Hai El Houari) ,3 (Les Planteurs) et 4 (Sidi El Bachir) comme des zones les moins compactes. Bien que ces zones sont caractérisées par une densité de population, et de construction élevées, cette densité est compensée avec une superficie importante d'espaces verts et d'espaces libres. Cette forte présence d'espaces libres se manifeste par la présence du grand jardin public de MdinaJdida dans Hai Sidi El Bachir, pour Hai Sidi El Houari parle vieux port d'Oran au nord et la forêt de Murdjadjou à l'ouest et une grande partie de la forêt de Murdjadjou pour Les Planteurs. Ces zones sont caractérisées par une concentration en NOx entre 10-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les zones 2 et 3, et entre 15-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la zone 4. Ce qui indique que les zones moins compactes et caractérisées avec une fortes présence d'espaces libres sont exposées à une faible concentration en NOx.

Les zones à compacité moyenne présentent des valeurs intermédiaires (pas très fortes, ni très faibles) et semblables pour les indicateurs de configuration spatiale (SI, LSI, ED, CERCLE, LPI, GYRATE et AI). En revanche, les valeurs des indicateurs de composition

spatiale (le SIEI et le SHDI) sont très élevées, ce qui indique une répartition plus ou moins équilibrée entre la classe du bâti et la classe du non bâti. En se basant sur le résultat du calcul, on peut classer dans cette catégorie les zones 5 (Hai Mahéddine), 6 (Hai El Badr), 7(Hai El Mokrani), 8 (Hai El Ottmania), 11 (Hai Noussair), 16(Hai Ibn Rochd I) et 18(Hai Es Seddikia). Ces zones sont exposées à une concentration en NOx entre 30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les zones 8, 11, 16 et 18 et entre 20-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les zones 5, 6 et 7 Les espaces batides ces zones sont équilibrés par la présence d'espaces verts et d'espaces libres, par exemple le jardin Méditerranéen pour la zone 18 et l'esplanade de Sidi M'hamed pour la zone 16 .De ce fait, On déduit que les zones à compacité moyenne sont exposées à une concentration intermédiaire en polluants atmosphériques. Nous pouvons constater que les valeurs seuils pour une compacité favorable à la qualité de l'air (une concentration en NOx inférieure à $40\mu\text{m}^3$) sont: $SI \geq 1.2$, $LSI \geq 19$, $ED \geq 700$, $CERCLE \geq 0.17$, $LPI \leq 2.2$, $GYRATE \geq 1.9$, $AI \leq 58$.

PARTIE II/ Chapitre III: Résultats et discussion

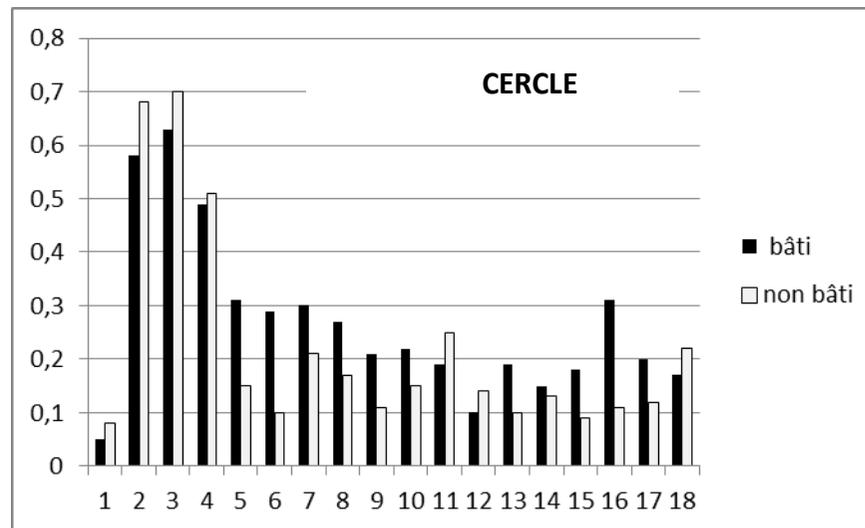
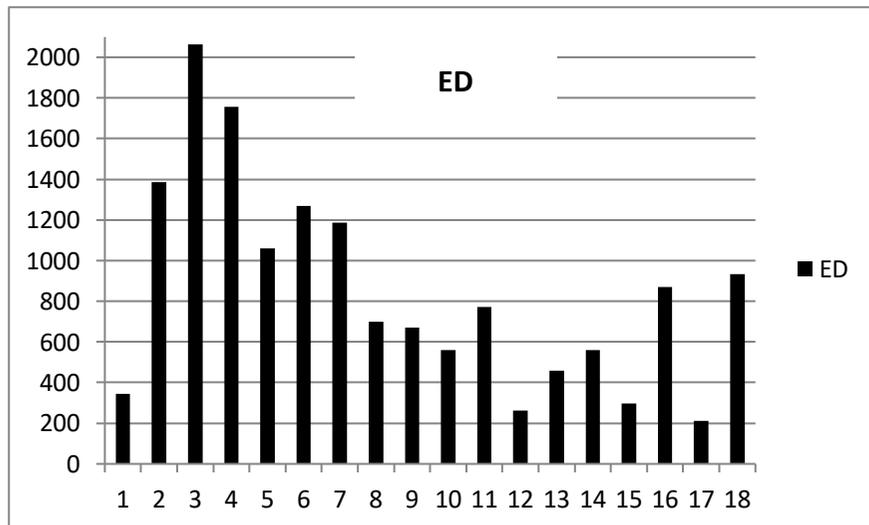
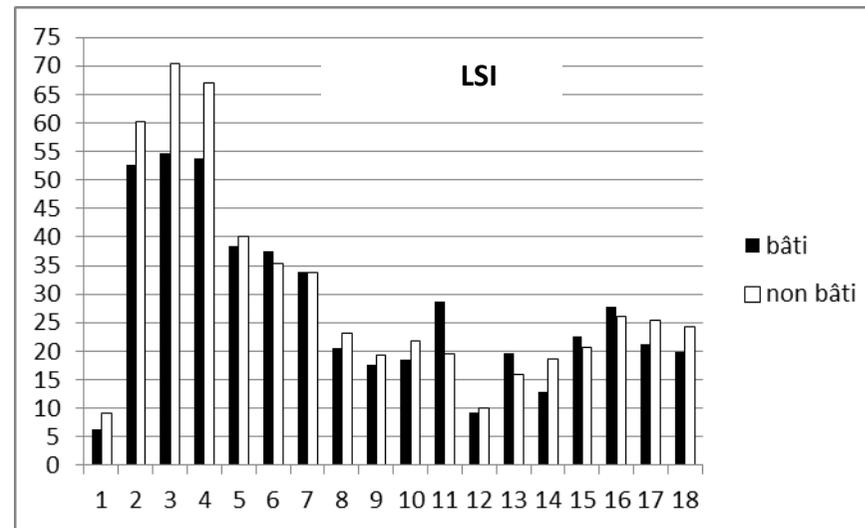
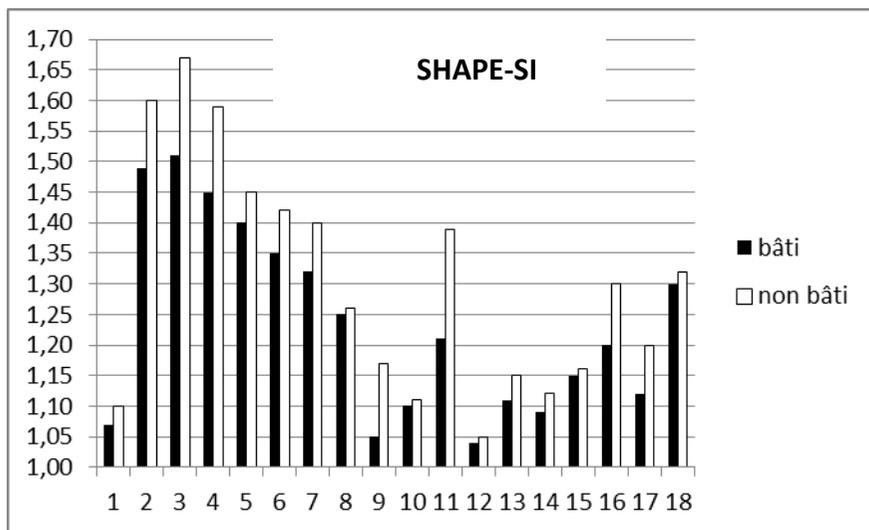
Zone	SHAPE-SI		LSI		ED	CERCLE		PD	LPI		GYRATE		AI		SIEI	SHDI	
	bâti	non bâti	bâti	non bâti	paysage	bâti	non bâti	bâti	non bâti	bâti	non bâti	bâti	non bâti	bâti	non bâti	paysage	paysage
1	1,07	1,10	6,3	9,02	345,2	0,05	0,08	2921,22	169,2	6,44	4,51	0,76	0,6	91,85	45,27	0,1	0,5
2	1,49	1,60	52,69	60,24	1385,54	0,58	0,68	171,82	928,19	0,15	30,12	3,78	9,1	37,2	69,71	0,15	0,55
3	1,51	1,67	54,62	70,31	2063,35	0,63	0,7	323,4	4935,2	0,1	40,32	3,9	10,06	33,67	70,82	0,07	0,47
4	1,45	1,59	53,73	67,1	1757,83	0,49	0,51	2100	1937,91	0,17	15	3,36	5,2	25,01	60,2	0,11	0,51
5	1,40	1,45	38,31	40,1	1059,32	0,31	0,15	5009,81	3997,8	1,07	13,01	2,13	1,05	41,75	50,34	0,46	0,86
6	1,35	1,42	37,38	35,4	1268,72	0,29	0,1	4321,72	3986,32	1,09	7,91	1,98	0,72	52,9	22,98	0,41	0,81
7	1,32	1,40	33,94	33,7	1187,83	0,3	0,21	5129,31	3500	2,01	9,24	2,43	1,45	39,9	60,01	0,39	0,79
8	1,25	1,26	20,62	23,17	698,9	0,27	0,17	1900	4500,21	1,71	13,2	2,79	0,72	38,2	20,19	0,68	0,88
9	1,05	1,17	17,62	19,2	672,1	0,21	0,11	2728,44	531,78	11,27	12,27	1,1	1,01	71,44	29,7	0,17	0,92
10	1,10	1,11	18,46	21,7	558,38	0,22	0,15	2230,02	410,4	3,22	6,7	0,94	1,07	89,82	38,1	0,21	0,61
11	1,21	1,39	28,61	19,52	773,1	0,19	0,25	1500	4001	1,14	15,22	3,02	1,45	47,07	38,19	0,58	0,98
12	1,04	1,05	9,3	10,1	263,67	0,1	0,14	3715,23	185,76	5,1	3,01	0,63	0,71	92,08	50,75	0,12	0,52
13	1,11	1,15	19,59	15,9	459,01	0,19	0,1	3396,88	179,84	9,05	7,1	0,8	0,1	85,79	30,01	0,15	0,55
14	1,09	1,12	12,73	18,61	561,35	0,15	0,13	4176,73	274,98	9,78	8,9	0,61	0,23	70,03	25,33	0,18	0,58
15	1,15	1,16	22,46	20,59	298,21	0,18	0,09	1972,46	300,21	7,23	10,02	1,05	0,54	63,55	58,2	0,22	0,62
16	1,20	1,30	27,76	26,18	869,78	0,31	0,11	4728,09	3998,17	2,12	7,46	3,19	0,41	58,1	60,01	0,55	0,95
17	1,12	1,20	21,32	25,3	210,57	0,2	0,12	1511,1	312,72	4,31	5,34	1,02	0,51	75,33	49,12	0,21	0,61
18	1,30	1,32	19,78	24,22	931,94	0,17	0,22	5200,18	3600	2,23	6,12	2,5	0,61	41,19	46,13	0,56	0,96

