

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Architecture
Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة المعمارية
المرجع :

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences en : Architecture
Spécialité (Option) : **Architecture**

**La soutenabilité de la ville au Sahara entre
compacité et tendances d'étalement urbain. Cas
d'étude : Les grandes villes du Bas-Sahara algérien**

Présentée par :

DECHAICHA Assoule

Soutenue publiquement le : 24-12-2020

Devant le jury composé de :

| | | | |
|------------------------|---------------------------|------------|-----------------------------|
| Dr. Zemmouri Nouredine | Professeur | Président | Université de Biskra |
| Dr. Alkama Djamel | Professeur | Rapporteur | Université de Guelma |
| Dr. Benabbas Moussadek | Professeur | Examineur | Université de Biskra |
| Dr. Madani Said | Professeur | Examineur | Université de Sétif 1 |
| Dr. Benmissi Ahcene | Professeur | Examineur | Université de Constantine 3 |
| Dr. Bouzaher Soumia | Maitre de Conférences 'A' | Examineur | Université de Biskra |

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont soutenu, m'ont encouragé durant toute ma période d'étude, et pour leurs sacrifices consentis. À ceux qui ont toujours voulu que je sois le meilleur : À ma mère et mon père, et :

Ma femme : Assia

Mes fils : Yakine, Ahmed Yacine, Zakaria et Brahim

Ma jeune fille : Rokaya Hidaya

Mes frères et sœurs : Hakima, Elhadja, Zineb, Djamel, Samir, Mokhtar et Adel

À tous mes chers collègues des universités de Guelma et de Biskra

Ainsi que ceux que j'ai connus depuis mon enfance à ce jour

REMERCIEMENT

Je remercie **ALLAH** le Tout Puissant de m'avoir aidé et donné la volonté d'achever ce modeste travail.

Mes remerciements et ma reconnaissance vont particulièrement à mon directeur de thèse et mon enseignant **Pr Djamel ALKAMA**, tout d'abord pour sa confiance, pour sa disponibilité, ses précieuses orientations, et surtout sa modestie : « *Veillez trouver, ici, mon professeur, l'expression de ma profonde gratitude* ».

Je tiens à remercier les professeurs **Noureddine ZEMMOURI, Moussadek BENABBAS, Said Madani, Benmissi Ahcene** et docteur **Soumia BOUZAHER**, de m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie du jury de ma thèse, et d'avoir pris le temps pour lire et évaluer ce travail de recherche.

Mes sincères remerciements vont également au professeur **Marc CÔTE** et madame **Anne CÔTE**, qui n'ont jamais hésité de m'accueillir à l'UAM III et de me prendre en charge pendant toutes les formations que j'ai effectuées dans le cadre de la présente thèse.

Je remercie le docteur **Luca Congedo** pour sa bénéfique formation et ses orientations dans le domaine de la télédétection spatiale, un domaine qui m'a attiré et qui m'a permis de mener à bien une bonne partie de ce travail de recherche.

Je remercie les responsables de notre laboratoire **LACOMOFA** de m'avoir offert toutes les moyens, mais aussi pour leur disponibilité et leurs aides, notamment en matière de documentation et de matériel technique et informatique.

Je tiens à remercier aussi mes collègues enseignants du département d'architecture de Biskra : **Adel Sakhri, Azzedine DAKHIA, Chafik Mahaya, Mostefa Meddouki, Leila Sriti**, ainsi que mes amis architectes : **Pr Brahim NOUIBAT, Hocine Boudjehem, Mabrouk Araba, Naceur Beloudah et Larbi Meddour**, pour leurs soutiens et encouragements pendant toute la période de préparation de la présente thèse.

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure I-1 : Les différentes formes d'étalement de la cité historique..... | 18 |
| Figure I-2: Formes de l'étalement urbain | 21 |
| Figure I-3 : Évolution de la population urbaine en Algérie (1960 – 2017) | 22 |
| Figure I-4 : Modèles théoriques des macroformes urbaines..... | 26 |
| Figure I-5 : différents modes d'extensions urbaines à partir d'un état initial (A et B) | 29 |
| Figure I-6 : La <i>Randstad</i> aux Pays-Bas, un modèle multipolaire compact | 30 |
| Figure I-7 : Différentes formes d'intégration des bandes vertes en aménagement urbain | 33 |
| Figure I-8 : Organisation de la cité-jardin d'après E. Howard (1898) | 34 |
| Figure I-9 : Les ceintures vertes à Londres et à Ottawa | 35 |
| Figure I-10 : Des <i>Greenalleys</i> à Copenhague et à Bristol (UK) | 37 |
| Figure I-11 : Plusieurs formes urbains pour une même densité de bâtie (COS = 0,5) et même densités de population..... | 43 |
| Figure I-12 : La densité résidentielle en fonction du type des bâtiments | 44 |
| Figure I-13 : L'interdépendance entre étalement urbain et ségrégation sociospatiale | 46 |
| Figure I-14 : La part de l'automobile en fonction de la densité urbaine | 49 |
| Figure II-1 : Vision hiérarchique de l'écologie du paysage..... | 57 |
| Figure II-2 : La théorie biogéographique des îles | 59 |
| Figure II-3 : Une métapopulation..... | 59 |
| Figure II-4 : Des métapopulations..... | 60 |
| Figure II-5 : Une vue représentative d'une mosaïque paysagère (Commune de Foncine-le-Bas) ... | 61 |
| Figure II-6 : Éléments de constitution d'un paysage..... | 62 |
| Figure II-7 : Influence de la taille du grain et de l'étendue dans la définition cartographique de la mosaïque paysagère | 66 |
| Figure II-8 : Processus de perforation des taches naturelles | 71 |
| Figure II-9 : Les cinq processus de destruction d'un habitat naturel | 72 |
| Figure II-10 : L'effet barrière que peut constituer un réseau de transport en plus de l'apparition de taches artificialisées au sein de l'habitat naturel : deux processus pouvant causer l'isolement et la disparition de l'habitat naturel (l'exemple du quartier La Poterie en périphérie de Renne). | 74 |
| Figure II-11 : Différentes formes d'altération de l'habitat naturel par l'étalement du tissu urbain.. | 75 |
| Figure II-12 : Des perspectives multiples en l'écologie urbaine..... | 77 |
| Figure III-1 : Système de télédétection..... | 84 |
| Figure III-2 : Télédétection aérienne et satellitale..... | 86 |
| Figure III-3 : Représentation numérique des images..... | 87 |

| | |
|---|-----|
| Figure III-4 : Le spectre électromagnétique..... | 89 |
| Figure III-5 : La même scène avec deux radiométries différentes (1-bit à gauche vs 8-bit à droite) | 91 |
| Figure III-6 : Comparaison des étendues spatiales de quelques capteurs satellites | 92 |
| Figure III-7 : Apparence améliorée d'une scène satellite | 99 |
| Figure III-8 : Schème de classification d'une image satellite | 100 |
| Figure III-9 : Méthodes d'extraction utilisées en télédétection urbaine | 102 |
| Figure IV-1 : Processus de perte de connectivité écologique causé par l'étalement de la tache urbaine. | 113 |
| Figure IV-2 : Schème global d'une démarche de détection du changement | 116 |
| Figure IV-3 : Plan d'une comparaison post-classification de détection du changement..... | 121 |
| Figure IV-4 : L'interaction homme-environnement selon le cadre DPSIR..... | 123 |
| Figure IV-5 : Répartition des métriques spatiales selon les trois aspects : composition, structure et fonction. | 128 |
| Figure V-1 : Le Sahara vu du ciel à travers le satellite..... | 142 |
| Figure V-2 : La topographie du Sahara. | 144 |
| Figure V-3 : Hamada (Sahara algérien)..... | 145 |
| Figure V-4 : Reg (Sahara algérien) | 146 |
| Figure V-5 : Les Ergs du Sahara algérien..... | 147 |
| Figure V-6 : Les grandes entités paysagères du Sahara algérien | 148 |
| Figure V-7 : Les principaux aquifères du Sahara algérien | 150 |
| Figure V-8 : Les gisements fossiles du Sahara algérien..... | 152 |
| Figure V-9 : Moyens annuels d'ensoleillement à l'échelle mondiale (prise de vue le 30/05/2012 à 10h13)..... | 153 |
| Figure V-10 : Carte des isohyètes du Sahara algérien..... | 156 |
| Figure V-11: Écarts de températures moyennes annuelles des grandes villes du Sahara algérien . | 158 |
| Figure V-12 : Les itinéraires sahariens et leurs étapes | 161 |
| Figure V-13 : Durée de vie des établissements oasiens du Sahara | 162 |
| Figure V-14 : La trilogie basique de l'oasis..... | 163 |
| Figure V-15 : Stratification et régulation microclimatique au sein d'une palmeraie : l'effet « oasis » | 164 |
| Figure V-16 : Fonctionnement du système oasien | 166 |
| Figure V-17 : Typologie des oasis selon la configuration topographique et la nature de la source hydraulique..... | 167 |
| Figure VI-1 : Évolution des taux de croissance annuelle du Sahara par rapport aux moyennes nationales. | 171 |

| | |
|---|-----|
| Figure VI-2 : La population du Bas-Sahara par rapport l'ensemble du Sahara..... | 172 |
| Figure VI-3 : Évolution du classement des grandes villes sahariennes entre 1966 et 1998 | 175 |
| Figure VI-4 : Part de la population urbaine par sous-ensemble (1987-1998-2008)..... | 176 |
| Figure VI-5 : Classification (classement) des villes du Sud algérien en 1998 | 178 |
| Figure VI-6 : Répartition des agglomérations urbaines selon leurs poids démographiques. | 180 |
| Figure VI-7 : Le Bas-Sahara algérien..... | 181 |
| Figure VI-8 : Remontée du niveau de la nappe phréatique | 184 |
| Figure VI-9 : Le drain d'Oued Righ..... | 186 |
| Figure VI-10 : Localisation des sites de remontée des eaux dans la vallée d'Oued Righ..... | 187 |
| Figure VI-11 : La cuvette de Ouargla..... | 189 |
| Figure VI-12 : Engorgement et disparition d'une palmeraie à Ouargla | 190 |
| Figure VI-13 : Le pays des Ziban..... | 192 |
| Figure VI-14 : Les profondeurs de la nappe phréatique dans le pays d'Oued Souf..... | 193 |
| Figure VI-15 : Le Ghout du Souf : un système agricole en déclin..... | 194 |
| Figure VI-16 : Des quartiers inondés à Biskra..... | 197 |
| Figure VI-17 : Historique des inondations de la ville de Biskra depuis 1980 | 199 |
| Figure VII-1 : Situation de l'aire d'étude | 203 |
| Figure VII-2 : Température et précipitations annuelles des villes de Biskra, Ouargla et Touggourt | 204 |
| Figure VII-3 : Évolution démographique des villes de Biskra, Ouargla et Touggourt | 205 |
| Figure VII-4 : Compositions en fausses couleurs des images utilisées (1985 – 2000 – 2015)..... | 211 |
| Figure VII-5 : Évolution spatiotemporelle de l'oasis de Biskra (1985 - 2015) | 212 |
| Figure VII-6 : Les portions des surfaces urbanisées et des surfaces agricoles (1985 - 2015) | 214 |
| Figure VII-7 : Carte de changement UOS entre 1985 et 2000 (Biskra) | 214 |
| Figure VII-8 : Carte de changement UOS entre 2000 et 2015 (Biskra) | 215 |
| Figure VII-9 : Compositions en fausses couleurs des images utilisées (1985 – 2000 – 2015)..... | 217 |
| Figure VII-10 : Évolution spatiotemporelle de la ville de Ouargla entre 1985 et 2015 | 219 |
| Figure VII-11 : Évolution surfacique des classes UOS de l'oasis de Ouargla (1985 – 2015)..... | 220 |
| Figure VII-12 : Carte de changement UOS de l'oasis de Ouargla pendant la période 1985 - 2000 | 221 |
| Figure VII-13 : Changement de l'occupation du sol entre 1985 et 2000 (Ouargla) | 222 |
| Figure VII-14 : Changement d'occupation du sol entre 1985 et 2015 (carte synthétique) | 223 |
| Figure VII-15 : Compositions en fausses couleurs des images utilisées (1985 – 2000 – 2015)..... | 225 |
| Figure VII-16 : Évolution spatiotemporelle de la ville de Touggourt entre 1985 et 2015 | 226 |
| Figure VII-17 : Évolution surfacique des classes UOS de l'oasis de Touggourt..... | 227 |

| | |
|--|-----|
| Figure VII-18 : Le changement de l'UOS de l'oasis de Touggourt entre 1985 et 2000 | 228 |
| Figure VII-19 : Le changement UOS de l'Oasis de Touggourt entre 2000 et 2015 | 229 |
| Figure VII-20 : Évolution de l'UOS entre 1985 et 2015 : carte de synthèse..... | 230 |
| Figure VII-21 : Évolution spatiotemporelle des villes de Biskra, Ouargla et Touggourt (1985 – 2015) | 230 |
| Figure VII-22 : Ampleurs d'évolution spatiale pour les villes de Biskra, Ouargla et Touggourt... | 233 |
| Figure VIII-1 : Évolution des indicateurs surfaciques pendant la période 1985 - 2015 (Biskra)... | 240 |
| Figure VIII-2 : Évolution des indicateurs d'espacement entre fragments (1985 -2015) | 241 |
| Figure VIII-3 : Évolution des indices synthétiques de configuration (Biskra)..... | 242 |
| Figure VIII-4 : Évolution des indicateurs surfaciques (NP, PLAND, LPI) caractérisant l'oasis de Ouargla entre 1985 et 2015..... | 244 |
| Figure VIII-5 : Évolution des indicateurs de distances entre fragments (Ouargla)..... | 245 |
| Figure VIII-6 : Évolution des indicateurs de configuration (Ouargla)..... | 247 |
| Figure VIII-7 : Évolution des indicateurs surfaciques caractérisant la ville de Touggourt entre 1985 et 2015 | 248 |
| Figure VIII-8 : Évolution des indicateurs de distances AREA_MN et ENN_MN (Touggourt) | 249 |
| Figure VIII-9 : Évolution des indicateurs de configuration (Touggourt) | 251 |
| Figure VIII-10 : Comportement des métriques de composition et de distribution spatiales des fragments urbains pour l'ensemble des trois villes | 252 |
| Figure VIII-11: Comportement des métriques de configuration spatiale des fragments urbains relatifs à l'ensemble des trois villes | 254 |
| Figure VIII-12 : Comportement des métriques de composition et de distribution spatiales des fragments agricoles pour l'ensemble des trois oasis | 255 |
| Figure VIII-13 : Comportement des métriques de configuration caractérisant les fragments agricoles de l'ensemble des trois oasis..... | 256 |

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III-1 : Classification des images satellites selon leurs résolutions spatiales88

Tableau III-2 : Domaines d’application de la télédétection urbaine en fonction des types d’utilisateurs
.....93

Tableau III-3 : Réflectance spectrale de quelques matériaux identifiés dans les villes95

Tableau III-4 : Nomenclature élaborée pour l’établissement d’une librairie spectrale96

Tableau III-5 : Caractéristiques techniques de quelques capteurs satellites97

Tableau V-1 : Ensoleillement annuel reçu en Algérie.....153

Tableau V-2 : Les moyennes annuelles de température des grandes villes du Sahara algérien157

Tableau VI-1 : Évolution de la population saharienne entre 1954 et 2008 par rapport à la population nationale.....170

Tableau VI-2 : Évolution des populations des densités humaines au Sahara algérien (1954 – 2008)
.....171

Tableau VI-3 : Taux d’urbanisation entre 1954 et 2008.....173

Tableau VI-4 : Évolution de la population urbaine au Sahara entre 1954 et 2008173

Tableau VI-5 : Propriétés des lacs témoignant la remontée des eaux sur l’ensemble d’Oued Righ.
.....188

Tableau VII-1 : Labélisation et description des classes retenues.....207

Tableau VII-2 : Caractéristiques des images Landsat utilisées (Biskra)209

Tableau VII-3 : Précision de la classification des trois images 1985, 2000 et 2015.....211

Tableau VII-4 : Évolution surfacique des classes d’occupation et d’utilisation du sol.....213

Tableau VII-5 : Caractéristiques des images Landsat utilisées (Ouargla).....216

Tableau VII-6 : Précision de la classification des trois images 1985, 2000 et 2015.....218

Tableau VII-7 : Évolution surfacique des classes d’occupation et d’utilisation du sol (Ouargla)..220

Tableau VII-8 : Caractéristiques des images Landsat utilisées (Touggourt).....224

Tableau VII-9 : Précision de la classification des trois images 1985, 2000 et 2015 (Touggourt) ..225

Tableau VII-10 : Évolution surfacique des classes d’occupation et d’utilisation du sol (Touggourt)
.....227

Tableau VIII-1 : Description et interprétation des métriques paysagères sélectionnées239