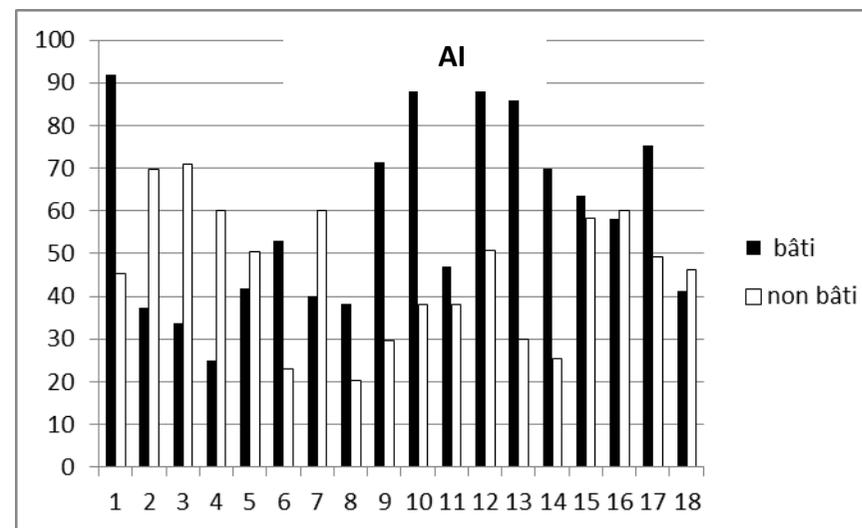
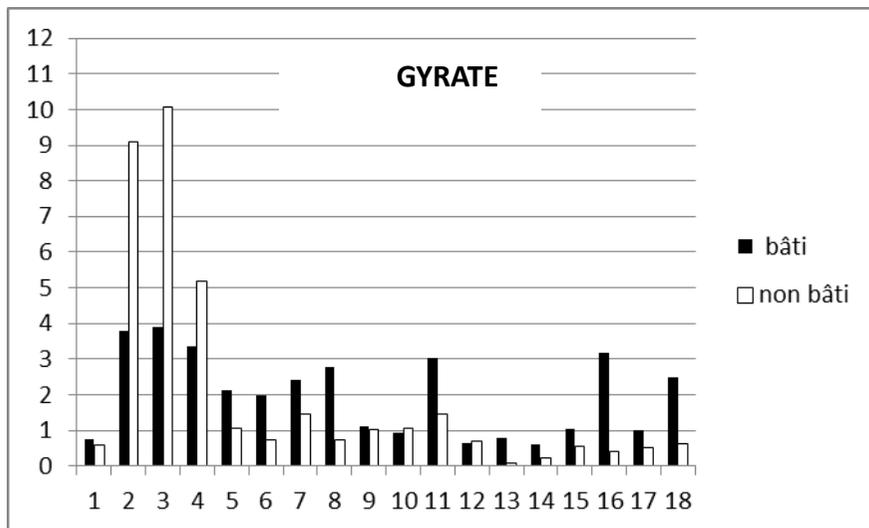
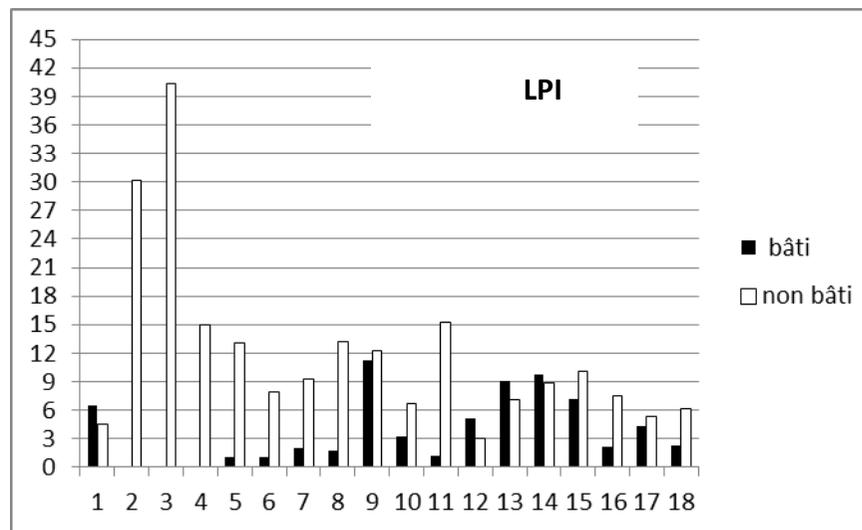
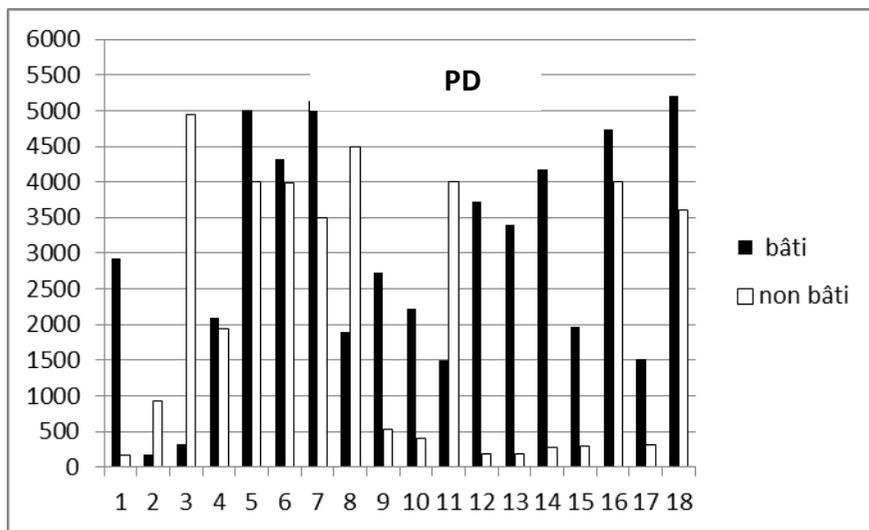
Tableau 12 : Résultats des indices paysagers calculés sur le logiciel FRAGSTATS des 18 zones d'étude de la ville d'Oran pour l'analyse de la compacité urbaine.

PARTIE II/ Chapitre III: Résultats et discussion

Compacité	Zone	SHAPE-SI	LSI	ED	CERCLE	PD	LPI	GYRATE	AI	SIEI	SHDI	NOX (µg/m3)
		bâti	bâti	paysage	bâti	bâti	bâti	bâti	bâti	paysage	paysage	
forte	1	1,07	6,3	345,2	0,05	2921,22	6,44	0,76	91,85	0,1	0,5	60-70
	12	1,04	9,3	263,67	0,1	3715,23	5,1	0,63	92,08	0,12	0,52	50-60
	13	1,11	19,59	459,01	0,19	3396,88	9,05	0,8	85,79	0,15	0,55	50-60
	14	1,09	12,73	561,35	0,15	4176,73	9,78	0,61	70,03	0,18	0,58	40-50
	15	1,15	22,46	298,21	0,18	1972,46	7,23	1,05	63,55	0,22	0,62	40-50
	17	1,12	21,32	210,57	0,2	1511,1	4,31	1,02	75,33	0,21	0,61	40-50
	10	1,1	18,46	558,38	0,22	2230,02	3,22	0,94	89,82	0,21	0,61	40-50
	9	1,05	17,62	672,1	0,21	2728,44	11,27	1,1	71,44	0,17	0,92	40-50
moyenne	16	1,2	27,76	869,78	0,31	4728,09	2,12	3,19	58,1	0,55	0,95	30-40
	8	1,25	20,62	698,9	0,27	1900	1,71	2,79	38,2	0,68	0,88	30-40
	11	1,21	28,61	773,1	0,19	1500	1,14	3,02	47,07	0,58	0,98	30-40
	18	1,3	19,78	931,94	0,17	5200,18	2,23	2,5	41,19	0,56	0,96	30-40
	5	1,4	38,31	1059,32	0,31	5009,81	1,07	2,13	41,75	0,46	0,86	20-30
	6	1,35	37,38	1268,72	0,29	4321,72	1,09	1,98	52,9	0,41	0,81	20-30
	7	1,32	33,94	1187,83	0,3	5129,31	2,01	2,43	39,9	0,39	0,79	20-30
faible	4	1,45	53,73	1757,83	0,49	2100	0,17	3,36	25,01	0,11	0,51	15-20
	2	1,49	52,69	1385,54	0,58	171,82	0,15	3,78	37,2	0,15	0,55	10-15
	3	1,51	54,62	2063,35	0,63	323,4	0,1	3,9	33,67	0,07	0,47	10-15

Tableau 13: Classification des zones en fonction du niveau de compacité selon les résultats du calcul des indices.





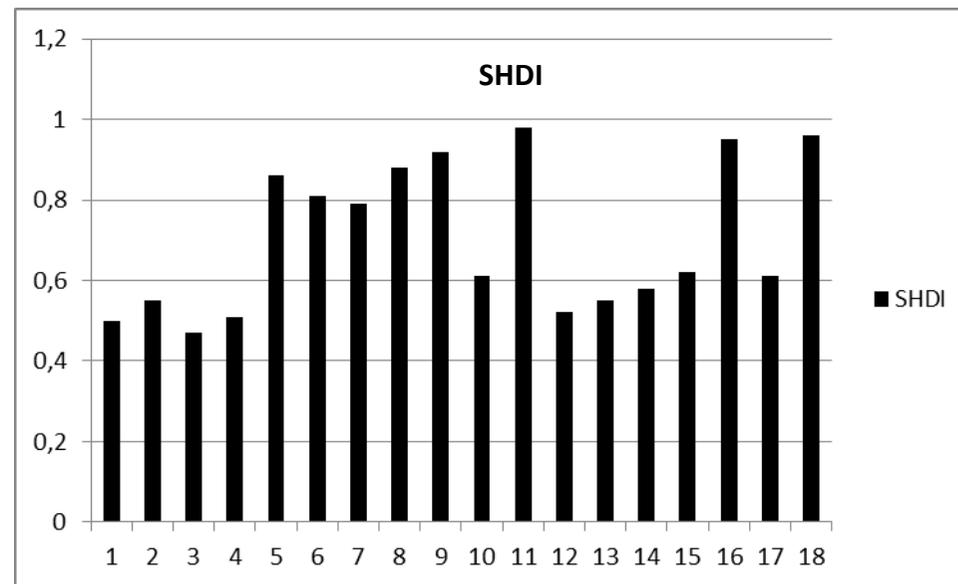
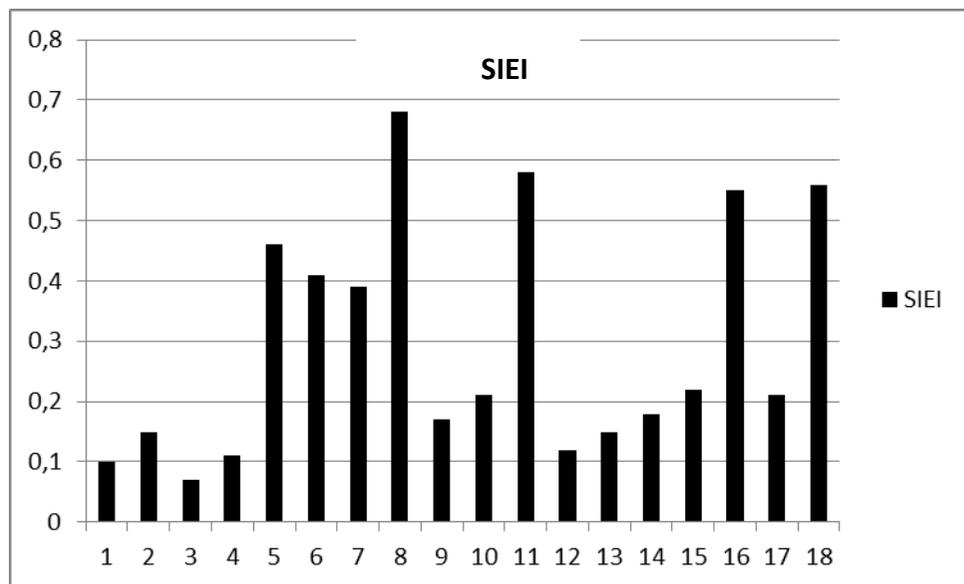


Figure 58 : Les histogrammes de chaque indice paysager calculé sur FRAGSTATS pour chacune des 18 zones d'études.

zone	Désignation	Valeur Nox ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	El Amir district	60 -70
2	El Houari district	10 -15
3	les Planteurs district	10 -15
4	Sidi El Bachir district	15 -20
5	Mahéddine district	20 -30
6	El Badr district	20 -30
7	El Mokrani district	20 -30
8	El Othmania district	30 -40
9	El Hamri district	40 -50
10	Es Salem district	40 -50
11	Noussair district	30 -40
12	El Khalidia district	50 -60
13	Ibn Sina district	50 -60
14	El Makari district	40 -50
15	Dar El Beida district	40 -50
16	Ibn Rochd I district	30 -40
17	Ibn Rochd II district	40 -50
18	Es Seddikia district	30 -40

Tableau 14: Concentration de polluant atmosphérique dans chacune des 18 zones d'études (source: (Rahal et al., 2018))

Conclusion

Nous pouvons conclure que plus les zones urbaines sont compactes, plus elles sont exposées à une forte concentration de polluants atmosphériques et donc finalement la forte compacité urbaine a un impact négatif sur la qualité de l'air dans la ville d'Oran. Ce qui s'accorde avec notre hypothèse de recherche, à savoir qu'une compacité physique élevée de la configuration et la composition spatiales des éléments bâtis est associée à des impacts négatifs sur la qualité de l'air et une concentration élevée de polluants atmosphériques, ce qui a pour conséquence d'affecter la santé des habitants. En effet, le processus de densification qu'a connu la ville d'Oran au fil du temps a provoqué une compacité élevée dans certaines zones. Le remplissage des dents creuses et la construction des espaces libres qui se font de plus en plus rares dans la ville contrecarrent la maintien de la nature en ville, ce qui produit plus d'espaces bétonnés et asphaltés et plus de sol artificialisés et imperméables. Ceci n'est pas sans conséquences sur la qualité de vie des habitants ni sur la qualité de l'environnement notamment celle qui concerne l'air ambiant au sein de l'espace urbain.