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| DÉDICACE | i |
| REMERCIEMENT | ii |
| LISTE DES FIGURES | I |
| LISTE DES TABLEAUX | V |
| TABLE DES MATIÈRES | VI |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 2 |
| Problématique..... | 5 |
| Questions de recherche..... | 5 |
| Hypothèses de recherche | 6 |
| Objectifs de recherche..... | 6 |
| Zone et corpus d'étude : motivation et critères de choix | 6 |
| La zone d'étude | 6 |
| Choix des villes | 7 |
| Positionnement épistémologique de la thèse..... | 8 |
| L'analyse conceptuelle..... | 9 |
| Méthodologie..... | 10 |
| Structure de la thèse | 11 |
| PARTIE THÉORIQUE | 14 |
| Chapitre I. La Macroforme entre compacité et étalement morphologique : quel paradigme pour une soutenabilité urbaine ? | 15 |
| Introduction | 15 |
| I.1. La question des modalités de la croissance urbaine | 16 |
| I.2. De la cité compacte à la ville étalée : regard historique sur l'évolution des formes urbaines . | 16 |
| I.2.1. Les villes antiques et médiévales : des formes autolimitées de densification spatiale | 17 |
| I.2.2. La croissance de la ville industrielle : le passage au <i>Tracked city</i> | 18 |
| I.2.3. La ville de l'après 2 ^{ème} guerre mondiale : le passage à la ville motorisée | 19 |
| I.3. Les formes de l'étalement urbain | 20 |
| I.3.1. L'étalement urbain en Algérie | 21 |
| I.3.1.1. Une croissance urbaine rapide et mal contrôlée | 21 |
| I.3.1.2. Une croissance spatiale démesurée et mal gérée | 22 |
| I.4. La macroforme comme échelle d'analyse de l'étalement urbain..... | 23 |
| I.4.1. Morphologie urbaine et profils des villes soutenables..... | 24 |
| I.4.1.1. Macroforme et agrégation des fragments : formes compactes et formes étalées | 25 |
| I.4.1.2. Quatre modèles théoriques de macroformes..... | 26 |
| I.4.2. Repenser la macroforme urbaine | 26 |

| | |
|--|-----------|
| I.4.3. La ville compacte comme modèle de soutenabilité urbaine..... | 27 |
| I.5. Des tendances à la compaction urbaine : monocentrisme et polycentrisme compacts..... | 28 |
| I.5.1. Le plan néerlandais (ABC)..... | 28 |
| I.5.2. De la compacité monocentrique à la compacité polycentrique : les politiques de la « décentralisation centralisée »..... | 30 |
| I.5.3. Des limites de croissance urbaine (<i>Urban Growth Boundary</i>)..... | 31 |
| I.5.4. Balisage par verdoisement : des corridors verts..... | 31 |
| I.5.4.1. La végétation urbaine pour aérer les tissus entassés..... | 32 |
| I.5.4.2. Les ceintures vertes (<i>Fringe belt</i>)..... | 33 |
| I.5.4.3. Les coulées vertes..... | 36 |
| I.5.4.4. Les corridors écologiques..... | 37 |
| I.6. Des alternatives pour la compaction polycentrique..... | 38 |
| I.6.1. Le <i>Smart growth</i> | 39 |
| I.6.2. Le Nouvel Urbanisme..... | 40 |
| I.7. Les impacts des différentes formes urbaines..... | 41 |
| I.7.1. Forme urbaine et qualité de vie..... | 42 |
| I.7.2. Formes urbaines et ségrégation sociospatiale : la concomitance étalement urbain et disparité spatiale..... | 45 |
| I.7.3. Formes urbaines et aménités spatiales..... | 46 |
| I.7.4. Formes urbaines et dépenses économiques..... | 47 |
| I.7.5. Formes urbaines, mobilité et consommation énergétique..... | 48 |
| I.7.6. Formes urbaines et processus écologiques : positionnement épistémologique et méthodologique..... | 50 |
| Conclusion..... | 51 |
| Chapitre II. Une approche écologique de la soutenabilité urbaine : les apports de l'écologie du paysage urbain..... | 53 |
| Introduction..... | 53 |
| II.1. L'écologie du paysage urbain : concepts et approches..... | 53 |
| II.1.1. Éléments de définition..... | 53 |
| II.1.1.1. Biotope..... | 54 |
| II.1.1.2. Biocénose..... | 54 |
| II.1.1.3. Écosystème..... | 54 |
| II.1.2. Déséquilibre et dysfonctionnement des écosystèmes..... | 55 |
| II.2. Un champ pluridisciplinaire florissant..... | 55 |
| II.2.1. Deux écoles de pensée..... | 56 |
| II.2.2. Le paysage : un niveau spatial privilégié en écologie du paysage..... | 56 |
| II.2.3. L'écologie du paysage : théories et concepts de base..... | 58 |

| | |
|---|-----------|
| II.2.3.1. La théorie biogéographique des îles | 58 |
| II.2.3.2. La théorie des métapopulations | 59 |
| II.2.3.3. La perturbation intermédiaire | 60 |
| II.2.3.4. Représentation spatiale de la mosaïque paysagère | 61 |
| II.2.3.4.a. Les taches | 61 |
| II.2.3.4.b. Les corridors | 62 |
| II.2.3.4.c. La matrice | 63 |
| II.2.4. Paysage et connectivité écologique | 63 |
| II.3. Les dynamiques paysagères : hétérogénéité et hiérarchie spatiales | 64 |
| II.3.1. L'hétérogénéité des paysages | 64 |
| II.3.2. Paysage et hiérarchie spatiale : la question des échelles | 64 |
| II.4. Impact de l'activité anthropique sur les structures paysagères : les dynamiques d'occupation et utilisation des sols | 66 |
| II.4.1. L'occupation du sol | 67 |
| II.4.2. L'utilisation du sol | 67 |
| II.4.3. Suivi des changements spatiotemporels : évolution des classes UOS | 67 |
| II.4.3.1. L'intensification ou la densification | 68 |
| II.4.3.2. L'extensification | 68 |
| II.4.3.3. Le développement | 68 |
| II.5. Étalement des surfaces bâties et changement des structures paysagères : apport de la télédétection urbaine | 69 |
| II.5.1. L'artificialisation des sols et ses conséquences sur les paysages : | 69 |
| II.5.2. Impact écologique du changement d'UOS : fragmentation et discontinuité spatiales | 70 |
| II.5.3. Les conséquences sur la biodiversité | 73 |
| II.5.4. Effets de la propagation du bâti sur les structures paysagères | 74 |
| II.6. L'écologie urbaine : une vision écosystémique de la ville | 75 |
| II.6.1. Le paysage urbain comme dimension matérialisée caractérisant les territoires urbains et périurbains : les apports de l'écologie du paysage urbain | 78 |
| Conclusion | 79 |
| Chapitre III. La télédétection urbaine comme outil de suivi et d'évaluation des dynamiques spatiales dans les villes | 80 |
| Introduction | 80 |
| III.1. Le besoin en information spatiale actualisée pour suivre les dynamiques urbaines dans les pays en voie de développement | 81 |
| III.1.1. Acteurs locaux et système d'information urbain : vers une vision globale de gestion de la ville | 81 |
| III.1.2. Une nouvelle approche basée sur la télédétection spatiale et les SIG | 81 |

| | |
|--|-----|
| III.1.3. Vers une actualisation permanente de l'information urbaine | 82 |
| III.2. La télédétection spatiale : notions et concepts de base | 83 |
| III.2.1. Définition | 83 |
| III.2.2. Principe de fonctionnement : schémas de base | 84 |
| III.2.3. Types de télédétection | 85 |
| III.2.3.1. La télédétection aérienne | 85 |
| III.2.3.2. La télédétection spatiale..... | 85 |
| III.2.4. L'image satellitale : définition | 86 |
| III.2.4.1. Les propriétés d'une image satellite | 87 |
| III.2.4.1.a. La résolution spatiale | 87 |
| III.2.4.1.b. La résolution spectrale | 88 |
| III.2.4.1.c. La résolution radiométrique | 90 |
| III.2.4.1.d. La résolution temporelle | 91 |
| III.2.4.1.e. La fauchée | 91 |
| III.3. Extraction et lecture de l'information spatiale : interprétation des images satellites..... | 92 |
| III.3.1. Un processus intellectuel lié aux notions UOS | 92 |
| III.3.2. La lisibilité des images satellites | 93 |
| III.3.2.1. Des considérations spatiales..... | 94 |
| III.3.2.2. Des considérations spectrales..... | 94 |
| III.4. L'imagerie satellitale pour l'étude des milieux urbains | 96 |
| III.4.1. Bref historique..... | 96 |
| III.4.2. Choix des images : le meilleur compromis..... | 97 |
| III.4.3. L'extraction de l'information urbaine | 98 |
| III.5. Traitement et analyse des images satellites | 98 |
| III.5.1. Prétraitement et rehaussement des images brutes | 99 |
| III.5.2. Classification des images satellitales..... | 99 |
| III.5.2.1. Les méthodes de classification | 100 |
| III.5.2.2. Les méthodes de segmentation..... | 100 |
| III.5.3. La classification des données satellites : approche « Par pixel » | 100 |
| III.6. Télédétection spatiale et SIG : application en milieux urbains et périurbains | 103 |
| III.6.1. Occupation du sol, inventaire et actualisation cartographique | 104 |
| III.6.2. Cartographie et mise à jour à différentes échelles spatiales | 104 |
| III.6.3. Les Systèmes d'Information Géographiques | 105 |
| III.6.4. Typologie et inventaires | 106 |
| III.6.5. Applications environnementales | 107 |
| III.6.6. Patrimoine naturel, espaces verts et écosystèmes | 108 |

| | |
|--|------------|
| III.6.7. Aménagement et planification spatiale : prédiction et analyse des scénarii..... | 108 |
| III.6.8. L'analyse spatiotemporelle des dynamiques spatiales | 109 |
| Conclusion..... | 110 |
| Chapitre IV. Détection et évaluation spatiales des formes d'urbanisation : application des méthodes de Détection du Changement (DC) et des métriques paysagères | 111 |
| Introduction | 111 |
| IV.1. La télédétection urbaine comme support de cartographie du changement : application des modèles de Détection du Changement (DC)..... | 112 |
| IV.1.1. Le suivi des changements spatiotemporels pour comprendre les effets de l'étalement urbain..... | 112 |
| IV.1.2. La télédétection du changement comme outil de suivi de l'étalement des taches urbaines | 114 |
| IV.2. La détection du changement : les modèles LUCC..... | 115 |
| IV.2.1. La démarche LUCC | 116 |
| IV.2.1.1. Prétraitement des images satellites : correction géométrique et radiométrique..... | 116 |
| IV.2.2. Calcul et identification du changement : les modèles <i>LUCC</i> | 117 |
| IV.2.3. La comparaison de scènes multidates : un cadre global..... | 118 |
| IV.2.3.1. Des considérations préalables avant le calcul DC..... | 118 |
| IV.2.3.2. Les méthodes de détection du changement | 119 |
| IV.2.3.2.a. Des méthodes algébriques ou de comparaison directe | 120 |
| IV.2.3.2.b. Des méthodes de transformation | 120 |
| IV.2.3.2.c. Des méthodes basées sur la classification..... | 120 |
| IV.2.3.3. Choix méthodologique | 120 |
| IV.3. Évaluation des formes d'urbanisation à travers les métriques paysagères : apports des indices paysagers | 122 |
| IV.3.1. L'utilité d'une approche quantitative pour évaluer les transformations des structures paysagères..... | 122 |
| IV.3.2. Les métriques spatiales pour l'évaluation de l'étalement des surfaces bâties | 123 |
| IV.3.3. Les métriques paysagères pour mesurer le changement au niveau des paysages | 124 |
| IV.3.4. Les métriques paysagères appliquées aux milieux urbains et périurbains | 125 |
| IV.3.5. Les indices paysagers | 126 |
| IV.3.6. Classification des indices : composition, configuration et structure..... | 127 |
| IV.3.6.1. Les indices de composition..... | 127 |
| IV.3.6.2. Les indices de forme..... | 127 |
| IV.3.6.3. Les indices de configuration | 127 |
| IV.3.7. Caractérisation des tendances urbaines : actualisation et prospective de l'urbanisation..... | 128 |
| IV.3.7.1. À une échelle mondiale | 129 |

| | |
|--|------------|
| IV.3.7.2. À une échelle locale | 129 |
| IV.3.8. Des considérations méthodologiques | 130 |
| IV.3.8.1. La qualité spatiale des images..... | 131 |
| IV.3.8.2. La qualité spectrale des images : aspect thématique | 131 |
| IV.3.9. Sélection des métriques | 133 |
| IV.3.9.1. Définition de l'échelle spatiale et du domaine d'étude | 133 |
| IV.3.9.2. Les niveaux d'analyse | 134 |
| IV.3.9.2.a. Au niveau de la tache individuelle | 135 |
| IV.3.9.2.b. La structure locale du voisinage..... | 135 |
| IV.3.9.2.c. La structure globale du paysage | 135 |
| IV.3.9.3. Les niveaux d'hétérogénéité | 135 |
| IV.3.9.3.a. Le niveau des taches | 136 |
| IV.3.9.3.b. Le niveau des classes | 136 |
| IV.3.9.3.c. Le niveau du paysage..... | 137 |
| Conclusion..... | 137 |
| PARTIE ANALYTIQUE | 139 |
| Chapitre V. Le Sahara algérien : un environnement désertique, mais support de potentialité stratégique..... | 140 |
| Introduction | 140 |
| V.1. Le grand Sahara : cadre physique et structurel | 141 |
| V.1.1. Entre Sahara et désert : précision étymologique | 141 |
| V.2. Le Grand Sahara : une approche géographique | 141 |
| V.2.1. Un « bouclier » désertique à enjeux géopolitiques | 142 |
| V.2.2. Une variété paysagère et ethnique..... | 142 |
| V.2.3. Aspects géomorphologiques | 143 |
| V.2.4. Une immense platitude privée d'écoulement..... | 144 |
| V.2.5. Relief..... | 145 |
| V.2.5.1. Les Hamadas | 145 |
| V.2.5.2. Les Regs | 146 |
| V.2.5.3. Les Ergs | 146 |
| V.2.5.4. Les Bassins fermés | 147 |
| V.2.5.5. Les lits d'oued | 147 |
| V.3. Le Sahara algérien : d'un territoire mis à l'écart à un territoire stratégique..... | 149 |
| V.3.1. Les capacités hydrauliques | 149 |
| V.3.2. Les énergies fossiles | 151 |
| V.3.3. Les gisements solaires : une richesse renouvelable et prometteuse | 152 |

| | |
|---|------------|
| V.4. Des extrêmes contraintes climatiques | 154 |
| V.4.1. Effet des anticyclones permanents | 155 |
| V.4.2. Indices climatiques et délimitation du domaine désertique | 155 |
| V.4.3. Températures..... | 157 |
| V.4.4. Des sous-ensembles bioclimatiques | 158 |
| V.5. Les oasis : l'œuvre d'un génie saharien | 158 |
| V.5.1. L'écosystème oasien : éléments de composition et de fonctionnement | 159 |
| V.5.2. Dynamiques de prospérité et déclin | 161 |
| V.5.3. La trilogie de base de l'écosystème oasien | 163 |
| V.5.3.1. L'eau | 163 |
| V.5.3.2. La palmeraie : source névralgique de revenu et de régulation microclimatique..... | 164 |
| V.5.3.3. L'habitat : le Ksar | 164 |
| V.5.4. L'oasis : un agrosystème en interactions internes et externes | 165 |
| V.5.5. La morphologie oasienne : typologie et configurations | 166 |
| Conclusion..... | 168 |
| Chapitre VI. Une urbanisation qui pèse sur un environnement fragile : analyse socioéconomique et environnementale..... | 169 |
| Introduction | 169 |
| VI.1. Urbanisation et croissance démographique au Sahara Algérien au XXI ^e siècle | 170 |
| VI.1.1. À partir de 1954 | 170 |
| VI.1.2. Une urbanisation assez considérable..... | 172 |
| VI.2. Une structuration en mini réseaux | 177 |
| VI.3. Une urbanisation à deux strates | 179 |
| VI.4. Le Bas-Sahara algérien : des traits de représentativité et de particularité saharienne | 181 |
| VI.4.1. La situation en marges septentrionales..... | 181 |
| VI.4.2. La relative concentration de population et d'activités..... | 182 |
| VI.5. Une urbanisation qui pèse sur l'environnement | 182 |
| VI.5.1. La remontée des eaux souterraines : un risque menaçant toute la biocénose..... | 183 |
| VI.5.2. L'expansion d'un système hydraulique fermé..... | 183 |
| VI.5.2.1. L'Oued Righ | 185 |
| VI.5.2.2. Ouargla : une cuvette favorable à la stagnation des eaux..... | 188 |
| VI.5.2.3. Les Ziban | 191 |
| VI.5.2.4. Le pays d'Oued Souf..... | 192 |
| VI.5.3. Les risques d'inondations : des aléas mal moins estimés..... | 195 |
| VI.5.3.1. Le géosystème..... | 195 |

| | |
|--|------------|
| VI.5.3.2. Crues des oueds et inondations des bassins fermés : deux sortes d'inondations sahariennes | 195 |
| VI.5.3.3. Les crues des oueds : cas de Biskra..... | 196 |
| VI.5.4. Une imperméabilisation des sols en augmentation contre un réseau vétuste d'assainissement | 198 |
| Conclusion..... | 200 |
| Chapitre VII. Cartographie spatiotemporelle et évaluation des formes d'urbanisation des grandes villes du Bas-Sahara algérien : application des techniques de Détection du Changement (DC)..... | 201 |
| Introduction | 201 |
| VII.1. Présentation des trois villes..... | 202 |
| VII.1.1. Situation géographique et Topographie | 202 |
| VII.1.2. Climat..... | 204 |
| VII.1.3. Démographie | 204 |
| VII.2. La détection du changement pour suivre l'étalement urbain | 205 |
| VII.3. Méthodologie du travail..... | 206 |
| VII.3.1. Données et matériel utilisés..... | 206 |
| VII.3.2. Démarche méthodologique..... | 206 |
| VII.3.2.1. Prétraitement et normalisation des images | 207 |
| VII.3.2.2. Classification supervisée et post-traitement | 207 |
| VII.3.2.3. Évaluation de la performance : la matrice de confusion | 208 |
| VII.3.2.4. Détection du changement | 209 |
| VII.4. La ville de Biskra : deux tendances spatiales nettement opposées..... | 209 |
| VII.4.1. Données utilisées | 209 |
| VII.4.2. Prétraitement et normalisation des images..... | 210 |
| VII.4.3. Résultats et interprétation..... | 211 |
| VII.4.3.1. Validation de la classification..... | 211 |
| VII.4.3.2. La cartographie du changement : un remarquable étalement des surfaces bâties | 212 |
| VII.4.3.3. Conurbation achevée contre un morcellement de la palmeraie : discussion..... | 215 |
| VII.5. La ville de Ouargla : une palmeraie fragmentée par l'avancée du bâti | 216 |
| VII.5.1. Données utilisées | 216 |
| VII.5.2. Prétraitement et normalisation des images..... | 217 |
| VII.5.3. Résultats et interprétation..... | 218 |
| VII.5.3.1. Validation de la classification..... | 218 |
| VII.5.3.2. La cartographie du changement : un net étalement des surfaces bâties | 218 |
| VII.5.3.3. Discussion..... | 222 |
| VII.6. La ville de Touggourt : franchissement des limites physiques et naturelles..... | 224 |

| | |
|---|------------|
| VII.6.1. Données utilisées | 224 |
| VII.6.2. Prétraitement et normalisation des images | 224 |
| VII.6.3. Résultats et interprétation | 225 |
| VII.6.3.1. Validation de la classification | 225 |
| VII.6.3.2. La cartographie du changement : un net étalement des surfaces bâties | 225 |
| VII.6.3.3. Un étalement en franchissement des barrières physiques : Discussion | 229 |
| VII.7. Synthèse : des traits morphologiques communs, mais avec des ampleurs distinguées | 230 |
| Conclusion | 233 |
| Chapitre VIII. Quantification et métriques spatiales des formes d'urbanisation caractérisant les grandes villes du Bas-Sahara algérien : application des métriques paysagères..... | 235 |
| Introduction | 235 |
| VIII.1. Sélection des métriques | 235 |
| VIII.1.1. Rappel sur la typologie et l'utilité des métriques paysagères | 235 |
| VIII.1.1.1. Les métriques de surfaces et de bordures..... | 235 |
| VIII.1.1.2. Les descripteurs de configuration : indices d'agrégation..... | 236 |
| VIII.1.2. Les métriques maintenues | 237 |
| VIII.1.2.1. Le nombre de fragments NP (Number of Patch)..... | 237 |
| VIII.1.2.2. La portion occupée dans le paysage (PLAND) | 237 |
| VIII.1.2.3. L'indice du plus large fragment LPI (Larget Patch Index)..... | 237 |
| VIII.1.2.4. La taille moyenne des fragments AREA_MN | 237 |
| VIII.1.2.5. La distance euclidienne des fragments les plus proches (ENN_MN) | 238 |
| VIII.1.2.6. L'indice de forme du paysage LSI (Landscape Shape Index) | 238 |
| VIII.1.2.7. L'indice d'agrégation (AI) | 238 |
| VIII.1.3. Récapitulation : tableau de synthèse..... | 238 |
| VIII.2. Résultats et interprétations..... | 240 |
| VIII.2.1. Biskra : deux tendances nettement opposées | 240 |
| VIII.2.1.1. Évolution des indicateurs surfaciques (NP, PLAND, LPI)..... | 240 |
| VIII.2.1.2. Évolution des indicateurs de distance | 241 |
| VIII.2.1.3. Évolution des indicateurs de configuration..... | 242 |
| VIII.2.2. Ouargla : des tendances variées entre les deux périodes d'études | 243 |
| VIII.2.2.1. Évolution des indicateurs surfaciques (NP, PLAND, LPI)..... | 243 |
| VIII.2.2.2. Évolution des indicateurs de distance | 245 |
| VIII.2.2.3. Évolution des indicateurs de configuration..... | 246 |
| VIII.2.3. Touggourt : franchissement et fragmentation partielle de la palmeraie en cours | 248 |
| VIII.2.3.1. Évolution des indicateurs surfaciques (NP, PLAND, LPI)..... | 248 |
| VIII.2.3.2. Évolution des indicateurs de distance..... | 249 |

| | |
|--|------------|
| VIII.2.3.3. Évolution des indicateurs de configuration..... | 250 |
| VIII.3. Synthèse : lecture d'ensemble..... | 252 |
| VIII.3.1. Évolution des surfaces urbanisée..... | 252 |
| VIII.3.1.1. Les indices synthétiques de configuration AI et LSI..... | 253 |
| VIII.3.2. Évolution des surfaces des palmeraies..... | 255 |
| Conclusion..... | 257 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE | 259 |
| Perspective de recherche | 266 |
| BIBLIOGRAPHIE | 267 |
| GLOSSAIRE | 296 |
| Annexes | 297 |
| Résumé..... | 301 |
| Abstract..... | 302 |
| ملخص..... | 302 |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'urbanisation effrénée, constatée depuis plus d'un demi-siècle, constitue actuellement un défi majeur que confrontent les responsables de l'aménagement et de la planification spatiale, compte tenu de son ampleur inédite et des conséquences néfastes qu'elle a engendrées. Depuis 2008, les villes abritaient plus de la moitié de la population mondiale. Vers 2030, l'urbanisation dépassera le taux de 60 % selon les prévisions de l'ONU (UN, 2018). Cette dynamique est plus accentuée dans les pays en voie de développement, mais elle est cependant moins estimée et moins maîtrisée. L'Algérie, quant à elle, n'a pas échappé de ce phénomène universel. La population urbaine est en perpétuelle augmentation avec variation de rythme entre les différentes régions du pays ; le Sud algérien enregistre un des taux les plus élevés à l'échelle nationale (Kouzmine et Fontaine, 2018). L'urbanisation est plus concentrée dans cette région fragile et contrainte par son hyperaridité.

La traduction spatiale de cette croissance urbaine est un étalement assez démesuré des périmètres urbains des villes contemporaines. Les zones urbaines ne cessent d'accroître leurs surfaces au détriment du potentiel environnemental, altérant de ce fait le paysage oasien et mettant en péril l'équilibre de son écosystème. Cette modalité de croissance spatiale est constatée consommatrice d'espaces, de ressources naturelles, et génératrice de multiples nuisances environnementales. Les bilans environnementaux confirment que les villes actuelles sont responsables de l'émission de plus de 70 % de Gaz à Effet de Serre (GES). De nouveaux problèmes plus complexes se manifestent actuellement comme des enjeux à mettre en avant : pollution urbaine, changements climatiques, épuisement des ressources naturelles, dégradation et disparition de la biodiversité ainsi que les problèmes sociaux liés à la ségrégation sociospatiale engendrée par les formes étalées des villes.

Les rapports entretenus, pendant longtemps, entre la ville et son espace se trouvent actuellement bouleversés en conséquence de cette modalité inédite de croissance spatiale. Les extensions urbaines s'opèrent lointainement des noyaux centraux, par fragmentation, générant de ce fait de nouvelles configurations spatiales plus complexes que jamais. Les formes urbaines produites récemment sont qualifiées comme « amorphes » ou plutôt sans formes (Frankhauser, 2005). Les dynamiques d'étalement urbain ont conduit au remodelage des territoires dont l'explosion de la mobilité est un moteur principal amenant de plus en plus au déploiement des concentrations démographiques et des activités urbaines. La question des modalités d'extension des zones urbaines occupe une place centrale dans les débats portant sur le devenir des villes, notamment avec l'émergence du concept de développement soutenable. En s'inscrivant dans cette optique, les aménageurs, les urbanistes, les géographes, les architectes et les autres acteurs de la ville sont appelés à penser la forme urbaine dans toutes actions d'aménagement et de planification spatiales. L'approche morphologique se présente à

ce titre comme une clé de compréhension et d'évaluation des formes urbaines produites et à produire dans l'avenir.

La forme urbaine est considérée comme un produit social dont l'attention doit porter sur la lecture de l'état de fait ainsi que l'analyse des mécanismes et des processus historiques conduisant à la construction de la forme urbaine (Allain, 2004). Avec l'universalisation du développement durable, la morphologie urbaine a gagné plus d'attrait. Plusieurs travaux ont pu mettre en évidence l'influence de la forme urbaine sur le comportement des villes dans une vision de soutenabilité urbaine. La macroforme est une dimension morphologique représentant la forme globale de la ville. En morphologie urbaine, l'étude de la macroforme est une manière faisable et connue pour caractériser l'étalement ou la compacité d'une ville. À ce niveau d'analyse, l'échelle de lecture est celle de la tache urbaine, dont l'allure du périmètre urbain et des limites du bâti sont mis en avant. L'interaction entre la ville et son environnement physique et naturel peut être, à cette échelle, étudiée et évaluée. Le suivi de l'évolution historique de la tache urbaine permet de comprendre les transformations spatiotemporelles accompagnant cette évolution. Le paysage est ici une notion basique présentant le support sur lequel se développent les interactions spatiales et fonctionnelles entre les différentes taches composant le territoire.

L'engagement de la communauté scientifique et professionnelle pour la réduction des effets néfastes générés par l'étalement des villes contemporaines a suscité le débat autour des modalités d'extension de croissance des villes. Le consensus universel s'est orienté vers l'octroi de plus de faveurs à la compacité urbaine comme choix d'aménagement privilégié, du fait qu'il est plus avantageux en matière de consommation d'espaces, de mobilité motorisée, de mixité sociale, et aussi en matière de préservation des paysages naturels avec moins de fragmentation écologique. En adoptant le développement soutenable comme modèle émergent du développement urbain, les nouvelles approches d'urbanisme telles que celles apportées par le Nouvel Urbanisme (*New Urbanism*) et la croissance intelligente (*Smart Growth*) recommandent la mise en œuvre d'alternatives plus conciliantes avec l'environnement humain et naturel. Toutefois, les pays en voie de développement sont davantage confrontés aux problèmes relatifs au suivi et à la maîtrise de l'étalement rapide et incontrôlé des villes, particulièrement dans les régions fragiles comme celles des régions sahariennes.

La compréhension des effets néfastes de l'étalement des surfaces bâties sur l'environnement fait appel aux concepts et méthodes développées et adoptées en écologie du paysage urbain. Cette discipline offre un cadre conceptuel permettant la mise en avant des relations entre formes urbaines produites et les transformations paysagères accompagnantes. Les modifications apportées par l'avancée des tissus urbains sont irréversibles et conduisent aux bouleversements des structures et

configurations des paysages. L'évaluation des transformations peut être abordée à travers deux concepts majeurs qui sont souvent abordés : la fragmentation paysagère et la connectivité écologique. La fragmentation des paysages a généralement un effet négatif sur le fonctionnement naturel des écosystèmes. Le morcellement de l'habitat est ainsi constaté comme l'une des principales menaces de la biodiversité dans le monde. L'action humaine en est le principal responsable du fait qu'elle est la cause des conversions affectant l'utilisation et l'occupation des sols.

Dans une vision écosystémique, la ville est considérée comme un écosystème constitué de sous-systèmes en interaction selon une logique hiérarchisée et auto-organisée. Elle est perçue aussi comme un organisme vivant en évolution et en perpétuelle interaction avec son environnement, avec lequel s'effectuent les échanges cycliques de matière et d'énergie. L'évaluation « objective » de ces interactions se ferait nécessairement à travers des approches quantitatives découlant particulièrement de l'écologie du paysage urbain. Les méthodes de suivi et d'évaluation de l'étalement des agglomérations urbaines sont principalement basées sur la télédétection spatiale et les Systèmes d'Information Géographique (SIG), compte tenu des opportunités qu'ils présentent à savoir : la qualité des informations véhiculées, leur périodicité, leur accessibilité, leurs coûts ainsi que les étendues géographiques couvertes qui offrent des visions synoptiques sur les territoires étudiés. En effet, la télédétection spatiale et les SIG sont devenues des outils incontournables dans les domaines portant sur le suivi et l'évaluation des dynamiques spatiotemporelles s'effectuant sur les territoires terrestres, notamment la croissance spatiale des villes. Ces outils permettent la cartographie des évolutions urbaines, l'identification des zones touchées par ces évolutions et la mesure de leurs impacts afin de pouvoir les évaluer dans une démarche quantitative.

La Détection du Changement (DC) est l'une des principales applications de la télédétection spatiale, qui sert à mettre en valeur les changements spatiotemporels dus à l'avancée de la frange urbaine. Les modèles de détection du changement LUCC (*Land Use and Land Cover Change*) permettent l'identification et la visualisation des zones affectées par l'urbanisation, ainsi que leurs quantifications. Ils peuvent amener à l'élaboration d'une cartographie actualisée du changement avec description quantitative des surfaces changées et inchangées. Une seconde procédure est intéressante peut compléter la détection du changement. Il s'agit de l'application des métriques paysagères pour mesurer et évaluer le changement spatiotemporel accompagnant la croissance spatiale des villes. Les métriques paysagères sont développées et appliquées en écologie du paysage à partir des années 80, dont la vocation initiale était l'évaluation des formes de la végétation dans les paysages naturels, pour être par la suite généralisées et appliquées dans les milieux urbains et périurbains.

Problématique

Durant ces trois dernières décennies, les villes du Bas-Sahara algérien ont subi un étalement spatial assez démesuré. Dans un contexte de fragilité saharienne, les surfaces urbaines n'ont cessé de s'accroître, en affectant de plus en plus le paysage oasien et mettant en péril leurs écosystèmes. Cette modalité contemporaine de croissances est jugée génératrice de nuisances autant sur le plan socioéconomique qu'environnemental. En plus des conséquences constatées à l'échelle globale (pollution, effet de serre, réchauffement climatique, etc.) induites par la croissance effrénée des villes contemporaines, les écosystèmes oasiens se trouvent, quant à eux, soumis aux processus d'altération déperissant progressivement leurs fonctionnements et leurs épanouissements. Les palmeraies, étant potentiel agroéconomique et régulateur bioclimatique, sont actuellement en situations préoccupantes face aux envahissements incontrôlés des tissus bâtis.

L'universalisation du développement soutenable, comme modèle de développement adopté et à mettre en œuvre à tous les niveaux, a poussé les aménageurs et les urbanistes à repenser les formes actuelles d'urbanisation. La question relative aux modèles d'aménagement les plus adaptés aux impératifs de la soutenabilité urbaine occupe une place centrale dans les réflexions portant sur la croissance des villes. Deux questions sont en effet omniprésentes : le suivi approprié de l'étalement rapide des agglomérations, et l'évaluation de ses impacts sur l'environnement. Ces questions deviennent plus préoccupantes quand il s'agit des pays en voie de développement, qui sont davantage confrontés aux problèmes relatifs à la maîtrise de l'étalement rapide et incontrôlé des villes, particulièrement dans les régions fragiles comme celles du Bas-Sahara algérien.

Dans ce contexte, le suivi de la croissance spatiale des villes oasiennes et l'évaluation de ses impacts sur les processus et le fonctionnement des écosystèmes se manifestent comme impératif nécessaire pour une planification et une gestion soutenables de l'espace oasien. La prise en compte de l'impact des nouvelles extensions urbaines sur cet environnement fragile constitue une exigence procédurale que les architectes, les aménageurs et les autres acteurs sont appelés à mettre en avant dans les futurs plans et documents d'urbanisme. La situation inquiétante que présentent les palmeraies nous a amenés à s'interroger sur les tendances actuelles d'urbanisation caractérisant les grandes villes du Bas-Sahara algérien en précisant les questions suivantes :

Questions de recherche

- Dans ce contexte d'urbanisation rapide et incontrôlée, comment caractériser les formes de croissance spatiale qui sont en cours et distinguant l'évolution des villes sahariennes ?

- Étant donné que les documents d'urbanisme et d'aménagement ne sont pas en mesure de prévoir l'ampleur de ces dynamiques spatiales non maîtrisées, comment suivre et visualiser l'étalement rapide des villes sahariennes ?
- Dans une optique de soutenabilité urbaine, comment évaluer l'impact de ces nouvelles modalités d'extension spatiale ?