Plus encore, ces effets négatifs des tissus urbains compacts s'amplifient avec la présence d'un fort flux de véhicules qui sont les principaux émetteurs des gaz à effets de serre. Cet impact se pose avec d'autant plus d'acuité dans les espaces urbains occupés par les constructions de grande hauteur que la ville d'Oran en connaît une vraie poussée depuis quelques années. Il est important de souligner que cette densification du tissu urbain existant qu'elle soit verticale ou horizontale n'empêche pas l'extension urbaine qui s'effectue dans la périphérie même lointaine de la ville et qui se fait au détriment des espaces naturels, agricoles ou encore forestiers. Ce qui a été évoqué dans cette conclusion vient de mettre en lumière l'importance d'une densification "douce" et une compacité maîtrisée qui peut trouver un juste milieu et tirer profit des atouts de la forme urbaine compacte qui tend à lutter contre l'étalement urbain consommateur d'espaces, de ressources et d'énergies sans pour autant être néfaste sur la santé de l'habitant et sur son cadre de vie.

Conclusion de la deuxième partie

Les chapitres de cette partie nous ont permis d'abord d'étayer et de comprendre la croissance urbaine d'Oran qui s'est développée à partir de son noyau initial à travers une trame semi-circulaire. Le chapitre I jette de la clarté sur la composition actuelle du tissu urbain d'Oran et déchiffre son organisation et sa structure qui s'est constituée au fil du temps sous l'influence du relief, des strates de chaque modèle urbain propre à chaque période ainsi que les considérations politico-administratives et économiques (rareté et cherté du foncier). Aujourd'hui, les terrains libres se font de plus en plus rares dans certaines zones de la ville et leur morphologie urbaine se voit de plus en plus compacte.

L'utilisation de la méthode de l'évaluation de la compacité urbaine en exploitant les données de télédétection et en utilisant les outils SIG et le logiciel FRAGSTATS pour le calcul des indices paysagers nous a permis de faire une analyse quantitative du paysage pour décrire objectivement la composition et la configuration spatiale. C'est à dire la distribution physique, l'arrangement, et le positionnement des bâtiments au sein de la mosaïque paysagère urbaine évaluant ainsi leur caractère spatiale (taille, forme, juxtaposition, cohésion, agrégation...). Le résultat a prouvé que la forte compacité urbaine est associée à une forte concentration de polluants atmosphériques et donc à une mauvaise qualité de l'air. Cette étude rejoint les nombreuses controverses scientifiques qui dévoilent les effets négatifs de la compacité urbaine, qui vont à l'encontre de ce qui est admis dans 69% des recherches dans la littérature qui font état d'effets positifs associés à la forme urbaine compacte et que la plupart des politiques urbaines mènent sa promotion qui considèrent la densification comme une figure consensuelle de l'action publique urbaine pour un urbanisme favorable à la santé et à l'environnement.

Conclusion générale

Cette étude remet en cause le consensus commun que la forme urbaine compacte est la solution idéal de la ville durable et révèle l'un des aspects négatifs que peut procurer une forte compacité urbaine. Ce qui s'accorde avec notre hypothèse de recherche, à savoir qu'une compacité physique élevée de la configuration et la composition spatiales des éléments bâtis est associée à des impacts négatifs sur la qualité de l'air et une concentration élevée de polluants atmosphériques, ce qui a pour conséquence d'affecter la santé des habitants.

Bien que la forme urbaine compacte soit admise comme un modèle pour un développement urbain durable et soit connue pour ses effets positifs concernant la réduction de la consommation des sol et de l'énergie, la réduction des déplacement motorisés en favorisant la proximité et l'accessibilité et donc la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la mixité fonctionnelle et donc la diversité sociale, l'augmentation de l'activité physique en favorisant les déplacements actifs et donc une moindre dépendance à la voiture. La forme urbaine compacte qui s'affiche comme l'antonyme de l'étalement urbain peut également présenter l'inconvénient de pouvoir générer des effets négatifs qui vont à l'encontre de la durabilité urbaine. Cette étude rejoint alors les nombreuses controverses qui ont été attribuées à la ville compacte concernant le surpeuplement, le manque d'espaces verts qui peut réduire les possibilités d'activités favorables à la santé telles que l'activité physique en plein air et les loisirs qui réduisent le stress, une forte exposition au bruit et à la pollution atmosphérique, l'effet d'îlot de chaleur ainsi qu'une forte congestion urbaine et donc un niveau élevé de stress.

Certes que la ville de courtes distances présente des vertus concernant la réduction du nombre de kilomètres parcourus par les véhicules (KPV) et donc la réduction des émissions de polluants et des gaz à effet de serre en limitant la demande de déplacements et en facilitant les économies d'énergie, en revanche, cette étude, en abordant le rapport entre la compacité urbaine et la qualité de l'air avec une prise en compte de la structure spatiale du tissu urbain, a démontré que les zones à forte compacité dans la ville d'Oran peuvent augmenter le risque de l'exposition des populations résidentes à la pollution atmosphérique. Et cela pour plusieurs raisons; on peut citer notamment: la congestion et donc une forte concentration de polluants en raison de la mauvaise dispersion et l'effet d'îlots de chaleur (température plus élevée) qui est plus accentuée dans les zones les plus compactes qui favorise la formation d'O₃ (ozone) et du NO_x (l'oxyde d'azote).

La compacité élevée dans certaines zones de la ville d'Oran peut s'expliquer par sa situation géographique. Les obstacles naturels à Oran (la mer Méditerranée au nord, le massif de Murdjadjo à l'est et la grande Sebkhah au sud-ouest) ainsi que la forte croissance démographique ont fait que le tissu urbain d'Oran s'est densifié au fil du temps et que les quartiers jadis appelés quartiers périphériques se sont rattachés à la ville en consommant les réserves foncières libres pour former un tout compact. La construction des espaces libres qui se font de plus en plus rares dans la ville contrecarrent la maintenance de la nature en ville, ce qui produit plus d'espaces bétonnés et asphaltés et plus de sol artificialisés et imperméables. Ceci n'est pas sans conséquences sur la qualité de vie des habitants ni sur la qualité de l'environnement notamment celle qui concerne l'air ambiant au sein de l'espace urbain.

Ces effets négatifs des tissus urbains compacts s'amplifient avec la présence d'un fort flux de véhicules qui sont les principaux émetteurs des gaz à effet de serre. Comme le montre le Tableau 5, les zones les plus compactes sont associées à un fort flux de véhicules. En effet, plus la densité de construction augmente dans un espace restreint, plus la densité de population augmente. L'utilisation de véhicules augmente avec l'accroissement du nombre de population, ce qui non seulement change le cadre de vie de manière significative, mais aussi participe à la dégradation de la qualité de l'air qui affecte directement la santé des habitants. C'est pour cette raison que, via ce travail, nous avons tenté de traiter l'un des domaines concernés par le taux élevé de morbidité respiratoires dans la ville et de mettre le point sur l'environnement urbain des oranais dont 8% souffrent de problèmes respiratoires aigus et 10 cas de crises sévères de troubles respiratoires sont accueillis quotidiennement dans le service de pneumologie.

Cet impact se pose avec d'autant plus d'acuité dans les espaces urbains occupés par les constructions de grande hauteur que la ville d'Oran en connaît une vraie poussée depuis quelques années. Il est important de souligner que cette densification du tissu urbain existant qu'elle soit verticale ou horizontale n'empêche pas l'extension urbaine qui s'effectue dans la périphérie même lointaine de la ville et qui se fait au détriment des espaces naturels, agricoles ou encore forestiers. Ce qui a été évoqué dans cette conclusion vient de mettre en lumière l'importance d'une densification "douce" et une compacité maîtrisée qui peut trouver un juste milieu et tirer profit des atouts de la forme urbaine compacte qui tend à lutter contre

l'étalement urbain consommateur d'espaces, de ressources et d'énergies sans pour autant être néfaste sur la santé de l'habitant et sur son cadre de vie.

Cette étude montre la possibilité d'utiliser des indicateurs de configuration du tissu urbain pour prédire la pollution de l'air dans les zones urbaines et fournit la base pour prendre en compte les sources de pollution dans l'aménagement du territoire et à utiliser les espaces verts comme filtre de polluants atmosphériques. La répartition spatiale entre les espaces bâtis et les espaces verts est très importante. Il est recommandé aux planificateurs de tenir compte de ces constats lors de l'élaboration des plans d'aménagement du territoire et des plans d'espaces verts.

La présente thèse a examiné la problématique de la compacité urbaine et son impact sur la qualité de l'air et la santé respiratoire des habitants. A travers une série d'analyses approfondies, nous avons pu explorer les relations complexes entre la forme urbaine, la pollution de l'air et la santé, et les résultats de notre recherche remettent en question le consensus commun qui considère la compacité urbaine comme la solution idéale pour créer des villes durables. Nos hypothèses initiales ont été confirmées par les données et les analyses effectuées au cours de cette étude. L'hypothèse N°1 s'est avérée juste, mettant en évidence que la forme urbaine a un impact significatif sur la qualité de l'air, ce qui constitue un facteur de risque pour la santé des habitants. Les zones urbaines plus compactes sont associées à des niveaux plus élevés de pollution de l'air. L'hypothèse N°2 a également été confirmée, montrant que les zones les plus compactes de la ville d'Oran présentent effectivement une concentration plus élevée de polluants atmosphériques, ce qui a un effet préjudiciable sur la santé respiratoire des résidents. En d'autres termes, une forte compacité urbaine peut entraîner des conséquences négatives pour la qualité de l'air et, par extension, la santé des habitants.

Ces résultats suggèrent que la planification urbaine doit être plus nuancée et ne pas se contenter de privilégier la compacité à tout prix dans le but de réduire la consommation d'espace et de promouvoir la mobilité durable. Il est essentiel de prendre en compte les effets sur la qualité de l'air et la santé des citoyens. Des stratégies d'urbanisme durable devraient être élaborées en intégrant des mesures pour minimiser la pollution atmosphérique dans les zones urbaines compactes.

En conclusion, cette thèse met en lumière l'importance de considérer la qualité de l'air comme un élément crucial dans la planification urbaine. Elle souligne que la recherche d'une ville durable nécessite une approche équilibrée qui tienne compte des besoins en matière de mobilité, d'accès aux services, de qualité de l'air et de santé des habitants. La compacité urbaine, si elle n'est pas gérée de manière adéquate, peut présenter des défis pour la qualité de l'air et la santé respiratoire des résidents, et cela devrait être pris en compte dans les politiques d'urbanisme à l'avenir.

Dans une étape ultérieure de recherche, ce travail pourrait être approfondi en adoptant une échelle plus réduite (un quartier par exemple), et non pas à une analyse au niveau de la ville comme ce fut le cas pour notre étude. Aussi, même si les données satellitaires de couverture terrestre (résolution Sentinel-2 entre 10 et 60m) que nous avons utilisées pourraient capturer l'ensemble du sol et les caractéristiques dominantes, elles pourraient toutefois manquer des détails à un niveau qui ne serait pas assez précis pour distinguer les objets, ou manquer de petites parcelles majoritairement aménagées entourées par les caractéristiques dominantes comme des arbres de rue. Par conséquent, les études futures pourraient utiliser des images à très haute résolution pour adopter une échelle plus précise. D'autres études pourraient aborder l'analyse tridimensionnelle de la forme urbaine en tenant compte de la troisième dimension qui est la hauteur mais cela nécessiterait la disponibilité des données en nuages de points 3D (Lidar). D'autres études pourraient également aborder cette analyse en tenant compte d'autres polluants atmosphériques comme les matières particulaires ($PM_{2.5}$). Les futures recherches pourraient aborder d'autres cas d'étude pour tenir compte de la différenciation des contextes comme les conditions climatiques et la localisation géographique.

BIBLIOGRAPHIE

3. Références bibliographiques

- a'urba. (2012). Ville intense, ville intime L'armature d'une métropole attractive Retrieved 27/05/2023, from <https://www.aurba.org/wp-content/uploads/2013/04/Villeintensevilleintime.pdf>
- Abdullahi, S., & Pradhan, B. (2017). Urban compactness assessment *Spatial Modeling and Assessment of Urban Form* (pp. 93-137): Springer.
- Abulude, F., Moez, B., A, A., & A, O. (2017). *A Review on Top-Down and Bottom-Up Approaches for Air Pollution Studies*.
- Aguejdad, R., & Hubert-Moy, L. (2016). Suivi de l'artificialisation du territoire en milieu urbain par télédétection et à l'aide de métriques paysagères. Application à une agglomération de taille moyenne, Rennes Métropole
- Monitoring urban growth using remote sensing and landscape metrics. Application to a medium-sized city, Rennes metropolitan area (France). *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*. doi: 10.4000/cybergeo.27465
- Ahlfeldt, G. M., Pietrostefani, E., Schumann, A., & Matsumoto, T. (2018). *Demystifying compact urban growth: Evidence from 300 studies from across the world*.
- airbreizh. (2018). LES PARTICULES EN SUSPENSION
PM10 et PM2,5, from <https://www.airbreizh.asso.fr/les-particules-en-suspension/>
- Anabtawi, S. (2023). Towards a Better Understanding of Compact Cities. *Journal of Planning Literature*, 08854122231158768. doi: 10.1177/08854122231158768
- Andersen, Z. J., Kristiansen, L. C., Andersen, K. K., Olsen, T. S., Hvidberg, M., Jensen, S. S., . . . Tjønneland, A. (2012). Stroke and long-term exposure to outdoor air pollution from nitrogen dioxide: a cohort study. *Stroke*, 43(2), 320-325.
- AOSR, E. (2017). problèmes respiratoires : 8% de la population oranaise concernés, *radioalgerie*. Retrieved from <https://radioalgerie.dz/news/fr/node/104337>
- aquaportail, D. (2011). définition AIR AMBIANT Retrieved 07/07/2023, from <https://www.aquaportail.com/definition-9931-air-ambient.html>
- Atkinson, R. W., Butland, B. K., Anderson, H. R., & Maynard, R. L. (2018). Long-term concentrations of nitrogen dioxide and mortality: a meta-analysis of cohort studies. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 29(4), 460.
- Bank, W. (2010). *The changing wealth of nations: measuring sustainable development in the new millennium*: The World Bank.
- Barbara, L. F., Meuris, C., & Léonard, F. (2012). DENSITÉS ET DENSIFICATION DES TISSUS URBANISÉS WALLONS: ÉLABORATION D'UN LEXIQUE COMMUN.
- Barton, H. (2005). A health map for urban planners. *Built Environment*, 31(4), 339-355.
- Barton, H. (2009). Land use planning and health and well-being. *Land Use Policy*, 26, S115-S123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.008>
- Barton, H. (2016). *City of well-being: A radical guide to planning*: Routledge.
- Barton, H., Grant, M., & Guise, R. (2006). *Shaping neighbourhoods: for local health and global sustainability*: Routledge.
- Barton, H., Mitcham, C., & Tsourou, C. (2003). *Healthy urban planning in practice: experience of European cities: report of the WHO City Action Group on Healthy Urban Planning*: World Health Organization. Regional Office for Europe.

- Barton, H., Thompson, S., Burgess, S., & Grant, M. (2015). *The Routledge handbook of planning for health and well-being: Shaping a sustainable and healthy future*: Routledge.
- Barton, H., & Tsourou, C. (2004a). *Urbanisme et santé*.
- Barton, H., & Tsourou, C. (2004b). Urbanisme et santé: un guide de l'OMS pour un urbanisme centré sur les habitants.
- Barton, H., & Tsourou, C. (2004c). *Urbanisme et santé: un guide de l'OMS pour un urbanisme centré sur les habitants*.
- Baskent, E. Z., & Jordan, G. A. (1995). Characterizing spatial structure of forest landscapes. *Canadian Journal of Forest Research*, 25(11), 1830-1849. doi: 10.1139/x95-198
- Belli, B., Belce, N., & Gumus, I. (2014). *Characteristics of Compact Cities*.
- Beltrando, G. (2011). Chapitre 1 - Énergie solaire et température dans le système Terre-Océan-Atmosphère *Les climats* (pp. 7-32). Paris: Armand Colin.
- Benammar, A., & sadika, S. (2001). *Analyse radiale du tissu urbain d'Oran*.
- Bendjelid, A. (1998). La fragmentation de l'espace urbain d'Oran (Algérie). Mécanismes, acteurs et aménagement urbain. *Insaniyat/إنسانيات. Revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociales*(5), 61-84.
- Bendraoua, F. (2005). *Dynamique urbaine, instruments d'urbanisme et réalité terrain du groupement urbain d'Oran (Algérie) : création d'un SIG et imagerie spatiale*.
- Bernard, A. (1939). *ORAN: ÉTUDE DE GÉOGRAPHIE ET D'HISTOIRE URBAINES*. Paper presented at the Annales de géographie.
- Bersi, M. (2018). Cours de Télédétection , Principes et Applications en Géosciences | Première Partie.
- Bharatkar, P. S., & Patel, R. (2013). *Approach to Accuracy Assessment tor RS Image Classification Techniques*.
- Bian, Z.-x., Wang, S., Wang, Q.-b., Yu, M., & Qian, F.-k. (2018). Effects of urban sprawl on arthropod communities in peri-urban farmed landscape in Shenbei New District, Shenyang, Liaoning Province, China. *Scientific Reports*, 8(1), 101. doi: 10.1038/s41598-017-18474-9
- Blandin, P. (2009). Le concept de mosaïque en écologie : plus qu'une métaphore ? *Bulletin d'histoire et d'épistémologie des sciences de la vie, Volume 16*(1), 95-103. doi: 10.3917/bhesv.161.0095
- Borck, R., & Schrauth, P. (2021). Population density and urban air quality. *Regional Science and Urban Economics*, 86, 103596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2020.103596>
- Boudalia, C., Kasmi, A., & Alili, A. (2023). Is a dense city a healthy city? A preliminary study on the interplay between urban density and air quality in Oran, Algeria
- ¿Es una ciudad densa una ciudad saludable? Estudio preliminar sobre la interacción entre la densidad urbana y la calidad del aire en Orán (Argelia)
- Une ville dense est-elle une ville saine ? Une étude préliminaire sur l'interaction entre la densité urbaine et la qualité de l'air à Oran, en Algérie. *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*. doi: 10.4000/cybergeo.40585
- Bourdrel, T., Bind, M.-A., Béjot, Y., Morel, O., & Argacha, J.-F. (2017). Cardiovascular effects of air pollution. *Archives of cardiovascular diseases*, 110(11), 634-642.
- Bracht, N., & Tsouros, A. (1990). Principles and strategies of effective community participation. *Health Promotion International*, 5(3), 199-208.

- BRITTEN, R. H., GRAY, G., CHAPIN, F. S., IVES, J. E., CONNOLLY, J. I., LLOYD, M. G., . . . RUHLAND, G. C. Basic Principles of Healthful Housing.
- Burton, E. (2000). The Compact City: Just or Just Compact? A Preliminary Analysis. *Urban Studies*, 37(11), 1969-2006.
- Burton, E., Jenks, M., & Williams, K. (2003). *The compact city: a sustainable urban form?* : Routledge.
- Capon, A. G., & Blakely, E. J. (2008). Checklist for healthy and sustainable communities. *Journal of green building*, 3(2), 41-45.
- Cárdenas Rodríguez, M., Dupont-Courtade, L., & Oueslati, W. (2016). Air pollution and urban structure linkages: Evidence from European cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1-9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.190>
- Carozzi, F., & Roth, S. (2023). Dirty density: Air quality and the density of American cities. *Journal of Environmental Economics and Management*, 118, 102767. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102767>
- Cerdà, I. (1860). *Reforma y ensanche de Barcelona: plan economico*: Narciso Ramirez.
- Cervero, R., & Kockelman, K. (1997). Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3), 199-219. doi: [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(97\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(97)00009-6)
- Chang, D. L., Sabatini-Marques, J., Da Costa, E. M., Selig, P. M., & Yigitcanlar, T. (2018). Knowledge-based, smart and sustainable cities: A provocation for a conceptual framework. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 4(1), 5.
- Chen, T.-M., Kuschner, W. G., Gokhale, J., & Shofer, S. (2007). Outdoor air pollution: nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide health effects. *The American journal of the medical sciences*, 333(4), 249-256.
- Chiquetto, J., Silva, M., Ynoue, R., Ribieiro, F., Alvim, D., Rozante, J., . . . Swap, R. (2020). THE IMPACT OF DIFFERENT URBAN LAND USE TYPES ON AIR POLLUTION IN THE MEGACITY OF SÃO PAULO. *Revista Presença Geográfica*, 7, 91. doi: 10.36026/rpgeo.v7i1.5366
- CHIRON, M. (1982). IMPORTANCE DU MONOXYDE DE CARBONE COMME POLLUANT ATMOSPHERIQUE URBAIN. ETUDE DE LA FIXATION DU MONOXYDE DE CARBONE SUR L'HEMOGLOBINE D'UN ECHANTILLON DE POPULATION DE LA VILLE DE LYON. *THESE*.
- Churchman, A. (1999). Disentangling the concept of density. *Journal of Planning Literature*, 13(4), 389-411.
- CNDP. (2015). Base de connaissance from [https://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-grandparis/site/DEBATPUBLIC_GRANDPARIS_ORG/INFORMER/KDB_CARTO/BASE_CONNAISSANCE_POPUPB7C8.HTM#:~:text=COPERT%20\(Computer%20Program%20to%20calculate,de%20polluants%20du%20transport%20routier.](https://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-grandparis/site/DEBATPUBLIC_GRANDPARIS_ORG/INFORMER/KDB_CARTO/BASE_CONNAISSANCE_POPUPB7C8.HTM#:~:text=COPERT%20(Computer%20Program%20to%20calculate,de%20polluants%20du%20transport%20routier.)
code ASCII.
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *The Journal of Open Source Software*, 6, 3172. doi: 10.21105/joss.03172
- Coorey, S., & Lau, S. Y. (1970). Urban compactness and its progress towards sustainability: the Hong Kong scenario. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 84.
- Corburn, J. (2004). Confronting the challenges in reconnecting urban planning and public health. *American journal of public health*, 94(4), 541-546.
- CRASC. (2020). Synthèse du rapport :

Covid19- en Algérie : enseignements

et regards croisés

(premiers éléments de réflexion).