Hypothèses de recherche

- Le suivi des macroformes permet de décrire les formes urbaines caractérisant la croissance des villes sahariennes qui tendent vers l'étalement au-delà des limites naturelles.
- Le recours aux moyens et outils technologiques apportés par la télédétection spatiale et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) permet d'actualiser les configurations spatiales produites et de mieux appréhender les situations environnementales engendrées.
- En conséquence de l'avancée excessive de la frange urbaine, les paysages oasiens se trouvent soumis aux processus de fragmentation spatiale menant progressivement au déséquilibre et au dysfonctionnement écologiques des oasis.

Objectifs de recherche

Notre travail de recherche consiste à mettre en évidence les tendances spatiales qui sont actuellement à l'œuvre, ainsi que l'identification des modifications altérant le fonctionnement des écosystèmes oasiens. Les principaux objectifs recherchés sont :

- ✓ Décrire les formes actuelles d'urbanisation et mettre en évidence les processus spatiaux contribuant au façonnage des configurations actuelles des grandes villes du Bas-Sahara ;
- ✓ Montrer l'utilité de la télédétection urbaine et des SIG comme des outils de visualisation, d'analyse et, *in fine*, d'aide à la décision en matière de planification et gestion spatiales, dans une optique de soutenabilité urbaine de la ville oasienne ;
- ✓ Mettre en valeur les interactions spatiotemporelles accompagnant la croissance rapide des surfaces bâties et essayer d'évaluer les transformations paysagères induites par ces évolutions.

Zone et corpus d'étude : motivation et critères de choix

La zone d'étude

La zone d'étude choisie pour effectuer notre investigation de recherche est le Bas-Sahara algérien. Cette région typiquement saharienne (Bisson, 2003 ; Côte, 2005) paraît adéquate pour l'étude du phénomène de l'étalement rapide de ville au Sahara, en raison des attributs distinctifs qu'elle présente. Parmi ses attributs, on peut citer :

- ✓ **Le poids démographique** : le Bas-Sahara est la région la plus peuplée au Sud algérien, et les plus grandes villes sahariennes sont aussi localisées dans cette région ;
- ✓ **Le statut socioéconomique** : de par les richesses fossiles qu'il enferme, le Bas-Sahara constitue un territoire stratégique sur lequel est principalement basée l'économie nationale. À ce titre, les villes du Bas-Sahara, compte tenu du statut particulier dont elles bénéficient, se trouvent en perpétuelles dynamiques de mutations socioéconomiques ;
- ✓ **L'héritage historique** : les oasis du Bas-Sahara ont depuis longtemps joué un rôle important pour dynamiser et rendre le Sahara habitable et franchi. L'urbanisation « bas-saharienne » est profondément ancrée dans l'histoire et qui est pratiquement omniprésente le long de son historique ;
- ✓ **La fragilité du milieu physique** : de véritables problèmes et risques récents, comme la remontée des eaux souterraines et les inondations, se manifestent en réaction à l'urbanisation non maîtrisée, signifiant de ce fait la fragilité des écosystèmes oasiens, dont l'équilibre et le fonctionnement naturels sont actuellement en péril. Compte tenu de ces constats alarmants, cette région a le mérite de faire l'objet de plus d'investigations scientifiques et d'une actualisation permanente de l'état de l'environnement.

Choix des villes

Compte tenu de leurs poids démographiques ainsi que leurs statuts historiques et politico-économiques, les grandes villes du Bas-Sahara algérien sont choisies pour mettre en évidence les tendances urbaines ainsi que l'évaluation des leurs macroformes produites. En se référant aux critères de classification des villes algériennes retenus dans le RGPH 2008, les grandes villes sont celles qui ont des populations dépassant le seuil de 100 000 habitants, et ayant accédé au moins à la strate de l'« Urbain Supérieur US » (ONS, 2011). Selon cette classification, quatre grandes villes oasiennes se trouvent susceptibles d'être retenues. Ces villes sont : Biskra (chef-lieu de wilaya et microcapitale du pays des Ziban) ; Ouargla (chef-lieu de wilaya et microcapitale du pays d'Oued Mya) ; El Oued (chef-lieu de wilaya et microcapitale du pays de l'Oued Souf) ; Touggourt (chef-lieu de Daïra et microcapitale du pays de l'Oued Mya).

Un second critère d'ordre morphologique a fait excepter la ville d'El Oued de faire partie du corpus d'étude. La comparabilité des villes nécessite la présence d'une similitude en matière de configuration des oasis, notamment les formes des palmeraies. Les villes de Biskra, Ouargla et Touggourt ont des palmeraies regroupées avec des formes relativement agrégées : « palmeraie d'un seul tenant » selon Marc Côte (2012). En revanche, la ville d'El Oued, avec l'éparpillement de ces

Ghouts, n'est pas dans le même alignement en cette occurrence, ce qui nous amène à ne pas la retenir dans le corpus d'étude.

Positionnement épistémologique de la thèse

Le concept de soutenabilité urbaine évoqué dans la présente étude, sans aller plus loin dans les considérations étymologiques¹, découle des propos évoqués depuis les années 60 notamment par les partisans de l'environnement, portant sur la réduction des coûts environnementaux du développement urbain, et qui ont abouti à l'officialisation du paradigme du « développement durable » présenté dans le rapport de la commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, qui est intitulé « Notre Avenir à Tous (*Our Common Future*) » (Brundtland, 1987). La ville, la plus grande entité artificielle, est au cœur de ces réflexions. Elle peut contribuer considérablement à la durabilité urbaine : « *la ville n'est pas durable, mais elle peut contribuer à la durabilité* » (Da Cunha, 2005). En matière d'aménagement urbain, l'enjeu primordial est de proposer des formes urbaines plus conciliantes avec l'environnement : « *Urban form have strong but complex link with sustainable development* » (Biswas, s. d.). L'implication dans cette optique fait appel à la morphologie urbaine qui permet en premier lieu la description des formes urbaines, perçues comme résultantes de l'interaction de l'activité humaine avec l'environnement physique et naturel, pour pouvoir passer en second lieu à la caractérisation et l'évaluation environnementale à travers des indicateurs mesurables.

Notre étude consiste à la compréhension des transformations spatiales induites par l'urbanisation accélérée et l'évaluation de ces effets accompagnants. Les régions fragiles sont plus affectées par ce phénomène d'urbanisation galopante, notamment dans les pays en voies de développement. Les milieux oasiens appartiennent à cette catégorie. L'urbanisation est plus accentuée dans ses territoires sahariens dont les contraintes géographiques et environnementales pèsent plus. Les études portant sur l'amplitude de l'urbanisation et les mutations morphologiques et socioéconomiques accompagnantes sont nombreuses (Alkama, 2005a ; Belguidoum, 2005 ; Côte, 1998b, 2005, 2012 ; Jouve et Jouve, 2012 ; Kouzmine, 2012 ; Kouzmine et Fontaine, 2018). Le suivi de l'artificialisation des espaces naturels et la compréhension des formes d'urbanisation et leurs effets sur les écosystèmes oasiens ne figurent pas cependant en explorant la littérature scientifique concernée par ces milieux comme par ailleurs (Alberti, 2008 ; Alberti et al., 2007 ; Wentz et al., 2018). Les aspects écologiques sont moins considérés autant chez les chercheurs que chez les praticiens de l'urbanisme et de

¹ La littérature anglo-saxonne utilise le concept de *sustainable development*, à la différence de la littérature francophone où l'on trouve plusieurs équivalents : développement durable, développement soutenable, et développement viable. Les deux premières traductions sont les plus courantes. Mais les écologistes utilisent couramment celui du développement soutenable qui renvoie davantage aux considérations environnementales relatives à la réduction de l'empreinte écologique de l'activité humaine, et à la mise en avant de la préservation et la promotion de l'environnement dans les projets collectifs et individuels de développement urbain.

l'aménagement (Armand, 2016 ; Bendjelid et al., 2018 ; CNES, 2002 ; Côte, 2012 ; Hamdi-Aissa et Girard, 2004 ; Hammache, 2015 ; Kouzmine, 2012 ; Otmane et Kouzmine, 2011). La protection et la promotion du potentiel oasien ne peuvent être envisagées qu'à travers la prise en compte des considérations écologiques particulières qui se diffèrent d'un milieu à un autre (Ahern, 2013 ; Andersson, 2006 ; Osmond et Pelleri, 2017 ; Wu, 2010, 2014).

La présente étude s'inscrit dans cette optique. Elle consiste, à travers une approche spatiale, en considérant les formes étudiées comme résultante de l'interaction de l'activité humaine avec l'environnement physique et naturel, à caractériser les différentes formes d'urbanisation en mettant en relation l'évolution des surfaces urbanisées avec les transformations spatiotemporelles affectant les paysages oasiens. La finalité est double : d'une part, tenter de mettre en lumière les rapports entre formes urbaines et processus écologiques ; d'autre part, montrer l'utilité conceptuelle et méthodologique que présente l'écologie du paysage urbain pour la compréhension et l'évaluation des dynamiques spatiotemporelles affectant les écosystèmes oasiens.

L'analyse conceptuelle

L'état de l'art sera focalisé sur l'étude des principaux concepts soulevés précédemment dans les hypothèses retenues. Toutefois, quatre concepts clés seront retenus pour l'élaboration d'une analyse conceptuelle exhaustive qui permettra de mieux cadrer les différentes dimensions et représentations qui s'y rattachent.

- 1) **La macroforme urbaine**, étant une dimension morphologique représentant la forme globale de l'agglomération et permettant sa qualification, mérite d'être étudiée en recherchant les éléments liés à sa formation ainsi que les différentes actions entreprises pour remodeler les macroformes des villes dans une perspective de soutenabilité urbaine.
- 2) **Le paysage urbain**, étant un niveau spatial d'étude permettant l'appréhension des formes spatiotemporelles produites par l'activité naturelle et anthropique, sera mis en évidence en faisant recours à l'écologie du paysage urbain comme discipline portant sur la description des formes et des structures caractérisant les paysages.
- 3) **La télédétection urbaine** comme un domaine offrant de considérables outils techniques et méthodologiques permettant l'acquisition, le traitement et l'analyse de l'information spatiale. Cet outil est nécessaire pour assurer un suivi actualisé de l'évolution spatiale des villes ainsi que leurs cartographies et leurs quantifications.
- 4) **La Détection du Changement (DC) et les métriques paysagères** comme outils techniques et méthodologiques largement appliquées pour l'étude et le suivi des structures urbaines et paysagères.

Méthodologie

Le présent travail de recherche consiste à la compréhension et à l'évaluation des dynamiques spatiotemporelles caractérisant les grandes villes du Bas-Sahara algérien, dans une perspective de soutenabilité oasienne qui prend en compte les spécificités écosystémiques et paysagères locales. Investir sur le suivi des formes urbaines et leurs interactions avec l'environnement, qui sont complexes, multiéchelle, et de natures variées, nécessite tout d'abord une recherche théorique portant sur l'analyse des concepts et de l'état de l'art, à partir duquel sera par la suite établie le choix méthodologique et l'analyse du corpus d'étude. Dans ce sens, notre thèse est conçue en deux parties :

La partie théorique

Cette partie constitue le support théorique des concepts énoncés précédemment. Elle est basée sur une analyse conceptuelle des hypothèses à travers une revue de littérature afin de mieux comprendre le phénomène de l'étalement urbain et les macroformes produites. Les sources bibliographiques sont très variées dans la mesure où nous avons essayé de consulter le maximum d'ouvrages, articles, mémoires et thèses ayant traité ce thème. Certains sites et documents sur Internet nous ont ainsi aidés dans ce travail de recherche.

La partie analytique

Ce volet pratique consiste à la vérification des hypothèses en se procédant à l'analyse du corpus d'étude et en faisant référence aux outils et théories de recherche développés dans la première partie. Cette deuxième partie analytique est elle-même organisée en deux paliers, dont chacun se rapporte à la confirmation ou l'infirmité de l'une des hypothèses évoquées précédemment.

- En ce qui concerne la première hypothèse, l'analyse des tendances urbaines doit toucher les deux aspects qui sont associés à cette sorte de dynamique évolutive : l'aspect démographique, en suivant l'évolution de la population urbaine ; et l'aspect morphologique, en mettant en valeur les formes spatiotemporelles traduisant l'étalement des grandes villes du Bas-Sahara algérien. Cette partie d'analyse est basée sur deux techniques principales d'investigation :
- La technique d'enquête sur les documents linéaires (recensements généraux de la population et de l'habitat RGPH), des statistiques administratives fournies par les directions locales concernées, ainsi que les données statistiques collectées à partir des études académiques et professionnelles antérieures ;

- La technique de l'observation sur terrain et dans les documents graphiques à deux dimensions, en faisant recours aux sources satellitales et cartographiques : imagerie satellitale multitudes, photographie aérienne, cartes topographiques, plans parcellaires, etc ;
- La manipulation et le traitement des données acquises seront opérés au moyen des Systèmes d'Information Géographique (SIG), notamment le logiciel QGIS.
- Quant à la vérification de la deuxième hypothèse correspondant à la mesure des métriques paysagères et l'évaluation des formes urbaines produites, l'analyse est en partie basée sur les résultats du premier volet d'analyse, notamment la cartographie thématique générée à la suite de la classification des images satellites. Les cartes thématiques obtenues serviront comme données d'entrée pour le calcul des métriques paysagères. Les modèles de calcul SIG demeurent toujours l'outil méthodologique d'investigation, mais cette fois-ci ça sera l'utilisation du logiciel FRAGSTAT (McGarigal et al., 2012) pour effectuer le calcul des métriques paysagères.

Structure de la thèse

La présente thèse est donc structurée en deux parties, dont chaque partie est constituée de quatre chapitres :

Chapitre I : intitulé « La macroforme urbaine entre compacité et étalement urbain : quel paradigme pour une soutenabilité urbaine ? ». Ce chapitre portera sur la Macroforme urbaine comme dimension globale et niveau d'analyse permettant la description des formes des villes et de leurs évolutions, ainsi que la compréhension des interactions avec leurs environnements. Les concepts de compacité et étalement urbain seront abordés à une échelle plus globale, celle de la macroforme. Après l'exposé d'un bref historique sur l'évolution des formes urbaines, des éléments conceptuels liés à l'étude des macroformes et à leurs qualifications seront abordés en premier lieu. Par la suite, la recherche sera focalisée sur l'influence de la macroforme sur la soutenabilité urbaine, avec discussion de quelques réflexions et alternatives versant dans cette optique de développement urbain soutenable.

Chapitre II : intitulé « Une approche écologique de la soutenabilité urbaine : les apports de l'écologie du paysage urbain ». Ce chapitre portera sur la vision de l'écologie du paysage urbain en ce qui concerne la croissance des villes. L'écologie du paysage urbain offre un cadre conceptuel et méthodologique permettant la compréhension et l'évaluation des dynamiques de croissance spatiale des zones urbaines. Les principaux concepts abordés dans ce chapitre sont : paysage urbain, biodiversité, habitat naturel, continuité écologique et fragmentation paysagère. Ces concepts sont souvent mis en avant pour l'évaluation et la qualification des territoires urbanisés.

Chapitre III : intitulé « La télédétection urbaine comme outil de suivi et d'évaluation des dynamiques spatiales dans les villes ». Ce chapitre portera sur la télédétection spatiale comme un outil d'aide à la compréhension et à l'analyse des dynamiques urbaines, notamment la croissance spatiale. On essayera d'exposer quelques éléments de définition et quelques repères historiques relatifs à l'application de cet outil sur les milieux urbains et périurbains, puis des aspects méthodologiques relatifs à l'extraction et l'interprétation de l'information spatiale seront abordés. Au final, l'utilité de la télédétection urbaine dans les différents domaines portant sur la ville sera mise en évidence en essayant de présenter les différentes applications cartographiques et analytiques liées à la planification et la gestion urbaines.

Chapitre IV : intitulé « Détection et évaluation spatiales des formes d'urbanisation : application des méthodes de détection du changement (DC) et des métriques paysagères ». Ce chapitre est d'ordre méthodologique. Il portera principalement sur l'exposé des méthodes issues de l'écologie du paysage urbain et qui sont principalement basées sur la télédétection spatiale. L'étude sera focalisée sur les modèles de détection du changement spatiotemporel et l'examen des métriques paysagères comme indicateurs de quantification et d'évaluation des formes d'urbanisation.

Chapitre V : intitulé « Le Sahara algérien : un environnement désertique, mais vecteur de développement : contexte géomorphologique et environnemental ». C'est un chapitre introductif consacré à la présentation de notre contexte d'étude qui est le Bas-Sahara algérien dans une lecture globale et régionale. Les structures urbaines et oasiennes, leurs particularités environnementales, historiques et socioéconomiques seront recherchées afin de pouvoir cerner les spécificités à prendre en compte dans l'analyse de notre corpus d'étude (Biskra, Ouargla et Touggourt).

Chapitre VI : intitulé « Une urbanisation qui pèse sur un environnement fragile : analyse socioéconomique et environnementale ». Ce chapitre sera consacré à l'étude des dynamiques d'urbanisation caractérisant le Sahara algérien et plus particulièrement la région du Bas-Sahara depuis l'indépendance, ainsi que les problèmes environnementaux accompagnants, en essayant de mettre en évidence la vulnérabilité que présentent les villes sahariennes face aux risques naturels.