- Crowley, J. M. (1989). *Landscape Ecology*, by R.T.T. Forman & M. Godron. John Wiley & Sons, 605 Third Avenue, New York, NY 10158, USA: xix + 620 pp., figs & tables, 24 × 17 × 3.5 cm, hardbound, US \$38.95, 1986. *Environmental Conservation*, 16(1), 90-90. doi: 10.1017/S0376892900008766
- Dagorne, A., & Fenet, B. (1995). Oran, Métropole de l'Ouest algérien, d'hier à aujourd'hui. *Cahiers de la Méditerranée*, 51(1), 147-161.
- Dagorne Andrée, F. B. (1995). Oran, Métropole de l'Ouest algérien, d'hier à aujourd'hui. *Cahiers de la Méditerranée*, n°51, 1,1995. *Villes intermédiaires en Méditerranée. Tome 2. pp. 147-161*. doi: <https://doi.org/10.3406/camed.1995.1152>
- Daniels, T. (2001). Smart growth: A new American approach to regional planning. *Planning practice and research*, 16(3-4), 271-279.
- Dantzig, G. B., Dantzig, G. B., & Saaty, T. L. (1973). *Compact City: A Plan for a Liveable Urban Environment*: W. H. Freeman.
- de Göteborg, C. (1999). Étude de l'impact sur la santé. *Principaux concepts et méthode proposée*.
- de la Santé, O. M. (1946). La définition de la santé de l'OMS. *Organisation Mondiale de la Santé*.
- Dempsey, N. (2010). Revisiting the Compact City? *Built Environment*, 36, 5-8. doi: 10.2148/benv.36.1.5
- Depayras, S., Kondakova, T., Heipieper, H. J., Feuilleley, M. G., Orange, N., & Duclair-Poc, C. (2018). The hidden face of nitrogen oxides species: from toxic effects to potential cure? *Emerging Pollutants-Some Strategies for the Quality Preservation of Our Environment*: IntechOpen.
- . Dictionnaire du webmastering. Retrieved 12 Janvier 2023, from <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-du-webmastering/1445312-plugin-definition-simple-et-pratique/>
- . Dictionnaire SIG Retrieved 05/07/2023, from <https://support.esri.com/fr-fr/gis-dictionary/vector>
- Diwakar, M. (2021). *App. of GIS and RS in Urban Planning*.
- Duhl, L. J., & Hancock, T. (1988). *Promoting health in the urban context*: WHO Healthy Cities Project Office.
- Dupuis, B. (2009). Le mouvement du New Urbanism et le paysage urbain. La circulation d'une doctrine urbanistique The New Urbanism movement and the urban landscape: the circulation of a town-planning doctrine.
- EEA. (2022). Europe's air quality status 2022.
- el Kharki, O., Mechbouh, J., Ducrot, D., Rouchdi, M., & Mvogo Ngoni, J. (2021). Panorama sur les méthodes de classification des images satellites et techniques d'amélioration de la précision de la classification. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 210, 23-38.
- Elif, S., Topaloglu, H., Sallib, B., & Yay Algan, I. (2018). *Comparison of landscape metrics for three different level land cover/use maps generated from SPOT6/7 images and object based classification approach*. Paper presented at the GEOBIA 2018 - From pixels to ecosystems and global sustainability , Montpellier, France. <https://hal.univ-reunion.fr/hal-01957417>

- Energie, E. (2010). Smog Retrieved 20/07/2023, from <https://energyeducation.ca/fr/Smog>
- environnement, d. (2018).
- Dioxyde de soufre (SO₂) Retrieved 20/07/2023, from https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dioxyde_de_soufre_so2.php4
- Force, G. B. U. T., & Rogers, R. G. (1999). *Towards an urban renaissance*: Routledge.
- Forman, R. T. T., Foreman, R. T., & Godron, M. (1986). *Landscape Ecology*: Wiley.
- Fritsch, M., & Wyrwich, M. (2021). Is innovation (increasingly) concentrated in large cities? An international comparison. *Research Policy*, 50(6), 104237. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2021.104237>
- Futura. (2016). Pollution photochimique Retrieved 22/07/2023, from <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-pollution-photochimique-6715/>
- García-Dorado, A., & Gallego, A. (2004). Maximum likelihood vs. minimum distance: searching for hills in the plain. *Genetics*, 168(2), 1085-1086. doi: 10.1534/genetics.104.027052
- Garg, A. K. COMPACT CITIES (The way of the future).
- Gascon, F., Cadau, E., Colin, O., Hoersch, B., Isola, C., Fernández, B., & Martimort, P. (2014). *Copernicus Sentinel-2 Mission: Products, Algorithms and Cal/Val* (Vol. 9218).
- Gatti, A., & Bertolini, A. (2018). Sentinel-2 products specification document. *Thales Alenia Sp*, 1-487.
- Ge, Y., Bai, H., Wang, J., & Cao, F. (2012). Assessing the quality of training data in the supervised classification of remotely sensed imagery: a correlation analysis. *Journal of Spatial Science*, 57. doi: 10.1080/14498596.2012.733616
- Gendron, C., & Revéret, J.-P. (2000). Le développement durable. *Économies et sociétés*, 37(91), 111-124.
- Gleeson, B. (2012). Critical Commentary. The Urban Age. *Urban Studies*, 49, 931-943. doi: 10.1177/0042098011435846
- Godin, J. B. A. (1874). *La richesse au service du peuple: Le Familistère de Guise* (Vol. 59): Librairie de la bibliothèque démocratique.
- Gonçalves, L., Fonte, C., Júlio, E., & Caetano, M. (2009). Evaluation of Remote Sensing Image Classifiers with Uncertainty Measures. doi: 10.1201/b10305-19
- Gordon, P., & Richardson, H. W. (1997). Are Compact Cities a Desirable Planning Goal. *Journal of The American Planning Association*, 63, 95-106.
- Gowers, A., Miller, B., & Stedman, J. (2014). *Estimating local mortality burdens associated with particulate air pollution*: Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, Public Health England.
- Grippa, T., Lennert, M., Beaumont, B., Vanhuyse, S., Stéphenne, N., & Wolff, E. (2016). *An open-source semi-automated processing chain for urban obia classification*.
- Grosjean, B. (2012). La «ville diffuse» à l'épreuve de l'Histoire. Urbanisme et urbanisation dans le Brabant belge. *Les Annales de la Recherche Urbaine*(107), 58-71.
- Guarnieri, M., & Balmes, J. R. (2014). Outdoor air pollution and asthma. *The Lancet*, 383(9928), 1581-1592.
- Guerroudj, T. (2004). Les enjeux de l'organisation de l'agglomération oranaise. *Insaniyat/إنسانيات. Revue algérienne d'anthropologie et de sciences sociales*(23-24), 45-61.

- Gustafson, E. J. (1998). Quantifying Landscape Spatial Pattern: What Is the State of the Art? *Ecosystems*, 1(2), 143-156. doi: 10.1007/s100219900011
- Gustafson, E. J., & Parker, G. R. (1992). Relationships between landcover proportion and indices of landscape spatial pattern. *Landscape Ecology*, 7(2), 101-110. doi: 10.1007/bf02418941
- Hábitat, O. (2020). Onu Habitat: Obtenido de Carta Mundial por el Derecho a la Ciudad-ONU HABITAT: [http://www](http://www....)
- Halbwachs, M., & Sion, J. (1923). Notices (Book Review). *Année Sociologique*, 1, 935.
- Hancock, T., & Perkins, F. (1985). The mandala of health. *Health Educ*, 24(1), 8-10.
- Haque, S. M. (2014). MEASURING COMPACTNESS OF A CITY WITH A FUNCTIONAL INDEX.
- Harcourt, M. L., & JERSEY, C. L. IMPERIAL HEALTH CONFERENCE. THE Imperial Health Conference organized by the Victoria.
- Hargis, C. D., Bissonette, J. A., & David, J. L. (1998). The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. *Landscape Ecology*, 13(3), 167-186. doi: 10.1023/a:1007965018633
- He, H., Dezonias, B., & Mladenoff, D. (2000). An Aggregation Index (AI) to Quantify Spatial Patterns of Landscapes. *Landscape Ecology*, 15, 591-601. doi: 10.1023/a:1008102521322
- Heat Map. Retrieved 27/05/2023, from <https://www.toucantoco.com/fr/glossary/heatmap.html#:~:text=Une%20%22%20Heat%20Map%20%22%2C%20ou,sur%20l'utilisation%20des%20couleurs>
- Herold, M., Scepan, J., & Clarke, K. C. (2002). The Use of Remote Sensing and Landscape Metrics to Describe Structures and Changes in Urban Land Uses. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 34(8), 1443-1458. doi: 10.1068/a3496
- Herzog, F., Lausch, A., MÜLLER, E., Thulke, H.-H., Steinhardt, U. T. A., & Lehmann, S. (2001). Landscape Metrics for Assessment of Landscape Destruction and Rehabilitation. *Environmental Management*, 27, 91-107. doi: 10.1007/s002670010136
- Hippodamos. (07/02/2023) Retrieved 03/04/2023, from <https://fr.wikipedia.org/wiki/Hippodamos>
- Hitchcock, J. (1994). *A Primer on the Use of Density in Land Use Planning*: Program in Planning, University of Toronto.
- Ho, B. Q., & Clappier, A. (2011). Road traffic emission inventory for air quality modelling and to evaluate the abatement strategies: A case of Ho Chi Minh City, Vietnam. *Atmospheric environment*, 45(21), 3584-3593.
- Hoffmann, B. (2019). Air Pollution in Cities: Urban and Transport Planning Determinants and Health in Cities. In M. Nieuwenhuijsen & H. Khreis (Eds.), *Integrating Human Health into Urban and Transport Planning: A Framework* (pp. 425-441). Cham: Springer International Publishing.
- Holgate, S. (2022). Air pollution is a public health emergency. *BMJ*, 378, o1664. doi: 10.1136/bmj.o1664
- Howard, E. (1946). *Garden cities of tomorrow*: Faber London, UK.
- Huang, K., Li, X., Liu, X., & Seto, K. C. (2019). Projecting global urban land expansion and heat island intensification through 2050. *Environmental Research Letters*, 14(11), 114037.
- INSEE. (2021). Particules PM10 et PM2,5, 07/07/2023, from <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c2196#:~:text=Les%20particules%20e>

- Kochtitzky, C. S., Frumkin, H., Rodriguez, R., Dannenberg, A. L., Rayman, J., Rose, K., . . . Kanter, T. (2006). Urban planning and public health at CDC. *MMWR supplements*, 55(2), 34-38.
- Koziatek, O., & Dragičević, S. (2017). A local and regional spatial index for measuring three-dimensional urban compactness growth. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46, 239980831770398. doi: 10.1177/2399808317703983
- Kupfer, J. (2012). Landscape ecology and biogeography: Rethinking landscape metrics in a post-FRAGSTATS landscape. *Progress in Physical Geography*, 36, 400-420. doi: 10.1177/0309133312439594
- LA SANTÉ, C. P. A., FAVORABLES, D., COMMUNAUTAIRE, R., AA, D. I., & INTERNATIONALE, A. P. U. A. (1986). Charte d'Ottawa pour la promotion de la santé.
- Lakjâa, A. (2008). *Oran, une ville algérienne reconquise ; Un centre historique en mutation*.
- Lambert, J. (2010). *Mise en place d'une analyse paysagère à l'échelle du territoire préalable a la mise en révision de la charte du Parc Naturel Régional de Lorraine*. UHP - Université Henri Poincaré
- INPL - Institut National Polytechnique de Lorraine. Retrieved from <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01884454>
- LAROUSSE. (Ed.).
- Le Gall, A. R., Le Gall, J., Potelon, J.-L., & Cuzin, Y. (2015). Guide " Agir pour un urbanisme favorable à la santé, concepts et outils".
- Le Néchet, F. (2010). *Approche multiscalaire des liens entre mobilité quotidienne, morphologie et soutenabilité des métropoles européennes: cas de Paris et de la région Rhin-Ruhr*. Université Paris-Est.
- Le Petit Robert, D. d. l. (1996). langue française. *Paris: Le Pober. –2004*.
- Lefebvre, M. (2013). Densité et formes urbaines: vers une meilleure qualité de vie. *Les Cahiers*.
- Lespès, R. (1938). Oran: étude de géographie et d'histoire urbaines.
- . Lexique de prévention et santé Salutogenèse. Retrieved 16/05/2023, from <https://www.infodrog.ch/fr/ressources/lexique-de-la-prevention/salutogenese.html#:~:text=En%20pr%C3%A9vention%20et%20en%20promotion,pr%C3%A9venir%20les%20maladies%20ou%20de>
- Li, L. W., & Yu, Y. H. (2016). Planning low carbon communities: Why is a self-sustaining energy management system indispensable? *Energy sources, part B: Economics, planning, and policy*, 11(4), 371-376.
- Li, Y., Richardson, G. D., & Thornton, D. B. (1997). Corporate disclosure of environmental liability information: Theory and evidence. *Contemporary accounting research*, 14(3), 435-474.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2011). *REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION, 6TH EDITION*: Wiley India Pvt. Limited.
- Lisiak, M., Borowiak, K., Kanclerz, J., Adamska, A., & SzymbDczyk, J. (2018). Effect of linear investment on nature and landscape@ a case study. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 26, 158-165.
- Long, N., & Leveiller, T. (2016). Comment les politiques d'urbanisation se traduisent-elles dans le paysage urbain : une approche par les métriques spatiales. *Vertigo : La Revue Électronique en Sciences de l'Environnement*, 16(2). doi: 10.4000/vertigo.17666