Chapitre VII : intitulé « Cartographie spatiotemporelle et évaluation des formes d'urbanisation des grandes villes du Bas-Sahara algérien : application de la télédétection spatiale et les techniques de Détection du Changement ». Un autre aspect analytique sera abordé dans ce chapitre. IL s'agit de l'application du modèle de Détection du Changement (DC) à partir des images satellitaires multitudes Landsat. L'objectif de ce chapitre est double : d'une part, l'établissement d'une cartographie de changement visualisant l'évolution spatiotemporelle des villes de notre corpus d'étude ; d'autre part, quantifier cette croissance spatiale afin de se rendre compte de ses répercussions sur les palmeraies.

Chapitre VIII : intitulé « Quantification et métriques spatiales des formes d'urbanisation caractérisant les grandes villes du Bas-Sahara algérien : application des métriques paysagères ». À partir des résultats du chapitre précédent, ce dernier chapitre analytique consiste en l'application des métriques paysagères pour caractériser les configurations paysagères produites à chaque étape d'évolution à travers le calcul des indices retenus pour cette étude, qui nous permettront, dans une analyse corrélative, la mesure puis l'évaluation des impacts des différentes formes urbaines caractérisant chaque ville.

La conclusion générale : notre travail de recherche sera couronné par des éléments de conclusion en synthétisant des points de vues découlant directement des résultats de la recherche, ainsi que quelques éléments de réflexions présentant les limites de la présente recherche et des perspectives d'investigations futures.

PARTIE THÉORIQUE

Chapitre I. La Macroforme entre compacité et étalement morphologique : quel paradigme pour une soutenabilité urbaine ?

Introduction

Au fil du temps, les villes n'ont cessé de s'accroître pour intégrer de nouvelles surfaces urbaines. Les rythmes et les formes de la croissance urbaine sont généralement liés aux conditions socioéconomiques et aux progrès techniques caractérisant chaque époque historique. L'avènement récent de l'urbanisation et des mobilités a conduit à l'éclatement des villes et à l'apparition de configurations urbaines plus complexes. La ville est passée du modèle historique compacte ou pédestre au modèle contemporain étalé ou motorisé. Mais cette forme inédite de développement urbain n'est pas passive, compte tenu des coûts socioéconomiques et environnementaux assez lourds et qui pèsent de plus en plus sur l'équilibre de notre biosphère.

Avec l'universalisation du développement durable, la morphologie urbaine a gagné plus d'attrait. Plusieurs travaux ont pu mettre en évidence l'influence de la forme urbaine sur le comportement des villes de point de vue de soutenabilité urbaine. La macroforme est une dimension morphologique représentant la forme globale de la ville. En morphologie urbaine, l'étude de la macroforme est une manière faisable et connue pour caractériser l'étalement ou la compacité d'une ville. À ce niveau d'analyse, l'échelle de lecture est celle de la tache urbaine dont l'allure du périmètre urbain et des limites du bâti sont à mettre en avant. L'interaction entre la ville et son environnement physique et naturel peut être aussi étudiée et évaluée à cette échelle.

Ce chapitre portera sur la macroforme urbaine comme dimension globale et niveau d'analyse permettant la description des formes des villes et de leurs évolutions, ainsi que la compréhension des interactions avec leurs environnements. Les concepts de compacité et étalement urbain seront abordés à une échelle plus globale, celle de la macroforme. Ce chapitre est structuré en quatre sections. En premier lieu, nous essayerons d'exposer un bref historique sur l'évolution des formes urbaines depuis l'apparition des premières générations de villes. En second lieu, nous tenterons d'exposer quelques éléments conceptuels liés à l'étude des macroformes et à leurs qualifications. La question de la soutenabilité urbaine et les différentes tendances et alternatives visant la réduction de l'impact de la croissance urbaine sur l'environnement seront abordées en troisième lieu. Au final, nous essayerons d'étudier l'impact des différentes formes urbaines à fin de comprendre les opportunités et les faiblesses que peut présenter chacune de ces formes.

I.1. La question des modalités de la croissance urbaine

Durant ces cinq dernières décennies, l'étalement urbain est constaté le modèle marquant la croissance des villes (Allain, 2010 ; Bessy, 2000). Les rapports entretenus pendant longtemps entre la ville et son espace se trouvent actuellement bouleversés en conséquence de cette modalité inédite de croissance spatiale. Les zones urbaines ne cessent pas de s'étendre générant de ce fait de nouvelles configurations spatiales plus complexes que jamais. Les espaces urbains produits récemment sont qualifiés comme amorphes ou plutôt sans formes (Frankhauser, 2005). Les dynamiques d'étalement urbain ont conduit à la réorganisation des territoires ou l'explosion de la mobilité en est un moteur principal poussant de plus en plus le déploiement des concentrations démographiques et des activités urbaines : « *dans un contexte de mobilité généralisée de tous les acteurs de la ville, ce mouvement de desserrement des populations et des établissements économiques s'est accompagné de réorganisations profondes des territoires urbains, en matière de planification des transports, de stratégies résidentielles des ménages et de stratégies d'implantation des entreprises, de cadre de vie et d'environnement* » (Guérois, 2003).

La question des modalités d'extension des zones urbaines occupe une place centrale dans les débats portant sur le devenir des villes, notamment en réponse aux impératives véhiculées par le développement durable. Les aménageurs, les urbanistes, les géographes, les architectes et les autres acteurs de la ville sont appelés à penser la forme urbaine dans toutes actions d'aménagement et de planification spatiales. L'approche morphologique se présente donc comme une clé de compréhension et d'évaluation des formes urbaines produites et à produire dans le futur sans pour autant négliger l'approche fonctionnelle de l'espace urbain. La compréhension et la mesure des formes produites amènent à mettre en privilège la première approche : « *nous vivons dans un univers de formes, et de formes colorées ; c'est par les formes que nous saisissons les fonctions* » (Pinchemel, 1999). La morphologie urbaine s'intéresse à la dimension physique de la ville. Elle permet donc de décrire et de caractériser la forme urbaine à différentes échelles. À une échelle globale, la forme urbaine se rapporte à la macroforme (Allain, 2004). Une lecture historique de l'évolution des villes permet d'appréhender les différents modes de croissance urbaine et de cerner les différentes macroformes produites à chaque époque historique.

I.2. De la cité compacte à la ville étalée : regard historique sur l'évolution des formes urbaines

Depuis leurs naissances, les centres urbains n'ont cessé de s'étendre pour intégrer de nouvelles surfaces en réponse aux besoins croissants des populations citadines et de leurs activités. Les premières générations de villes, celles qui remontent à la période antique, avaient comme fonction

principale la concrétisation du pouvoir politique. Des bâtiments publics et religieux et des espaces palatiaux, fortifiés par des remparts défensifs se furent figurés pour cette finalité. L'espace urbain était bien délimité, dont la forme est définie par le tracé des murs d'enceinte. La compacité morphologique est un caractère commun des villes historiques, avec des formes géométriques simples souvent façonnées par la topographie du site d'implantation qui, lui-même, occupe des positions élevées pour des raisons de protection et de dominance territoriale (Mumford, 1964).

I.2.1. Les villes antiques et médiévales : des formes autolimitées de densification spatiale

L'édification des enceintes a fait de l'espace urbain une entité spatiale nettement délimitée. L'étendue spatiale de la cité est ainsi influencée par le mode originel de déplacement qui est la marche à pied : « *il est alors évident que le seuil critique d'extension de la ville soit assez bas dans les premiers temps* » (Enault, 2003). Les futures extensions urbaines sont préalablement prévues lors de l'implantation des murs d'enceinte. La croissance spatiale dépend de la croissance naturelle de la population et des besoins fonctionnels et résidentiels qui l'accompagnent. Ce mode de densification est à l'origine de l'invention architecturale et de développement de techniques constructives permettant la construction en étages.

La croissance spatiale des cités gréco-romaines est caractérisée par son aspect volontariste. À travers les murs de rempart, la forme et les limites de l'espace urbain sont bien définies. Le long de cette époque, la taille de la cité est dictée par les capacités en ressources alimentaires et de subsistance que peut assurer la campagne. Une croissance supplémentaire peut conduire à un déséquilibre alimentaire et même sécuritaire. Raison pour laquelle les Grecs optaient pour la création de nouvelles cités au lieu de surdensifier des cités déjà saturées. Les villes mères avaient plus d'opportunités politiques et économiques, ce qui leur permettait d'abriter des populations très importantes : « *On estime que les progrès architecturaux ainsi que l'amélioration de l'hygiène ont permis d'atteindre 80 000 à 100 000 habitants pour un grand nombre de cités* » (Enault, 2003).

L'époque médiévale est marquée par le déclin des villes romaines, à partir du III^e siècle, laissant place à l'émergence des villes islamiques, à un autre modèle de particularité orientale. L'espace urbain est de forme nettement définie par le tracé du mur d'enceinte. Le tissu urbain est compact de forme radioconcentrique organisée autour d'une mosquée centrale et structurée en rues et ruelles souvent étroites et sinueuses. L'essor et le déclin des villes-mères sont souvent liés à la succession des empires et d'états islamiques (Damas, Bagdad, Curitiba, Marrakech, Fès, Le Caire ...). La période de la renaissance a connu un retour des villes occidentales, mais avec plus d'attractivité des populations et plus de densifications urbaines à l'intérieur des remparts. La saturation des noyaux *intramuros* aurait conduit à l'apparition des premiers faubourgs au-delà des limites initiales, ce qui

fait appel à la construction d'une nouvelle enceinte pour un premier élargissement de l'espace urbain. La succession des extensions spatiales fait ainsi appel à de nouveaux élargissements des cités par l'établissement de nouveaux murs d'enceinte et la démolition des anciennes limites déjà franchies. Pour certains auteurs, cette évolution signifie la fin d'un cycle urbain et le déclenchement d'un nouveau cycle de croissance spatiale (figure V-1).

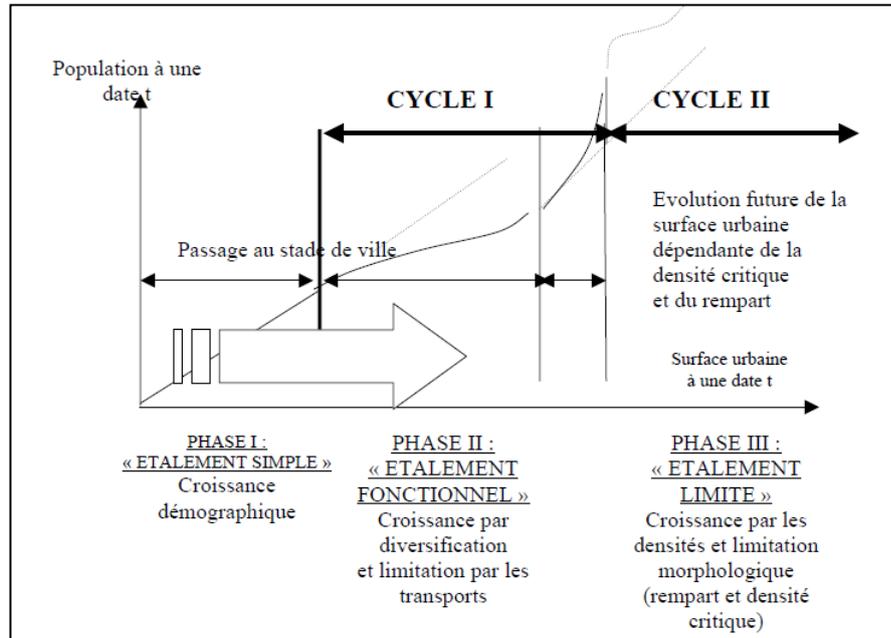


Figure I-1 : Les différentes formes d'étalement de la cité historique

Source : (Enault, 2003)

I.2.2. La croissance de la ville industrielle : le passage au *Tracked city*

L'industrialisation des processus de production au XIXe siècle a marqué un important tournant dans l'histoire des villes tant sur le plan démographique que sur le plan morphologique. L'urbanisation s'est manifestée d'une manière brutale. Le nombre de villes dépassant les 100 000 habitants a considérablement évolué. Au XVIIIe siècle, on compte que 5 villes, puis 65 en 1800 et 300 en 1900. Entre 1875 et 1900, les villes millionnaires sont augmentées de 6 (Londres, Paris, New York, Vienne, Pékin et Berlin) à 16 villes. La croissance spatiale des villes s'est ainsi amplifiée avec rythme plus accéléré, particulièrement autour des noyaux médiévaux.

Deux tendances urbaines s'opposent en conséquence de l'explosion démographique : d'un côté, une propagation des quartiers ouvriers en densifiant les centres historiques et les faubourgs avoisinants dans des conditions de viabilité et d'hygiène dégradées ; d'un autre côté, une suburbanisation commence à se déployer par les familles aisées qui cherche à s'installer loin des centres ennoyés.

L'évolution des moyens de transport, notamment le chemin de fer constituait ainsi une force motrice alimentant l'éclatement des villes. Dès lors, les nouvelles formes urbaines se trouvent conditionnées par la configuration des lignes de transport. Cette phase historique est considérée comme phase charnière connaissant le passage de la ville médiévale pédestre (*Walker city*) à la ville du chemin de fer (*Tracked city*).

Parmi les politiques urbaines les plus répandues qui ont été mises en place pour absorber l'entassement des villes postindustrielles, on trouve celles des villes nouvelles et les lotissements pavillonnaires implantés en périphéries de villes (Dumont et Hellier, 2010 ; Wieczorek, 1981). La généralisation de ces programmes avait comme aboutissement la fragmentation des tissus urbains et l'apparition des cités dortoirs en périphérie des villes-centres (Vadelorge, 2005). Ces dispositifs sont jugés parmi les forces motrices amplifiant l'étalement des villes et la fragmentation de l'espace urbain (Guérois, 2003).

I.2.3. La ville de l'après 2^{ème} guerre mondiale : le passage à la ville motorisée

Depuis 1950, l'urbanisation s'est manifestée comme la tendance la plus marquante. La population mondiale tend à être progressivement urbaine. L'urbanisation renvoie à l'augmentation de la part de la population habitant les villes par rapport à la population globale. Spatialement, cette urbanisation démesurée s'est traduite par des formes fragmentées qui renvoient toutes à l'instauration l'étalement urbain (suburbanisation, périurbanisation, ville diffuse, etc.), comme l'indique Allain (2004) : « *Banlieue, espace suburbain, périurbain ou rurbain, ville diffuse, ville éparpillée, ville émergente, exopolis, edge-cities, boomburbs, new burbs, superburbs : les mots et néologismes ne manquent pas pour qualifier l'étalement de la ville contemporaine* ».

Les dispositifs financiers et administratifs facilitant l'accès à la propriété individuelle associé au développement de l'industrie automobile ont poussé l'avènement d'un nouveau mode de vie urbaine dont le lieu d'hébergement et celui du travail sont bien éloignés avec navette continue « domicile-travail » en sont ses principaux traits. La disponibilité de la voiture personnelle a permis aux familles de choisir de s'installer en périphéries loin des centres-villes. La réduction du temps d'accès aux centres-villes avec les faveurs foncières et fiscales offertes par les périphériques communes a balancé l'arbitrage budget/taux d'accès (Halleux et al., 2002). Ces faveurs ont poussé les habitants des villes de privilégier la possession d'une habitation, en profitant des aménités vertes et paysagères en proximité de la campagne et de faire la navette domicile-travail pour rejoindre les lieux de travail et de services au centre-ville. Les responsables de l'aménagement urbain se sont aussi orientés vers la création et l'aménagement de nouvelles zones urbanisables en périphéries des villes (Allain, 2004). Ce mouvement de desserrement des populations et des activités a en premier lieu caractérisé les villes

occidentales pour devenir par la suite le mode dominant à l'échelle mondiale avec écarts temporels et variation de formes (Antoni, 2010 ; Simard, 2014).

Les villes sont passées des cités compactes aux villes contemporaines étalées. On parle parfois d'un passage de la cité d'état à l'agglomération (Enault, 2003). Les formes urbaines résultantes de l'étalement urbain sont constituées de plusieurs fragments avec multitude de configurations spatiales selon les particularités géographiques et socioéconomiques distinguant chaque région. À partir des années 1970, la croissance spatiale augmente plus que la croissance de la population. Les lotissements résidentiels occupent des parts plus importantes que l'habitat collectif. Les lieux résidentiels et les lieux de travail deviennent plus éloignés, ce qui augmente la dépendance automobile. La mobilité motorisée domine, provoquant au fur et à mesure l'allongement et l'étirement des formes urbaines le long des axes de transport.

I.3. Les formes de l'étalement urbain

Il est évident donc que l'étalement urbain correspond à un modèle particulier de développement, et que « *toute forme de croissance urbaine n'est pas forcément synonyme d'étalement urbain* » (Hoffhine Wilson et al., 2003). Plusieurs auteurs ont essayé d'englober les différentes variantes de l'étalement urbain en proposant une typologie de formes d'urbanisation. Barcelo et Trépanier (1999) définissent trois formes spatiales désignant l'étalement urbain à savoir la croissance linéaire, essentiellement commerciale, qui s'étale le long des axes de transport, la croissance discontinue (sporadique) en saute de mouton, et les vastes étendues périphériques de caractère monofonctionnel, souvent à vocation résidentielle. Galster et al. (2001) propose une typologie plus élargie basée sur la quantification de huit dimensions morphologiques permettant la qualification de la forme urbaine. Ces dimensions sont : la densité, la continuité, la concentration, le groupement, la centralité, la nucléarité (les noyaux), la mixité d'utilisation du sol, et la proximité. Chaque dimension se rapporte à un continuum de valeurs dont chacune correspond à une des images de l'étalement urbain. En se basant sur cette conception, Batty et al., (2003) propose de distinguer cinq formes d'étalement urbain : un développement compact, un développement éparpillé, un développement linéaire, un développement polynucléaire, et un développement en saute de mouton (figure I-2).

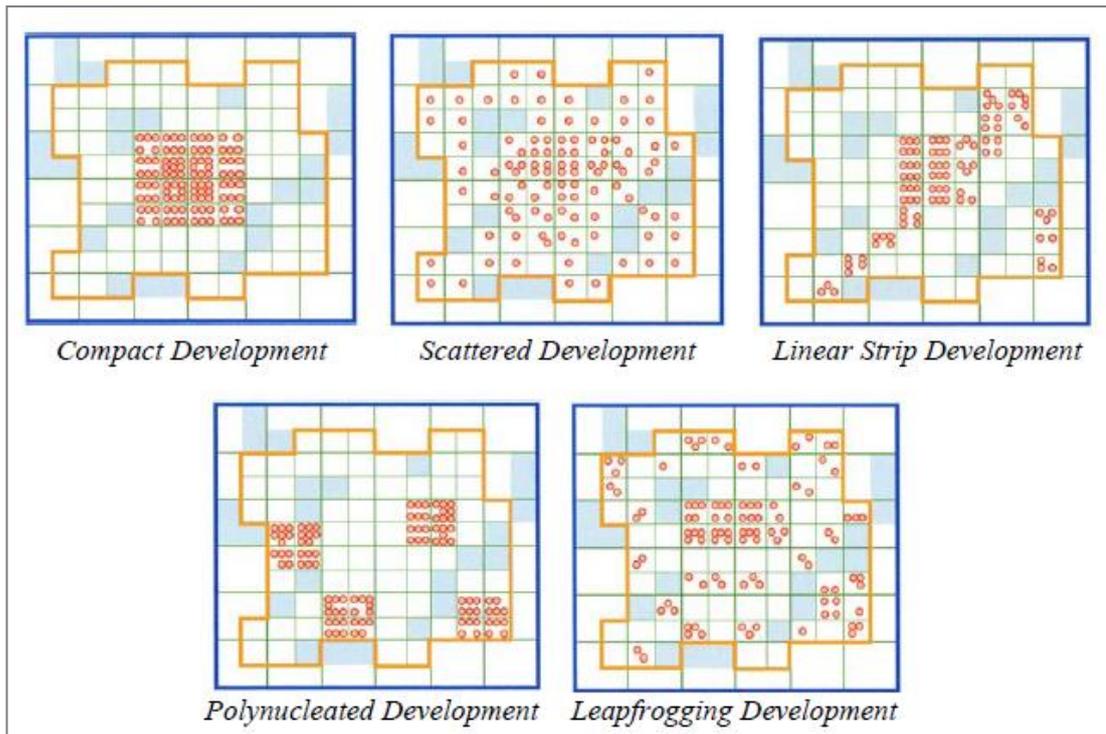


Figure I-2: Formes de l'étalement urbain

Source : (Galster et al., 2001, d'après Batty et al., 2003)

I.3.1. L'étalement urbain en Algérie

À la suite des traces d'urbanisation héritée de la période coloniale, les villes algériennes ont connu un extraordinaire entassement urbain, conséquence de l'explosion démographique due à la croissance naturelle et au fort exode rural, renforcée par des politiques de développement privilégiant l'essor urbain (Boukhemis et al., 1990). La forte croissance démographique qui a marqué les deux premières décennies de l'Algérie indépendante s'est accompagnée d'un exode rural et de flux migratoires importants; ces deux facteurs ont principalement entraîné un accroissement considérable de la population urbaine et une densification du système urbain algérien. Cette croissance urbaine va être plus rapide et orientée également vers les petites et les moyennes agglomérations d'une façon brutale et mal contrôlée (CNES, 2002 ; ONS, 2011). L'étalement urbain, processus d'extension spatiale fragmentée des centres urbains, marque le développement urbain en Algérie depuis les années 70.

I.3.1.1. Une croissance urbaine rapide et mal contrôlée

À l'image des pays nouvellement indépendants, l'Algérie a connu un mouvement inédit en matière de croissance urbaine, particulièrement durant ces trois dernières décennies. Cette croissance urbaine s'est développée de manière brutale et elle continue de suivre des allures montantes jusqu'à nos jours (Milles, 2013 ; ONS, 2011). En effet, les politiques économiques favorisant le fait urbain conjuguées

à un accroissement démographique très important ont engendré des dynamiques démesurées d'urbanisation traduites par une augmentation rapide de la population urbaine par rapport à la population rurale et un nombre croissant des communes urbaines par rapport aux communes rurales (figure I-3).

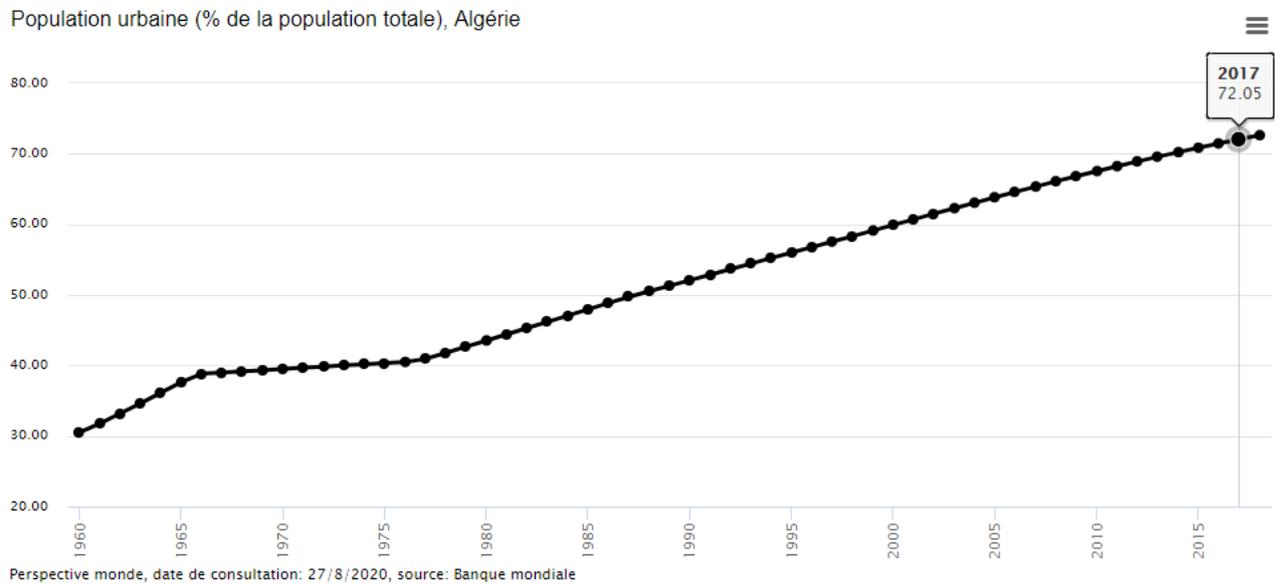


Figure I-3 : Évolution de la population urbaine en Algérie (1960 – 2017)

Source : (la Banque Mondiale, 2020)

I.3.1.2. Une croissance spatiale démesurée et mal gérée

Dans ce contexte d'urbanisation effrénée, les villes se trouvent soumises aux processus accélérés d'étalement de leurs périmètres urbains. Les politiques urbaines mis en œuvre pour répondre aux besoins sociaux croissants des populations arrivantes n'étaient pas suffisamment adéquates, ce qui a permis l'émergence des dynamiques spontanées de croissances spatiales. Les villes n'ont pas pu échapper des processus incontrôlés d'étalements spatiaux. Ce qui va aboutir par la suite à la production de paysages amorphes, difficile à appréhender et à gérer. Sur ce point, le rapport du CNES (1998) confirme que : « *De nombreuses villes ont vu ainsi leur superficie se multiplier par 5 en moins de 30 ans. Cette rupture avec les centres anciens a été accentuée par une architecture répétitive monotone mettant en évidence l'existence de deux formes urbaines qui coexistent non complémentaires, celle des anciens tissus et celle des nouvelles urbanisations.* ». Cette croissance se développe et s'amplifie au détriment du potentiel agricole périurbain d'où l'ensemble des terres consommées par l'urbanisation depuis l'indépendance s'élèverait, d'après le ministère de l'Agriculture, à 80 000 hectares, dont 10 000 de terres irriguées (Côte, 1993). Il est également à mentionner que cette croissance démesurée et sans logique d'organisation spatiale, est génératrice

de surcoûts de viabilisation et de fonctionnement que ni l'État, et encore moins la collectivité n'ont été en mesure de prendre en charge (Boumedine, 2013).

En Algérie, durant les dernières décennies, nos villes subissaient une explosion spatiale démesurée traduite par un débordement et une diffusion de l'urbanisation sur le territoire rural et désertique. L'habitat spontané constitue aussi un facteur essentiel contribuant à l'amplification des extensions spatiales incontrôlées des villes et à l'accélération de l'urbanisation en Algérie (Brahimi, 1994 ; Mennour et Guessoum, 2018). Ainsi, la politique de zoning adoptée dans les différents instruments d'urbanisme peut être considérée comme deuxième facteur motivant de ces tendances. : « *La pratique du zoning – plaquant ici une ZHUN, là un grand équipement, ailleurs une zone industrielle ou un lotissement – crée un cadre rigide et dissocie les fonctions urbaines. Le programme des ZHUN, qui visait à bâtir des ensembles de logement dotés de tous les services crée de pseudo-villes nouvelles, mal intégrées à la ville ancienne, standardisées à l'aspect jamais achevé. La politique de construction sur les périphérie urbaine -80% des programmes d'habitat durant la dernière décennie ont été réalisés en site vierge contribue à étendre démesurément les déplacements urbains, à entamer dès aujourd'hui les réserves foncières programmées pour demain, à accroître la consommation des terres agricoles.* » (Côte, 1993).

En somme, et selon le CNES (1998), la ville algérienne qui « *représente en quelque sorte la projection des contrastes et des conflits de la société d'aujourd'hui* » se distingue par : un espace urbain global désarticulé formant une mosaïque sociospatiale presque sans unité ; il s'agit là d'un paysage fragmenté constitué de deux bandes parallèles et opposées : le volontariste étatique et le populaire spontané (Dechaicha, 2013).

I.4. La macroforme comme échelle d'analyse de l'étalement urbain

L'étude de la macroforme est une manière faisable pour caractériser l'étalement ou la compacité d'une ville. À ce niveau d'analyse, l'échelle de lecture est celle de la tache urbaine dont l'allure du périmètre urbain et des limites du bâti sont mis en avant (Guérois, 2003). En matière d'occupation du sol, l'intensité et le niveau d'agrégation des surfaces bâties peuvent ainsi être abordés. À ce niveau aussi, la forme urbaine peut être caractérisée par la description de la configuration spatiale en mettant en valeur le rapport entre formes d'utilisation du sol et configuration du réseau de transport. L'interaction entre la ville et son environnement physique et naturel peut être, dans une autre perspective, étudiée et évaluée. Le suivi de l'évolution historique de la tache urbaine permet de comprendre les transformations spatiotemporelles accompagnant cette évolution. Le paysage, ici, est une notion basique présentant le support sur lequel se développent les interactions spatiales et fonctionnelles entre les différentes taches composant le territoire. L'étude de la macroforme urbaine

s'appuie sur les documents cartographiques pour la visualisation et l'identification des zones baies. Les cartes topographiques aux échelles intermédiaires (1/50 000, 1/25000, etc.) sont souvent mobilisées. Avec la généralisation de la télédétection spatiale, les images satellites ont pris un rôle incontournable dans cette sorte d'études. Ce type de supports numériques offre la possibilité d'avoir des vue synthétiques de la macroforme, de sa configuration spatiale, de sa structure, du rythme et des modes de croissance des surfaces bâties. Il permet également de visualiser l'impact des grandes opérations d'aménagement et d'urbanisme comme l'implantation des infrastructures de transport, des zones résidentielles et des zones d'activités. La mesure et la caractérisation morphologique fait appel aux indicateurs morphologiques. Le choix des indicateurs dépend d'un côté de l'objectif de l'étude et, d'un autre coté, de la disponibilité des données spatiales et des outils méthodologiques. Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) présentent en effet des outils efficaces permettant la cartographie et l'analyse des macroformes urbaines. Les données récoltées sur terrain sont nécessaires pour la validation cartographique et l'accomplissement de données manquantes (Allain, 2010 ; Yavuz Kumlu et Tüdeş, 2018).

I.4.1. Morphologie urbaine et profils des villes soutenables

La succession des études sur les formes urbaines a donné naissance de la morphologie urbaine au début des années 50. Le développement des méthodes d'analyse propres a fait de la morphologie urbaine comme une discipline à part entière. La morphologie urbaine cherche donc la caractérisation da la forme urbaine à différente échelles. La forme urbaine est considérée comme un produit social que l'attention doit porter sur la lecture de l'état de fait ainsi que l'analyse des mécanismes et des processus historiques conduisant à la construction de la forme urbaine (Rémy Allain, 2004). Avec l'universalisation du développement durable, la morphologie urbaine a gagné plus d'attrait. Plusieurs travaux ont pu mettre en évidence l'influence de la forme urbaine sur le comportement des villes de point de vue de soutenabilité urbaine : « *La forme urbaine structure le rapport à l'environnement. L'évolution récente des formes urbaines est incompatible avec le développement urbain durable* » (Bochet, 2007). En matière de mobilité urbaine, par exemple, les villes étalées présentent des parcours de déplacements plus longs par rapport aux villes compactes, de même pour la dépendance aux automobiles ; donc plus de consommation énergétique (Camagni et al., 2002b ; Rode et al., 2017). En matière de valorisation de la biodiversité urbaine, la forme urbaine influence différemment selon les échelles. À une échelle locale, les espaces verts sont moins présents dans les zones les plus denses. Mais à une échelle globale, l'étalement urbain peut favoriser la fragmentation paysagère et provoquer les ruptures écologiques (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016 ; Guérois, 2003).

De nos jours, la morphologie urbaine apparaît une des clés permettant la compréhension et l'évaluation des formes urbaines, notamment avec la mise en place des politiques de développement durable qui cherchent à limiter les effets néfastes de l'étalement urbain. Il importe de noter que, comme le souligne Da Cunha (2005), la ville n'est pas durable en elle-même, mais elle est concernée par la durabilité qu'elle doit y prendre part, principalement par sa morphologie. La forme urbaine constitue donc un enjeu primordial sur lequel les acteurs de la ville doivent agir (Allain, 2010). Dans ce sens, des modèles de formes urbaines portant des solutions de soutenabilité urbaine ont été proposés par les aménageurs. La préoccupation centrale porte sur la mise en place des normes et des réglementations en matière d'aménagement urbain conduisant à la matérialisation des formes urbaines présentant plus de durabilité que ce soit au niveau local ou globale. L'enjeu n'était pas de bloquer l'étalement urbain mais de le maîtriser ; le résultat estimé des dynamiques de croissance spatiale serait des formes urbaines plus adaptées autant bien aux aspirations sociales qu'aux conditions environnementales : « *le travail sur la morphologie urbaine apparaît ici comme une des clés pour parvenir à un aménagement urbain durable* » (Bourgeois, 2015). Plusieurs concepts issus de la morphologie urbaine relatifs à l'aménagement spatiale et aux modèles de villes ont pris place importante dans les réflexions portant sur la soutenabilité des villes actuelles.

I.4.1.1. Macroforme et agrégation des fragments : formes compactes et formes étalées

La forme urbaine peut être étudiée à différents échelles, de l'îlot à la région urbaine. Le caractère étalé ou compact peut être ainsi examiné à différents niveaux, de l'agglomération elle-même ou de l'une de ces composantes (quartiers, zone, etc.). À une échelle globale, l'étalement ou la compacité d'une ville se rapporte à la disposition des fragments urbains constituant l'agglomération. Une ville peut être considérée comme étalée (ou polycentrique) quand les fragments sont plus espacés et la mobilité est plus importante. Inversement, la ville peut être considérée comme compacte si l'agrégation des fragments est plus importante. La continuité spatiale est donc plus manifestante avec moins d'espaces vides. À un niveau plus restreint, la compacité de la forme urbaine est davantage liée à la densité dans ses différentes dimensions comme la densité du bâti, la densité résidentielle, etc. (Bourgeois, 2015). Ce niveau peut décrire hiérarchiquement la forme d'un îlot à travers la configuration de ces parcelles, la forme d'un quartier ou d'une zone urbaine via l'étude de ces composantes spatiales (îlots, voiries, agencement et hauteurs des bâtiments, etc.). Plusieurs indicateurs peuvent être examinés : rapport plein/vide, continuité/et ou discontinuité du bâti, le coefficient d'emprise au sol (CES), coefficient d'occupation au sol (COS), etc (Rémy Allain, 2004 ; Maignant, 2005).