- Lowe, M., Arundel, J., Hooper, P., Rozek, J., Higgs, C., Roberts, R., & Giles-Corti, B. (2020). Liveability aspirations and realities: Implementation of urban policies designed to create healthy cities in Australia. *Social Science & Medicine*, 245, 112713. doi: <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2019.112713>
- M. Chalansonnet, D. J., B. La Rocca, F. Marc, G. Martins-Caetano, S. Robert. (2020). Oxydes d'azote Fiche toxicologique
- Ma, M., Hietala, R., Kuussaari, M., & Helenius, J. (2013). Impacts of edge density of field patches on plant species richness and community turnover among margin habitats in agricultural landscapes. *Ecological Indicators*, 31, 25-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.07.012>
- Massot, M.-H., & Orfeuill, J.-P. (2005). La mobilité au quotidien, entre choix individuel et production sociale. *Cahiers internationaux de sociologie*, 118(1), 81-100. doi: 10.3917/cis.118.0081
- McGarigal, K., & Marks, B. J. (1995). *FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*.
- McGarigal, K., & Marks, B. J. (1995). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.2737/PNW-GTR-351>
- meersens. (2015). L'ozone (O3) : sources et impacts sur la santé Retrieved 20/07/2023, from <https://meersens.com/ozone-o3-sources-et-impacts-sur-la-sante-et-lenvironnement/>
- Meersens. (2021). Dioxyde d'azote (NO2) : sources de pollution et impacts sur la santé Retrieved 20/07/2023, from <https://meersens.com/le-dioxyde-dazote-no2-sources-et-impacts-sur-la-sante/>
- . Modèle numérique de surface (MNS). 24 Mars 2023, from <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/853eef5e-239a-447f-9352-2c8655cb7de1>
- Mouaziz-Bouchentouf, N. (2017). Les tours à Oran (Algérie). La quête de la hauteur et ses conséquences sur la ville. *Géocarrefour*, 91(91/2).
- MOUSTAQIL, E. O. Urbanisme et santé.
- Mr, S. V. S. P., Dr, T. S. s., & Dr. Iyyanki, V. M. K. (2015). Techniques in Image Classification; A Survey. *Global Journals of Research in Engineering*, 15(F6), 17-32.
- Mueller, N., Rojas-Rueda, D., Basagaña, X., Cirach, M., Cole-Hunter, T., Dadvand, P., . . . Martinez, D. (2017). Urban and transport planning related exposures and mortality: a health impact assessment for cities. *Environmental health perspectives*, 125(1), 89-96.
- Nerrière, A. (2008). Etude de la relation entre la dynamique paysagère et la diversité végétale prairiale (pp. 27 p.): ENSAIA. Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Vandoeuvre-lès-Nancy, FRA.
- Nessi, H. (2010). *Formes urbaines et consommation d'énergie dans les transports*.
- Newman, M. (1999). The compact city fallacy (278 ed.). *Texas, USA: A & M university*.
- Newman, P. G., & Kenworthy, J. R. (1989). *Cities and automobile dependence: An international sourcebook*.
- OCDE. (2012). *Compact City Policies*.
- OECD. (2012). Compact City Policies: A Comparative Assessment: OECD Publishing Paris.
- OECD. (2014a). *Compact city policies: Korea: Towards sustainable and inclusive growth*: OECD Publishing.
- OECD. (2014b). *The Cost of Air Pollution*.
- Olago, D. O. (1996). Book reviews : Forman, R.T.T. and Godron, M. 1986: Landscape ecology. Chichester: Wiley: Gierlowski-Kordesch, E. and Kelts, K., editors, 1994:

- Global geological record of lake basins. Volume I. Cambridge: Cambridge University Press. xxxiv + 432 pp. £80.00 cloth. ISBN: 0 521 41452 0. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 20(3), 363-364. doi: 10.1177/030913339602000310
- Omar, D., Omar, K. A., Othman, S., & Yusoff, Z. M. (2016). Walkability design for urban public housing park. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 1(3), 311-317.
- OMS. (2016). NOx air pollution.
- OMS. (2017). Shanghai declaration on promoting health in the 2030 Agenda for Sustainable Development. *Health Promotion International*, 32(1), 7-8. doi: 10.1093/heapro/daw103
- OMS. (2018). Organisation mondiale de la Santé- Profils des pays pour les maladies non transmissibles (MNT): bureau de l'OMS, Alger.
- OMS, I. m. d. I. s., de la population et de la réforme hospitalière (2019). Urban health Outil d'évaluation et d'intervention en matière de santé en milieu urbain (pp. 29). Algérie: Institut National de Santé Publique.
- ONU. (2015). Rapport mondial des Nations Unies sur la population: EDP Sciences.
- Orfeuill, J.-P., & Soleyret, D. (2002). Quelles interactions entre les marchés de la mobilité à courte et à longue distance ? What are the interactions between the short and long-distance travel markets? *Recherche - Transports - Sécurité*, 76, 208-221. doi: 10.1016/S0761-8980(02)00013-4
- Organisation mondiale de la Santé. Bureau régional de, I. E. (1998). *SANTÉ21 : introduction à la politique-cadre de la Santé pour tous pour la Région européenne de l'OMS*. Copenhague: Organisation mondiale de la Santé. Bureau régional de l'Europe.
- Organisation mondiale de la Santé. Bureau régional de, I. E. (2018). *Charte de Belfast pour les Villes-santé : visant la mise en application du Consensus de Copenhague entre les maires, « Une meilleure santé et plus de bonheur dans les villes, pour toutes et tous » : Réseau européen des Villes-santé de l'OMS : Conférence internationale des Villes-santé: Belfast (Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord), du 1 au 4 octobre 2018*. Copenhague: Organisation mondiale de la Santé. Bureau régional de l'Europe Retrieved from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345753>.
- Organization, W. H. (1965). *Environmental health aspects of metropolitan planning and development: report of a WHO expert committee [meeting held in Geneva from 23 to 29 June 1964]*: World Health Organization.
- Organization, W. H. (1998). Déclaration d'Athènes sur les Villes-santé *Déclaration d'Athènes sur les Villes-santé* (pp. 6-6).
- Organization, W. H. (2006). *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*: World Health Organization.
- Organization, W. H. (2021). *Air quality guidelines*: World Health Organization. Regional Office for Europe.
- Organization, W. W. H. (2019). Sustainable cities Health at the heart of urban development (pp. 2–3).
- ORS. (2017). Bilan de l'observatoire régional de la santé d'Oran.
- Ortiz-Burgos, S. (2016). Shannon-Weaver Diversity Index. In M. J. Kennish (Ed.), *Encyclopedia of Estuaries* (pp. 572-573). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Ouellet, M. (2006). Le smart growth et le nouvel urbanisme: Synthèse de la littérature récente et regard sur la situation canadienne. *Cahiers de géographie du Québec*, 50, 175. doi: 10.7202/014083ar
- Oulebsir. (2020).

- Mémoire : il était une fois la peste à Oran, from Algerieinfos.com
- PDAU. (2000). Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme d'Oran.
- Perdue, W. C., Stone, L. A., & Gostin, L. O. (2003). The built environment and its relationship to the public's health: the legal framework. *American journal of public health*, 93(9), 1390-1394.
- Pouri, S., Momeni, S., & Rahimi, L. (2020). Assessing the Interaction between Urban Air Pollution and Land Use on the Sustainability of Tabriz city.
- Pradhan, B. (2017). *Spatial Modeling and Assessment of Urban Form*: Springer.
- Puissant, A., & Weber, C. (2003). Les images à très haute résolution, une source d'information géographique en milieu urbain?État des lieux et perspectives. *L'Espace géographique*, 32(4), 345-356. doi: 10.3917/eg.324.0345
- QGIS, D. T. (2022). QGIS Geographic Information System (Version 3.28.2) [QGIS_software]: QGIS Association. Retrieved from <https://www.qgis.org/en/site/>
- Rahal, F., Hadjou, Z., Blond, N., & Aguejda, R. (2018). Croissance urbaine, mobilité et émissions de polluants atmosphériques dans la région d'Oran, Algérie. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Rashid, M. (2022). On spatial mechanisms of social equity: Exploring the associations between street networks, urban compactness, and social equity. *Urban Science*, 6(3), 52.
- Rezaei, N., & Millard-Ball, A. (2023). Urban form and its impacts on air pollution and access to green space: A global analysis of 462 cities. *PLoS One*, 18(1), e0278265. doi: 10.1371/journal.pone.0278265
- Rezk-kallah, A., Appert, M., Aiche, M., & Chachour, M. (2021). La verticalisation du tissu urbain d'Oran (Algérie): le paysage à l'épreuve des tours. *Projets de paysage. Revue scientifique sur la conception et l'aménagement de l'espace*(24).
- Richardson, B. W. (1876). *Hygeia: a city of health*: Macmillan.
- Roberts, F. S. (2019). Measurement of Biodiversity: Richness and Evenness. In H. G. Kaper & F. S. Roberts (Eds.), *Mathematics of Planet Earth: Protecting Our Planet, Learning from the Past, Safeguarding for the Future* (pp. 203-224). Cham: Springer International Publishing.
- Rodríguez-Rodríguez, M., Moral Martos, F., & Benavente, J. (2007). Hydro-morphological characteristics and hydrogeological functioning of a wetland system: A case study in southern Spain. *Environmental Geology*, 52, 1375-1386. doi: 10.1007/s00254-006-0580-y
- Rousseaux, F. (2009). Une méthode d'analyse pour mesurer l'impact des documents d'urbanisme sur la maîtrise de l'étalement urbain: l'exemple de La Rochelle, France. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 9(2).
- Sallis, J. F., Bull, F. C., Burdett, R., Frank, L. D., Griffiths, P., Giles-Corti, B., & Stevenson, M. (2016). Use of science to guide city planning policy and practice: How to achieve healthy and sustainable future cities. *The Lancet*, 388, 2936 - 2947. doi: [s://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)30068-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)30068-X)
- Santos, T., A.M.Rodrigues, & Tenedório, J. (2013). *Characterizing urban volumetry using LiDAR data* (Vol. XL-4/W1).
- Schucany, W., Lindsey, H., & Gray, H. (1982). A comparison of minimum distance and maximum likelihood techniques for proportion estimation.
- Selvam, S., Manisha, A., Vidhya, J., & Venkatramanan, S. (2019). Chapter 1 - Fundamentals of GIS. In S. Venkatramanan, M. V. Prasanna & S. Y. Chung (Eds.), *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science* (pp. 3-15): Elsevier.

- Sharma, D., Vergara-Asenjo, G., Cunampio, M., Cunampio, R. B., Cunampio, M. B., & Potvin, C. (2015). Genesis of an indigenous social-ecological landscape in eastern Panama. *Ecology and Society*, 20(4).
- Sharmilaa, G., & Ilango, T. (2022). Vehicular air pollution based on traffic density - A case study. *Materials Today: Proceedings*, 52, 532-536. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.278>
- Shirowzhan, S., Sepasgozar, S., & Trinder, J. (2021). Developing Metrics for Quantifying Buildings' 3D Compactness and Visualizing Point Cloud Data on a Web-Based App and Dashboard. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147, 04020178. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001971
- Shu, Bó, Jia, & Liu-qiang. (2011). *An enhanced landscape aggregation index*.
- Sibué, H. (2022, 04/07/2023). Le nuage de points d'un bâtiment : représentation 3D de la réalité, from <https://www.mydigitalbuildings.com/blog/generer-et-exploiter-un-nuage-de-points-3d-batiment>
- Smith, B., & Wilson, J. B. (1996). A Consumer's Guide to Evenness Indices. *Oikos*, 76(1), 70-82. doi: 10.2307/3545749
- Sodiq, A., Baloch, A. A. B., Khan, S. A., Sezer, N., Mahmoud, S., Jama, M., & Abdelaal, A. (2019). Towards modern sustainable cities: Review of sustainability principles and trends. *Journal of Cleaner Production*, 227, 972-1001. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.106>
- SPAR. (2020). *INTENSITE URBAINE:*
- UN OUTIL POUR UNE*
- CONSOMMATION MAÎTRISÉE*
- DES ESPACES*. Retrieved from https://www.prefectures-regions.gouv.fr/auvergne-rhone-alpes/content/download/86348/555368/file/intensite_urbaine_1ere_phase_DDT63.pdf.
- Sterling, M. (2018). Air Quality: Population Density and Transportation Emissions. *The Equilibrium*, 3. doi: 10.5070/Q23141221
- Streets, D. G., & Waldhoff, S. T. (2000). Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO. *Atmospheric environment*, 34(3), 363-374.
- Strotzka, H. (1957). Man, Health and City Structure: Socie-medical and socio-psychological views en city and land planning. *Journal of the American Institute of Planners*, 23(1), 9-12.
- Taconet, P. (2019). *Tutoriel d'initiation à la télédétection spatiale sur logiciel libre*.
- Tente, O., Oloukoï, J., & Toko, I. (2019, 2019-03-13). *Dynamique spatiale et structure du paysage dans la commune de Zè, Bénin*. Paper presented at the Conférence OSFACO : Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique, Cotonou, Benin.
- TERKI-HASSAÏNE, I. (2004). Oran au XVIIIe. *Insaniyat*, 23, 197.
- Theys, J., & Emelianoff, C. (2001). Les contradictions de la ville durable. *Le Débat*, 113, 122. doi: 10.3917/deba.113.0122
- Thomas, D. (2009). *NOx Oxydes D'azote*: Ed. Techniques Ingénieur.
- Thomas, L., & Cousins, W. (1996). A new compact city form: concepts in practice. *The compact city: A sustainable urban form*, 328-338.
- Thomas, L., & Cousins, W. J. (1996). *A New Compact City Form: Concepts in Practice*.
- Thurston, G. D. (2017). Outdoor air pollution: sources, atmospheric transport, and human health effects.