I.4.1.2. Quatre modèles théoriques de macroformes

La macroforme urbaine correspond à la forme globale de la ville à une échelle plus large. La configuration spatiale de la ville s'appréhende à travers une vision synoptique incluant l'ensemble de l'agglomération définie par son périmètre et son environnement immédiat. D'une règle générale, les macroformes urbaines peuvent se distinguer en quatre modèles théoriques : ville compacte monocentrique, ville compacte polycentrique, ville étalée monocentrique et ville étalée polycentrique (figure I-4).

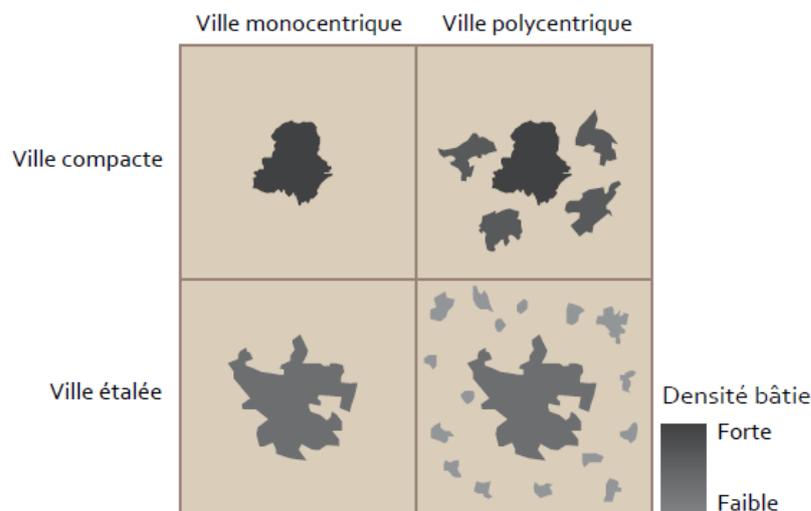


Figure I-4 : Modèles théoriques des macroformes urbaines

Source : (Bourgeois, 2015)

I.4.2. Repenser la macroforme urbaine

Les formes des villes contemporaines sont le résultat d'un processus historique de combinaison de plusieurs facteurs émanant généralement des contextes politiques, socioéconomiques et naturels. L'attractivité des villes enregistrée à la fin du XIXe siècle a engendré de multiples nuisances. Les solutions proposées ont fait des bases de réflexion sur les meilleures formes urbaines, notamment en matière d'hygiène publique. La seconde moitié du XXe siècle a été marquée par des tendances urbaines privilégiant le desserrement des populations et des activités. L'étalement urbain s'est substitué comme mode dominant d'urbanisation dans les pays occidentaux. La consommation excessive des terres agricoles ainsi que les nouvelles mutations sociales accompagnant cette modalité de développement urbain ont poussé les partisans de l'écologie à contester l'étalement urbain que pratiquement toutes les villes américaines et européennes n'ont pu échapper. Il a fallu attendre les années 80 du dernier siècle pour que la conscience commence à être généralisée.

Depuis lors, la littérature scientifique n'a manqué de mettre en évidence les conséquences négatives de l'étalement urbain sur les plans économique, social et environnemental. En matière de planification urbaine, la réflexion sur les formes des villes durables qui intègre la dimension environnementale commence à attirer l'attention des acteurs urbains. L'évaluation environnementale des projets urbains, à travers la réalisation des études d'impacts, est devenue de plus en plus une impérative procédurale nécessaire pour toute démarche de soutenabilité urbaine. L'évaluation des formes d'urbanisation d'un point de vue environnementale est l'un des principaux intérêts de l'écologie du paysage urbain. Selon cette discipline, la ville est considérée comme un écosystème artificiel en perpétuelle interaction avec son environnement naturel intérieur et extérieur. Cette discipline offre un cadre méthodologique et conceptuel permettant l'analyse et l'évaluation des formes urbaines produites et conçues dans les documents d'urbanisme. Le paysage urbain est une notion de base constituant le support sur lequel s'effectuent les dynamiques d'interaction spatiotemporelles qui peuvent être opérées entre les différentes taches de composition. Le changement en matière de composition et de configuration des structures paysagères peuvent être mis en valeur à travers l'examen des indicateurs spatiaux qui permettent la mesure et donc l'évaluation de l'impact de l'étalement de la tache urbaine sur la composition et le fonctionnement des écosystèmes.

I.4.3. La ville compacte comme modèle de soutenabilité urbaine

La fatalité des aboutissements de l'étalement urbain constatée dans les années 90 a abouti à l'adoption des modèles compacts. Les politiques urbaines, notamment dans les villes européennes, ont mis en avant des démarches de densification et de régénération urbaines. La ville compacte est devenue de plus en plus le modèle le plus recherché dans la majorité des opérations d'aménagement urbain (Artmann et al., 2019). Comme alternative à l'urbanisation diffuse, l'extension de la ville doit s'effectuer prioritairement par densification des pôles urbains existants. La croissance spatiale des fragments bâtis selon le mode continu pourrait contribuer au renforcement de la compacité de la ville et l'augmentation des interactions sociales. Dans le même sens, ce modèle de croissance privilège des bordures nettes et lisses (figure I-5) permettant d'une part la réduction de la consommation des terres agricoles et la préservation des espaces périphérique (Geurs et van Wee, 2006), et d'autre part, la discrimination des zones urbaines des zones rurales et l'empêchement la propagation des zones de transition (Bourgeois, 2015). La réduction de la consommation énergétique est l'un des principaux objectifs visés par ce modèle de développement. Le transport en commun en est le mode favorisé. Le rapprochement des équipements et des bâtiments de service offerts par la ville compacte encourage ainsi la marche à pied et les déplacements non motorisés (en deux roues). La mixité

fonctionnelle présentée par ce modèle permet d'améliorer l'accessibilité aux services et de réduire la ségrégation sociospatiale (Pouyanne, 2006).

Les politiques de compaction urbaine s'appuient généralement sur trois leviers. Le premier se rapporte à la densification des zones résidentielles. Cette démarche amène à la réduction de la consommation spatiale à travers la limitation de l'emprise au sol des nouvelles constructions. Les documents d'aménagement et d'urbanisme jouent un rôle important moyennant une réglementation urbanistique bien appropriée. Dans cette perspective, les indices morphologiques d'occupation et d'utilisation du sol (comme le COS et le CES) doivent favoriser la densité urbaine. Le deuxième levier correspond à la densification des zones d'activités et de services. L'augmentation de la densité d'activités permet la réduction des déplacements et de donner lieu à la mixité fonctionnelle. Le dernier levier consiste à la requalification des friches et des zones urbaines délaissées. Ces zones constituent de vrais potentiels fonciers pouvant accueillir des projets de développement urbain et offrant de ce fait la possibilité de limiter l'étalement urbain. Les villes européennes, dans leur totalité, se sont orientées vers ces politiques de renouvellement urbain, pratiquement à partir des années 80, et les exemples sur ce sujet en sont nombreux.

I.5. Des tendances à la compaction urbaine : monocentrisme et polycentrisme compacts

I.5.1. Le plan néerlandais (ABC)

Au milieu des années 80, les pays européens ont commencé la mise en place des politiques de densification urbaines en vue de ralentir l'étalement effréné des villes. Une des expériences pionnières est celle des Pays-Bas. La politique dite de la ville compacte a été lancée en 1985 dans la perspective de contenir le déploiement urbain caractérisant les stratégies adoptées au cours des années 60 et 70 (Guérois, 2003). Une stratégie de localisation des activités et des entreprises intitulée « ABC » a été élaborée et mise en place par le gouvernement néerlandais (Dijst, 1997). Cette stratégie consiste à définir des niveaux de priorités (A, B et C) en matière de choix modal de transport et en fonction des situations des activités par rapport au système urbain. L'objectif principal est de favoriser le transport doux en minimisant la dépendance à l'automobile. Des zones de priorité sont définies selon le mode de transport favorisé. Les zones qui sont mieux accessibles par le transport en commun ne le sont pas avec l'automobile, et inversement. La première localisation de catégorie A donne donc plus d'avantage aux transports en communs contre des difficultés d'accessibilité pour les automobiles. La localisation de catégorie B octroie un niveau pareil d'accessibilité à ces deux modes de déplacement. Par contre, la localisation de catégorie C donne plus d'avantage à l'automobile contre une mauvaise couverture en matière de transports en commun. En vue de limiter la dépendance à l'automobile, ce schéma d'aménagement recommande l'implantation des zones

résidentielles prioritairement dans les secteurs de catégorie A puis les secteurs de catégorie B et en dernier lieu dans les secteurs de catégorie C (figure 1-5c). Cette politique a pu trouver sa généralisation aux Pays-Bas grâce aux moyens législatifs d'aménagement et d'urbanisme qu'on ne les trouve pas dans les autres pays (Bourgeois, 2015).

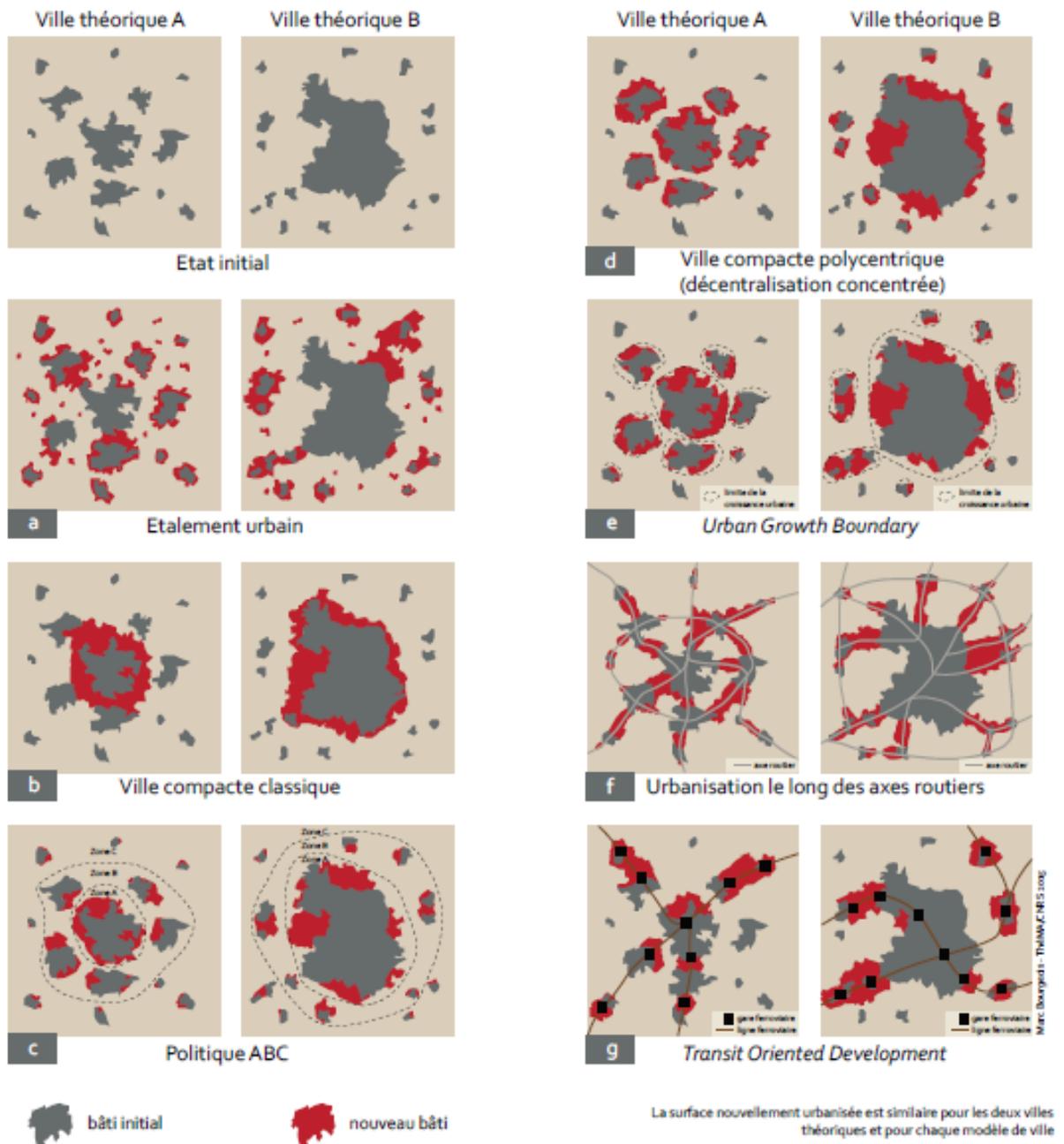


Figure I-5 : différents modes d'extensions urbaines à partir d'un état initial (A et B)

Source : d'après (Bourgeois, 2015)

I.5.2. De la compacité monocentrique à la compacité polycentrique : les politiques de la « décentralisation centralisée »

La compacité urbaine concerne autant les villes monocentriques que les villes polycentriques. De multiples régions urbaines sont organisées en modèles polycentriques ou polynucléaires (Paulet, 2009). Il s'agit d'un ensemble d'agglomérations qui sont spatialement proches ou en conurbation, mais avec autonomie administrative pour chacune d'elles. Cette autonomie territoriale permet de limiter la mobilité motorisée à l'échelle de la région urbaine. Le modèle polycentrique est largement présent dans le monde développé, à titre d'exemple on peut citer La *Randstad* aux Pays-Bas (figure I-6) et la région *Rhin-Ruhr* en Allemagne.



Figure I-6 : La *Randstad* aux Pays-Bas, un modèle multipolaire compact

Source : d'après (Meijers, 2005)

Pour une ville compacte de forme monocentrique, ou polycentrique avec prépondérance d'une agglomération « principale », il est possible de développer une stratégie de polycentrisme avec une politique « décentralisation centralisée » (Schwanen et al., 2004) donnant plus de rôle aux pôles secondaires (figure I-5b). Le développement urbain pour ce modèle doit suivre un schéma de densification équilibrée entre la ville mère et les autres villes dites secondaires. Cette politique de décentralisation centralisée permet de contrôler l'étalement urbain que peut exercer la ville mère en

limitant ses effets néfastes sur les territoires périphériques. C'est une politique urbaine qui s'accommode avec les principes de la ville compacte (Allain, 2010 ; Bourgeois, 2015).

I.5.3. Des limites de croissance urbaine (*Urban Growth Boundary*)

Le modèle *Urban Growth Boundary* (Ding et al., 1999) est basé sur le principe de définir des limites spatiales de la croissance résidentielle. Deux secteurs sont définis au sein de la région urbaine : un secteur apte à recevoir des extensions résidentielles, et un autre secteur n'est pas apte à ce type de croissance ; en d'autres termes, le développement résidentiel n'est autorisé qu'au premier secteur. Ce schéma d'aménagement consiste donc à maîtriser l'étalement urbain et de protéger les espaces agricoles et naturels contre le mitage et la fragmentation paysagère induite par la croissance en « saute de mouton » caractérisant l'étalement urbain. En fonction de la définition des limites d'urbanisation, plusieurs cas peuvent être envisagés (Bourgeois, 2015). Dans le cas d'une délimitation rigoureuse, c'est à dire avec des bordures nettes et lisses, le dispositif *Urban Growth Boundary* consiste à identifier l'agglomération concernée par la totalité du futur processus de densification urbaine dans le but d'éviter l'étalement urbain que peut générer d'une manière ordinaire une ville compacte. Dans le cas où ce dispositif d'aménagement ne prévoit pas de limites urbaines aussi rigoureuses, la démarche de compaction urbaine se trouve moins évidente. Le modèle morphologique mis en place ne sera pas intégralement confondu avec celui de la ville compacte. Il est nécessaire, dans ce cas-là, d'imposer une zone tampon, localisée aux alentours de l'agglomération principale, au sein de laquelle les programmes d'habitat individuel et collectif sont autorisés (figure I.5e). Dans le cas d'une mise en place d'une politique de décentralisation centralisée, la croissance résidentielle sera opérée dans des zones tampons localisées aussi bien dans l'agglomération urbaine principale que dans les autres agglomérations avec répartition équilibrée (Millward, 2006).

I.5.4. Balisage par verdoisement : des corridors verts

Les murs d'enceinte ont depuis longtemps joué le rôle de limites physiques définissant les villes par rapport à leurs banlieues. Leur disparition progressive au XIX^e siècle en conséquence de l'éclatement spatial des villes industrielles au-delà de leurs obstacles a stimulé le débat sur les limites urbaines. Le débat ne se limite pas aux aspects physiques, il s'étale aux questions socioéconomiques liées à la nouvelle réalité spatiale : « *Les débats sur les formes urbaines ne se réduisent pas à la question des densités, ni à celle de la forme générale des extensions urbaines. Stimulée par la disparition progressive des enceintes urbaines au XIX^e siècle, qui a altéré la distinction non seulement physique mais aussi juridique et fiscale des villes par rapport à leur environnement immédiat, la question des*

limites entre les villes et les campagnes est également prégnante, et fait pendant à la progression de l'étalement urbain au-delà des anciens faubourgs » (Guérois, 2003).