- Tinthoin, R. (1956). Oran, ville moderne. *L'information géographique*, 20(5), 176-186.
- Tissot, C., Rouan, M., Tixerant, M., & Cuq, F. (2005). Modélisation spatio-temporelle d'activités humaines à fort impact environnemental. *Cybergeo*. doi: 10.4000/cybergeo.3570
- Tizio, S. (2002). *Santé et développement durable: proposition d'une grille de lecture de la contribution des politiques de santé au développement durable*. Laboratoire d'analyse et de techniques économiques (LATEC).
- . TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT (TOD). Retrieved 31/05/2023, from <https://collectivitesviables.org/articles/transit-oriented-development-tod/>
- Tsouros, A. D. (1992). *World Health Organization Healthy Cities Project: a project becomes a movement: review of progress 1987 to 1990*: World Health Organization. Regional Office for Europe.
- Turner, M. G. (2002). *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process* (Vol. 83).
- Ulpiani, G. (2021). On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. *Sci Total Environ*, 751, 141727. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141727
- UN. (2018). *Rapport sur les objectifs de développement durable: 2018*: Nations Unies.
- Unies, N. (2020). *Objectifs de développement durable*. New York: Nations Unies.
- Urban, D. L., O'Neill, R. V., & Shugart, H. H. (1987). Landscape Ecology. *BioScience*, 37(2), 119-127. doi: 10.2307/1310366
- Uuemaa, E., Antrop, M., Roosaare, J., Marja, R., & Mander, U. (2009). Landscape Metrics and Indices: An Overview of Their Use in Landscape Research. *Living Reviews in Landscape Research*, 3. doi: 10.12942/lrlr-2009-1
- Venkatram, A., & Schulte, N. (2018). Chapter Four - The Impact of Highways on Urban Air Quality. In A. Venkatram & N. Schulte (Eds.), *Urban Transportation and Air Pollution* (pp. 77-104): Elsevier.
- Vintrou, E. (2012). *PhD Elodie Vintrou - Cartographie et caractérisation des systèmes agricoles au Mali par télédétection à moyenne résolution spatiale*.
- Wang, Y., Guo, Z., & Han, J. (2021). The relationship between urban heat island and air pollutants and them with influencing factors in the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 129, 107976. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107976>
- Warning, U. N. E. P. D. o. E. (2011). *UNEP year book 2011: emerging issues in our global environment*: UNEP/Earthprint.
- WHO. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and effects on sleep. *International journal of environmental research and public health*, 15(3), 519.
- Wikipedia. (8 septembre 2022). Segmentation d'image Retrieved 11 Janvier 2023, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Segmentation_d%27image#:~:text=Les%20algorithmes%20de%20croissance%20de,un%20utilisateur%20de%20mani%C3%A8re%20interac tive.
- Wikipedia. (11 avril 2021). Variable catégorielle Retrieved 14 Mars 2023, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Variable_cat%C3%A9gorielle#:~:text=En%20statistique%2C%20une%20variable%20qualitative,sur%20chaque%20individu%20une%20quantit%C3%A9.
- wikipedia. (2010). Dépérissement forestier Retrieved 22/07/2023, from https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9p%C3%A9rissement_forestier

- Wikipedia. (2012a, 1 mars 2023). Écart type Retrieved 24 Mars 2023, from https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cart_type
- wikipedia. (2012b). Kouloughlis, from <https://fr.wikipedia.org/wiki/Kouloughlis>
- Wikipedia. (2012c). Troposphère, from <https://fr.wikipedia.org/wiki/Troposph%C3%A8re>
- Wikipedia. (2013, 13 mars 2023). Loi normale Retrieved 23 Mars 2023, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_normale
- wikipedia. (2015). Habitat troglodytique.
- Wikipedia. (2017). Garrigue.
- WIKIPEDIA. (2023). Acidification des sols, from https://fr.wikipedia.org/wiki/Acidification_des_sols
- . Wikitionnaire. (4 décembre 2022) Retrieved 15 Décembre 2022, from <https://fr.wiktionary.org/wiki/raster>
- Wilding, H., Gould, R., Taylor, J., Sabouraud, A., Saraux-Salaün, P., Papathanasopoulou, D., . . . Simos, J. (2017). Healthy Cities in Europe: structured, unique, and thoughtful. *Healthy Cities: The Theory, Policy, and Practice of Value-Based Urban Planning*, 241-292.
- Woodward, W. A., Parr, W. C., Schucany, W. R., & Lindsey, H. (1984). A Comparison of Minimum Distance and Maximum Likelihood Estimation of a Mixture Proportion. *Journal of the American Statistical Association*, 79(387), 590-598. doi: 10.2307/2288405
- World Health, O. (2012). *Health in the green economy : health co-benefits of climate change mitigation - transport sector*. Geneva: World Health Organization.
- Yang, B., Ding, L., & Tian, Y. (2021). The influence of population agglomeration on air pollution: An empirical study based on the mediating effect model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 687, 012014. doi: 10.1088/1755-1315/687/1/012014
- youmatter. (2013). Définition de l'eutrophisation.
- Yuan, M., Huang, Y., Shen, H., & Li, T. (2018). Effects of urban form on haze pollution in China: Spatial regression analysis based on PM2.5 remote sensing data. *Applied Geography*, 98, 215-223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.018>
- Yuan, M., Yan, M., & Shan, Z. (2021). Is Compact Urban Form Good for Air Quality? A Case Study from China Based on Hourly Smartphone Data. *Land*, 10, 504. doi: 10.3390/land10050504
- Yue, T. X., Wang, Y. A., Liu, J. Y., Chen, S. P., Qiu, D. S., Deng, X. Z., . . . Su, B. P. (2005). Surface modelling of human population distribution in China. *Ecological Modelling*, 181(4), 461-478. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.06.042>
- Zhang, N., & Li, H. (2013). Sensitivity and effectiveness and of landscape metric scalograms in determining the characteristic scale of a hierarchically structured landscape. *Landscape Ecology*, 28(2), 343-363. doi: 10.1007/s10980-012-9837-x
- Zhou, Y., & Shepherd, J. M. (2010). Atlanta's urban heat island under extreme heat conditions and potential mitigation strategies. *Natural Hazards*, 52(3), 639-668. doi: 10.1007/s11069-009-9406-z

Table des matières

REMERCIEMENTS	I
DEDICACES	II
RÉSUMÉ	III
Mots-clés.....	III
ملخص.....	IV
ABSTRACT.....	V
Sommaire	VI
Index des sigles et acronymes	VII
Index des figures	IX
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1. Introduction.....	2
2. Problématique	4
3. Hypothèses de recherche	10
4. Objectifs de la recherche	10
5. Méthodologie de travail: plan de travail.....	10
6. Structure de la thèse: plan de rédaction	11
PREMIERE PARTIE : ELABORATION DU CADRE THEORIQUE : CONCEPTS ET OUTILS	13
Introduction de la première partie	14
Chapitre I : Urbanisme et santé : petits pats, grands changements	16
Introduction.....	16
1. Intégration de la santé dans la planification urbaine : une histoire	16
1.1 Planification urbaine et santé : des rayons de lumière depuis l'antiquité ...	16

1.2	Les leçons tirées des grandes épidémies du XIX ^e siècle : remodelage des villes	17
1.3	Le début du XX ^e siècle et la période d'entre-deux-guerres: des logements et des environnements sains	18
1.4	La période d'après-guerre, traiter des espaces ou des patients ?	19
1.5	Fin du XX ^e siècle et début du XXI ^e siècle : revivification du lien historique entre l'urbanisme et la santé publique	21
2.	La santé pour tous pour le XXI ^e siècle : au-delà du domaine de la santé	22
3.	La santé et la ville durable : un lien inéluctable pour atteindre des objectifs de l'Agenda 21	23
4.	Le mouvement Ville-santé de l'OMS : une idée-force	23
4.1	L'approche Ville-santé : critères, principes et dimensions.....	25
5.	Le diagramme des déterminants de santé : un modèle pour les urbanistes	27
6.	La santé et l'urbanisme au cœur des 17 Objectifs du Développement Durable ODD de l'Agenda 2030	29
7.	12 Objectifs Santé pour les urbanistes	31
8.	L'évaluation d'impact sur la santé (EIS) : un outil prospectif.....	32
9.	L'urbanisme favorable à la santé UFS : une démarche prévisionnelle	33
	Conclusion Ou en sommes-nous aujourd'hui ?	36
	Chapitre II: Le concept de la ville compacte depuis son origine jusqu'à aujourd'hui	37
	Introduction.....	37
1.	Densité, intensité, compacité : un cadre lexical de référence	37
1.1	La densité urbaine	37
1.2	L'intensité urbaine	41
1.3	La compacité urbaine :origine et les différentes définitions dans la littérature	42
2.	L'historique de l'évolution du concept de la ville compacte	44

3.	pour une meilleure compréhension du concept de la ville compacte.....	46
3.1	la taille de la ville compacte:	46
3.2	Une structure urbaine polycentrique ou monocentrique dans la ville compacte	46
3.3	la forme des bâtiments dans la ville compacte	46
3.4	les espaces ouverts dans la ville compacte	47
3.5	Les caractéristiques de la compacité urbaine:.....	47
4.	Atteindre la durabilité à travers la compacité urbaine/comment la ville compacte peut contribuer à améliorer la durabilité urbaine	48
4.1	Les politiques urbaines à adopter pour une ville compacte durable	48
4.1.1	L'établissement d'un cadre politique fondé sur le concept de la ville compacte	49
4.1.2	La régénération des centres urbains existants pour limiter l'étalement urbain	49
4.1.3	L'amélioration de la mixité fonctionnelle.....	49
4.1.4	L'intégration des politiques de transport dans l'aménagement urbain....	50
4.1.5	L'amélioration de la gouvernance multi-niveaux pour atteindre les objectifs des villes compactes	50
4.2	La contribution de la ville compacte à la durabilité urbaine	51
4.2.1	Sur le plan environnemental.....	51
4.2.2	Sur le plan social	51
4.2.3	Sur le plan économique.....	52
5.	Contexte urbain actuel: le besoin de la mise en œuvre de l'approche de la compacité urbaine.....	53
5.1	les cinq recommandations pour les stratégies de la ville compacte	53
6.	L'évaluation de la performance de la ville compacte	54
7.	Les différentes méthodes de calcul de la compacité.....	57

7.1	Formule d'évaluation de la compacité urbaine développée par le projet CAT-MED	57
7.2	La télédétection pour l'évaluation de la forme urbaine	59
7.2.1	Le lidar pour l'évaluation tridimensionnelle de la forme urbaine	59
7.2.2	Les outils SIG et les indices paysagers pour l'évaluation de la configuration et la composition spatiale de la forme urbaine compacte	60
7.3	Le choix de la méthode d'évaluation de la compacité urbaine	61
8.	Compacité urbaine , qualité de l'air et santé des habitants: une revue de littérature	64
8.1	Les avantages de la compacité urbaine	64
8.2	Les inconvénients de la compacité urbaine	66
	Conclusion	69
	Chapitre III: Polluants atmosphériques et qualité de l'air en milieu urbain.....	70
	Introduction.....	70
1.	La quasi-totalité de la population urbaine est exposée à la pollution de l'air	71
2.	Les polluants atmosphériques et leurs effets sur l'environnement et la santé humaine	72
2.1	Les particules en suspension $PM_{2.5}$ et PM_{10}	72
2.2	Monoxyde de carbone (CO)	73
2.3	Ozone (O3)	74
2.4	Dioxyde de soufre (SO2).....	75
2.5	Dioxyde d'azote (NO2).....	75
2.6	Oxyde d'azote NOx	76
2.6.1	Les sources d'émissions de NOx	77
2.6.2	Les trois différentes catégories de NOx.....	78
2.6.3	Les effets du NOx sur la santé	78
2.6.3.1	Pénétration, distribution et élimination du NOx dans l'organisme	80

2.6.4	Les effets du NOx sur l'environnement.....	81
2.6.5	Le NOx polluant majeur de l'atmosphère terrestre.....	83
3.	Les lignes directrices mondiales de l'OMS relatives à la qualité de l'air	84
4.	Stratégies et politiques de réduction de la pollution atmosphérique	86
5.	les dispositifs de mesure de la qualité de l'air	88
	Conclusion	89
	Conclusion de la partie I.....	90
	DEUXIEME PARTIE : La ville d'Oran, compacité urbaine et qualité de l'air	91
	Introduction de la deuxième partie.....	92
	Chapitre I:Evolution urbaine d'Oran, héritage multiple et influences épidémiologiques	93
	Introduction.....	93
1.	Oran, métropole de l'ouest Algérien: rétrospective historique du développement urbain d'Oran.....	94
1.1	Période préhistorique.....	94
1.2	Antiquité	95
1.3	Développement urbain d'Oran de 902 à 1831.....	95
1.3.1	Période arabo-berbère	95
1.3.2	Période espagnole (1509-1708).....	96
1.3.3	Période ottomane (1708-1732).....	97
1.3.4	Oran espagnole à nouveau (1732-1792)	97
1.3.5	Oran ottomane à nouveau (1792-1831)	99
1.4	Période de la colonisation française (1831-1962).....	99
1.4.1	Oran, la ville militaire (1831-1848).....	99
1.4.2	Oran, la ville civile (1848-1880)	99
1.4.3	La période de 1880-1900	100
1.4.4	La période de 1900-1939	100

1.4.5	La période de 1939-1962	102
1.5	La période post-indépendance de 1962 jusqu'à aujourd'hui	102
2.	La structuration de la forme urbaine d'Oran au temps des épidémies.....	105
2.1	Oran espagnole et Ottomane (XVIe-XXe siècle) frappée par la peste	105
2.2	Oran durant la période française et l'apparition du choléra	106
2.3	Oran au XXIe siècle: la dissociation entre l'urbanisme et l'hygiène publique 108	
2.4	Oran au temps de la Covid-19	108
3.	Qualité de l'air à Oran.....	109
3.1	Source de pollution atmosphérique à Oran.....	110
3.1.1	Pollution due au trafic routier.....	110
3.1.2	Emission de NOx par habitant	111
4.	La mortalité attribuable à une concentration de polluants atmosphériques dépassant les recommandations de l'OMS	114
	Conclusion	116
	Chapitre II: Les SIG comme outil incontournable à l'analyse de la compacité urbaine	117
	Introduction.....	117
1.	L'utilisation de la géomatique dans les études urbaines	118
2.	La télédétection et les SIG au service de l'observation et l'analyse urbaine....	119
3.	Notions fondamentales sur le processus de télédétection spatiale	120
4.	La classification numérique d'image	133
4.1	La classification supervisée	135
4.2	La classification non supervisée	140
4.3	La classification orientée-objet	141
5.	Analyse quantitative du paysage pour l'évaluation de la compacité urbaine ...	143
5.1	Les indices paysagers	143

5.2	FRAGSTATS, un outil d'une analyse quantitative de la structure du paysage urbain	145
5.3	Les indices paysagers utilisés pour le calcul de la compacité urbaine	147
5.3.1	L'inde de forme (SHAPE-SI).....	147
5.3.2	Indice de forme du paysage (LSI)	147
5.3.3	La densité de lisières (ED)	148
5.3.4	L'indice du cercle circonscrit	149
5.3.5	Densité des patches	149
5.3.6	L'indice du plus grand patch.....	150
5.3.7	Rayon de giration	151
5.3.8	L'indice d'agrégation.....	151
5.3.9	L'indice d'équitabilitéde Simpson	152
5.3.10	L'indice de diversité de Shannon	153
6.	Application sur le cas d'étude (la ville d'Oran).....	157
6.1	L'utilisation du portail de données USGS Earth Explorer	157
6.2	Le choix du satellite Sentinel-2.....	159
	Le choix de l'approche de la classification supervisée	163
6.3	L'ajout du plugin SCP à logiciel QGIS	165
6.4	Les étapes de classification des données satellitaires acquises sur la ville d'Oran en classe du bâti et en classe du non bâti	166
6.4.1	La phase du prétraitement	166
6.4.2	La phase du traitement.....	168
6.4.3	La phase du post-traitement	170
6.5	Matériel utilisé pour le calcul des indices paysagers de l'image Raster sur FRAGSTATS	173
7.	Délimitations des 18 zones d'étude de la ville d'Oran.....	173
	Conclusion	177
		223

Chapitre III:.....	178
Résultat et discussion	178
Introduction.....	178
1. Résultats de l'analyse de la compacité urbaine d'Oran à l'aide de l'utilisation de l'approche des indices paysagers	179
2. Interprétation des résultats	184
Conclusion	193
Conclusion de la deuxième partie	194
Conclusion générale	195
3. Références bibliographiques.....	201
Table des matières.....	215
Mots-clés.....	223

Résumé

Dans la littérature, il existe un consensus commun que la forme urbaine compacte est le modèle idéal pour une ville durable favorable à l'environnement et donc à la santé des habitants. En effet, comparé à l'étalement urbain, la compacité peut améliorer la durabilité grâce à plusieurs facteurs, notamment : la réduction de la consommation des sol et de l'énergie, la réduction des déplacements motorisés en favorisant la proximité et l'accessibilité et donc la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de la mixité fonctionnelle et donc la diversité sociale, l'augmentation de l'activité physique en favorisant les déplacements actifs et donc une moindre dépendance à la voiture. Cependant, la ville compacte fait aussi l'objet de nombreuses controverses scientifiques peut également affecter la santé des habitants par : le surpeuplement, le manque d'espaces verts qui peut réduire les possibilités d'activités favorables à la santé telles que l'activité physique en plein air et les loisirs qui réduisent le stress, une forte exposition au bruit et à la pollution atmosphérique.

L'objectif de cette thèse est d'examiner l'effet de la compacité urbaine sur la qualité de l'air. Nous faisons l'hypothèse que " La forme urbaine affecte la qualité de l'air, ce qui constitue un facteur de risque pour la santé des habitants". Nous testons cette hypothèse sur la ville d'Oran en se basant sur l'approche de l'analyse quantitative de son tissu urbain par l'utilisation des indicateurs paysagers à travers l'application du processus de télédétection et d'utilisation des outils SIG pour convertir les données satellitaires en image raster afin de pouvoir calculer lesdits indicateurs. Cette méthodologie nous permet d'identifier le degré de compacité de chaque zone d'Oran. Par la suite, nous superposons le résultat du calcul sur la donnée de la qualité de l'air qui indique la concentration du polluant de l'oxyde d'azote (NOx).

le résultat de cette étude montre que les zones les plus compactes sont associées à une forte concentration de polluants atmosphériques qui dépasse le seuil des recommandations de l'OMS sur la qualité de l'air ce qui a des effets directs sur la santé respiratoires des habitants.

Mots-clés

Compacité urbaine, qualité de l'air, concentration en NOx, santé des habitants, analyse quantitative, indicateurs paysagers, télédétection.

ملخص

في البحث العلمي، هناك إجماع مشترك على أن الشكل الحضري المدمج هو النموذج المثالي لمدينة مستدامة صديقة للبيئة وبالتالي لصحة السكان. في الواقع، بالمقارنة مع الزحف العمراني، يمكن للاكتناز أن يحسن الاستدامة بفضل عدة عوامل، أبرزها: الحد من استهلاك الأراضي والطاقة، والحد من السفر الآلي من خلال تعزيز القرب وإمكانية الوصول وبالتالي الحد من انبعاثات غازات الدفيئة، وتحسين التنوع الوظيفي وبالتالي التنوع الاجتماعي، وزيادة النشاط البدني من خلال تعزيز السفر النشط وبالتالي تقليل الاعتماد على السيارة. ومع ذلك، فإن المدينة المدمجة هي أيضاً موضوع العديد من الخلافات العلمية التي يمكن أن تؤثر أيضاً على صحة السكان من خلال: الاكتناز، ونقص المساحات الخضراء التي يمكن أن تقلل من إمكانات الأنشطة المعززة للصحة مثل الأنشطة البدنية والترفيهية في الهواء الطلق التي تقلل من التوتر، وارتفاع ضغط الدم. التعرض للضوضاء وتلوث الهواء

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير الاكتناز الحضري على جودة الهواء. نحن نفترض أن "الشكل الحضري يؤثر على جودة الهواء، مما يشكل عامل خطر على صحة السكان". قمنا باختبار هذه الفرضية على مدينة وهران اعتماداً على منهج التحليل الكمي لنسيجها الحضري من خلال استخدام مؤشرات المناظر الطبيعية من خلال تطبيق عملية الاستشعار عن بعد واستخدام أدوات نظم المعلومات الجغرافية لتحويل البيانات الفضائية إلى صورة نقطية في من أجل حساب المؤشرات المذكورة. تتيح لنا هذه المنهجية التعرف على درجة الاكتناز لكل منطقة من وهران. وبعد (NOx) ذلك، قمنا بتكوين نتيجة الحساب على بيانات جودة الهواء التي تشير إلى تركيز أكسيد النيتروجين الملوث

تظهر نتيجة هذه الدراسة أن المناطق الأكثر اكتنازاً ترتبط بتركيزات عالية من ملوثات الغلاف الجوي تتجاوز عتبة توصيات منظمة الصحة العالمية بشأن جودة الهواء، مما له آثار مباشرة على صحة الجهاز التنفسي للسكان.

الكلمات المفتاحية

الاكتناز الحضري، جودة الهواء، تركيز أكاسيد النيتروجين، صحة السكان، التحليل الكمي، مؤشرات المناظر الطبيعية، الاستشعار عن بعد.

ABSTRACT

In the literature, there is a common consensus that the compact urban form is the ideal model for a sustainable city that is favourable to the environment and therefore to the health of its inhabitants. Indeed, compared with urban sprawl, compactness can improve sustainability through a number of factors, including: reduced land and energy consumption; reduced motorised travel by encouraging proximity and accessibility, and therefore reduced greenhouse gas emissions; improved functional mix and therefore social diversity; increased physical activity by encouraging active travel and therefore less dependence on the car. However, the compact city is also the subject of a great deal of scientific controversy, and can also affect the health of its inhabitants through: overcrowding, a lack of green spaces that can reduce opportunities for health-promoting activities such as outdoor physical activity and stress-reducing leisure pursuits, and high levels of exposure to noise and air pollution.

The aim of this thesis is to examine the effect of urban compactness on air quality. We hypothesise that "urban form affects air quality, which constitutes a risk factor for the health of inhabitants". We are testing this hypothesis on the city of Oran, based on the approach of quantitative analysis of its urban fabric using landscape indicators through the application of the remote sensing process and the use of GIS tools to convert satellite data into raster images in order to calculate the said indicators. This methodology enables us to identify the degree of compactness of each area of Oran. The result of the calculation is then superimposed on the air quality data, which indicates the concentration of the pollutant nitrogen oxide (NO_x).

The results of this study show that the most compact areas are associated with high concentrations of atmospheric pollutants that exceed the threshold of WHO air quality recommendations, with direct effects on the respiratory health of residents.

Keywords

Urban compactness, air quality, NO_x concentration, health of inhabitants, quantitative analysis, landscape indicators, remote sensing.