Quoique le consensus de décrire des limites nettes distinguant l'urbain du rural ne soit pas à l'œuvre, la mise en place de barrières circonscrivant la croissance spatiale des villes paraissait nécessaire pour la plupart des aménageurs engagés pour la protection des banlieues contre le déploiement excessif des populations et des activités urbaines. Ces propos de « mise en garde » ont été supportés, d'une part, par les auteurs « nostalgiques » de la ville *intramuros* ; pour eux, l'inquiétude se rapporte au maintien d'une distinction entre le lieu de culture et de civilisation que présentent la ville et son environnement immédiat. D'autre part, l'identification des limites urbaines nettes est appuyée par les aménageurs admettant un étalement régulier des villes. La préservation d'un ensemble organique homogène, ainsi menacée par l'avancée continue de la frange urbaine, devient possible avec l'instauration de ces barrières physiques.

I.5.4.1. La végétation urbaine pour aérer les tissus entassés

L'intégration des espaces verts dans la composition urbaine, non seulement comme des espaces d'aération et de récréation, mais aussi comme des éléments de repère et même d'identité urbaine, remonte plus loin dans l'histoire, mais elle a été réinventée avec le mouvement hygiéniste au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle. En réaction aux problèmes, principalement d'ordre sanitaires, engendrés par l'éclatement de la ville industrielle au-delà des noyaux *intramuros* et la propagation des faubourgs périphériques, une réflexion s'est développée portant sur la nécessité d'intégrer la dimension hygiénique dans la vie urbaine. Ces propos supportés par le mouvement hygiéniste consistent à améliorer la qualité de vie dans les cités insalubres à travers des travaux de réaménagement urbain visant d'un côté la viabilisation et l'aération de ces entités urbaines et, d'un autre, coté l'introduction des espaces vers notamment dans les interstices vides créés suite à la disparition des anciennes enceintes : « *l'espace libéré par ces murs de protection devenus obsolètes est une opportunité pour l'insertion de promenades et d'espaces verts dans la ville.* » (Bourgeois, 2015). Ce mouvement a considérablement contribué à la mise en valeur des opportunités que peut présenter la présence de la nature en ville. Plusieurs villes ont pu bénéficier de l'introduction d'espaces verts pour aérer et même revaloriser leurs centres comme le *Central Park* à New York et le *Park de la Tête d'Or* à Lyon, à titre d'exemples.

Depuis lors, la prise en compte de l'élément végétal dans la planification urbaine est devenue une manière généralisée dans les propos portant sur l'amélioration de la qualité de vie urbaine. Trois formes différentes d'incorporation des espaces verts et naturels dans la fabrication des modèles de villes

peuvent être distinguées (Bourgeois, 2015) : les ceintures vertes, les corridors écologiques et les coulées vertes (figures I-7).

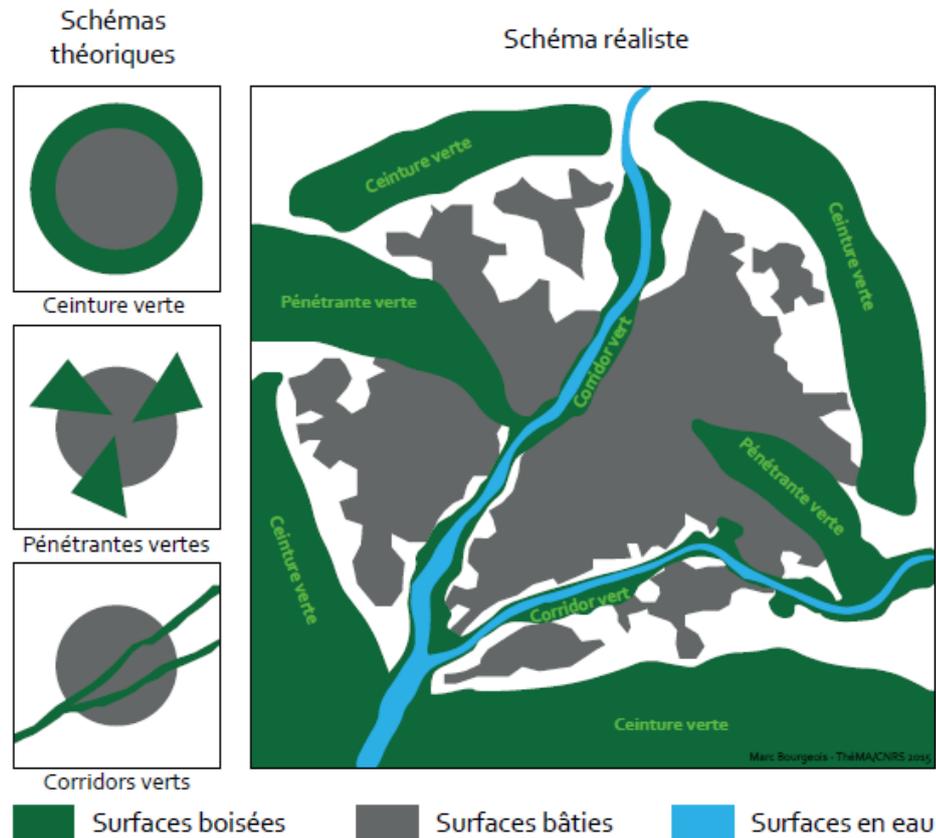


Figure I-7 : Différentes formes d'intégration des bandes vertes en aménagement urbain

Source : (Bourgeois, 2015)

I.5.4.2. Les ceintures vertes (*Fringe belt*)

La mise en place des premiers dispositifs de limitation des extensions urbaines s'est exprimée dans les propos d'Ebenzer Howard, à la fin du XIXe siècle (Howard, 1898). À travers le modèle de la cité-jardin, cet auteur propose une solution permettant le contrôle de la croissance excessive des villes postindustrielles. Il s'agit des unités urbaines de tailles réduites dont les limites sont déterminées par des bandes d'espaces verts connues par l'appellation « ceintures vertes ». Ebenzer Howard, via ce modèle, offre la possibilité de créer de nouvelles zones urbaines bien définies capables d'absorber d'une manière planifiée la demande en extensions urbaines. Le modèle *Garden city* s'inscrit donc dans la tendance qui s'oppose à la foi à l'étalement démesuré des villes et, en contrepartie, à leur surdensification.

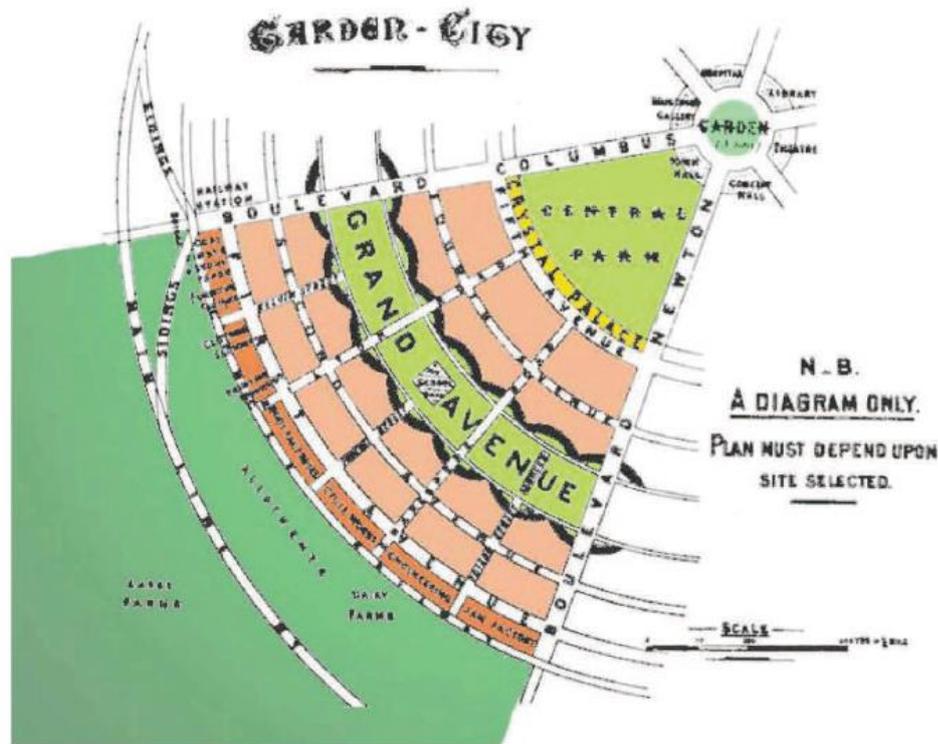


Figure I-8 : Organisation de la cité-jardin d'après E. Howard (1898)

Les cités jardins ont permis non seulement la mise en valeur de l'idée de contrer l'éclatement spatial des villes postindustrielles, avec la réduction de ses répercussions sur les banlieues rurales, mais la mise en valeur de l'importance des espaces verts comme éléments de modelage de la forme urbaine. Morphologiquement, les îlots constituant la cité-jardin se disposent selon une organisation radioconcentrique. Les constructions sont reculées par rapport aux voies pour laisser place aux bandes vertes. La délimitation spatiale de la cité-jardin est marquée par une bande verte périphérique (*fringe belt*). Ce modèle d'aménagement a vu ses premières applications en Angleterre à la fin de la première moitié du XX^e siècle. Il s'est figuré la première fois dans le *Greater London Plan* établi en 1944, puis généralisé dans les autres villes anglaises. D'autres villes européennes comme Berlin et Budapest ont aussi opté pour ce modèle d'aménagement. Au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle, le modèle des ceintures vertes trouvera sa vulgarisation dans les villes nord-américaines et asiatiques (F. Li et al., 2005 ; Maruani et Amit-Cohen, 2007 ; Whitehand, 1988 ; Whitehand et Morton, 2003).

La diffusion des ceintures vertes dans les pays développés avait des finalités pareilles de celles énoncées dans les propos d'Ebenzer Howard à savoir : le contrôle de l'étalement urbain, la protection des espaces agricoles et naturels contre l'urbanisation, et s'opposer à la fusion des espaces ruraux et urbains (P. Longley et al., 1992). En plus de ces finalités essentielles, les ceintures vertes ont notablement gagné plus d'attrait à partir des années 70 avec l'émergence progressive de l'écologie

urbaine comme domaine favorisant la végétation en ville (Clergeau, 2007 ; Kühn, 2003). En matière d'aménagement urbain, la conception des ceintures verte aux alentours des villes est similaire à celle de l'*Urban Growth Boundary*, étant donné que le principe de limiter l'étalement urbain est le même. Cette similarité se confirme plus dans le cas où les ceintures vertes se matérialiseraient comme des limites urbaines dans le modèle de l'*Urban Growth Boundary*.

Ce modèle d'aménagement a cependant fait l'objet d'un débat autour des formes urbaines globales produites à l'issue de son application. L'influence des ceintures vertes sur le développement de nouvelles formes d'étalement urbain n'est pas consensuelle. Toutefois, quoique les ceintures vertes servent comme obstacle à l'étalement urbain, pour d'autres auteurs, ce dispositif spatial est vu comme responsable de fragmentation urbaine, les taches urbaines se trouvent plutôt dégagées. L'observation de la cartographie visualisant l'application des ceintures vertes dans quelques villes comme à Londres et à Ottawa par exemple (figure I-9) permet d'appuyer ce constat (Elson, 1986). Les ceintures vertes ne sont pas en toutes des lieux infiltrables, elles peuvent être, dans quelques cas, poreuses et ne présentent pas systématiquement une barrière verte hostile à toutes sortes d'urbanisation (Bourgeois, 2015). Mais, dans le général de cas, les extensions urbaines s'opèrent au-delà des ceintures vertes, on part donc de report d'urbanisation à l'autre côté de ces limites physiques.

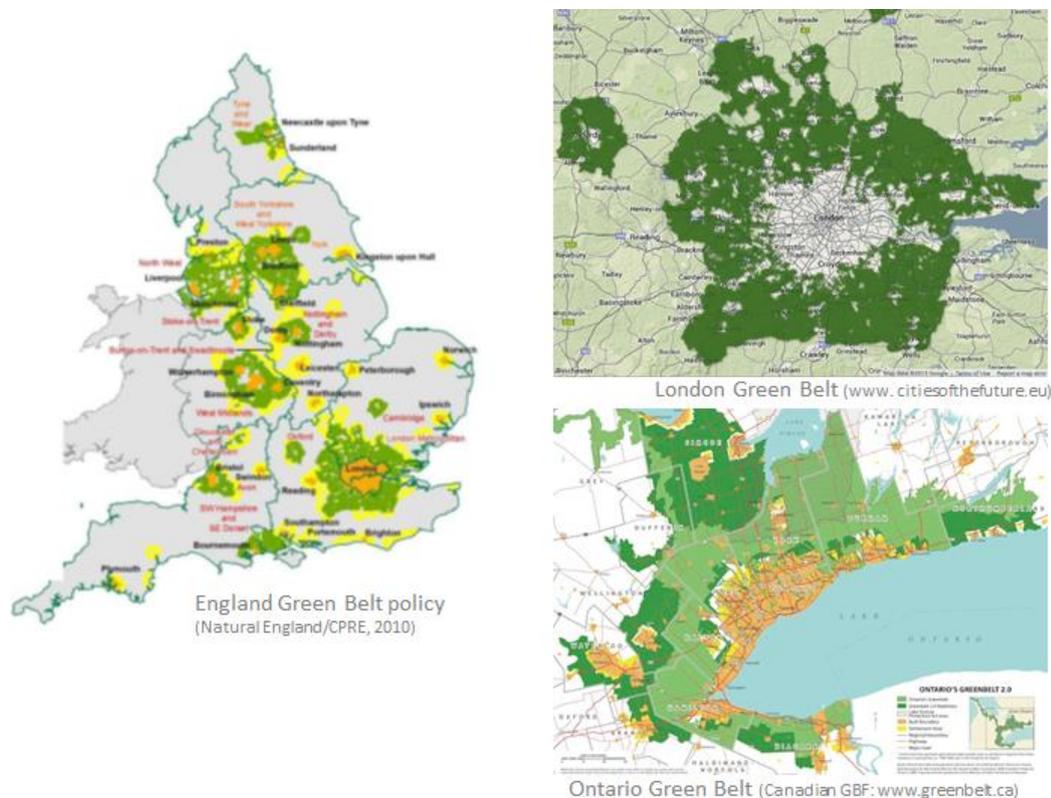


Figure I-9 : Les ceintures vertes à Londres et à Ottawa
Modifié de (López Varela, 2013)

La deuxième moitié du XX^e siècle a été marquée par le développement de plusieurs formes d'introduction de l'élément végétal à grande échelle dans les plans d'aménagement et d'urbanisme.

I.5.4.3. Les coulées vertes

Les coulées vertes, ou pénétrantes vertes, sont intégrées en aménagement sous forme de grandes parcelles occupées par la végétation. Les pénétrantes vertes sont initiées principalement pour aérer les tissus urbains denses, mais par la suite ces espaces ont acquis plus de rôle dans les villes comme des espaces de récréation et de loisir. Au fur et à mesure que les opportunités écologiques de la végétation urbaine de grande échelle sont mises en valeur dans les politiques d'aménagement, les pénétrantes vertes ont ainsi gagné plus de rôle comme éléments d'attraction touristique et paysagère (Newell et al., 2013). Les coulées vertes (en anglais *Greenways* ou *Greenalleys*) ne se confondent pas avec les ceintures vertes malgré l'existence de certains éléments de rapprochement. Si pour certains auteurs, le concept de ceintures vertes est à l'origine du concept de pénétrantes vertes (Van Rij et Korthals Altes, 2008), la configuration spatiale que peut présenter ces deux modèles ainsi que les fonctions qu'ils sont aptes à assurer sont pour autant différentes. La localisation des ceintures vertes est par principe aux alentours des agglomérations urbaines, ce qui leur confie le rôle de préservation des territoires ruraux situés en périphérie, tandis que les coulées vertes se disposent généralement sous forme de pénétrantes allant vers l'intérieures des villes qui peuvent de par cette configuration assurer une variété de fonctions aussi bien d'ordre environnemental que socioéconomique : « *elles sont aménagées dans but écologique, récréatif, culturel ou esthétique* » (Bourgeois, 2015). Plusieurs villes ont matérialisé l'implantation des coulées vertes dans leurs documents d'aménagement en leur donnant la qualité d'espaces protégés (figure I-10). Les pénétrantes vertes ne se limitent pas nécessairement à la simple utilisation comme espaces boisés, elles peuvent être des espaces ouverts (*Open space*) et ayant une vocation multifonctionnelle avec la possibilité également de supporter différents types d'utilisation agricole. Les coulées vertes offrent ainsi la possibilité d'intégrer la nature en ville à travers l'établissement de connexion écologique reliant la végétation naturelle périphérique à la végétation urbaine. Un rôle assez considérable est attribué à ce type d'espaces verts, ils permettent l'épanouissement de certains espaces vivants au sein des tissus urbains. Outre ces fonctions, la présence des pénétrantes vertes en villes peut contribuer à l'amélioration du confort dans les milieux urbains à travers l'amélioration des conditions microclimatiques, notamment la réduction de la température ambiante dans les tissus denses (Hanafi et Alkama, 2017). Ainsi, la présence des pénétrantes vertes en villes offre l'avantage d'augmenter l'accessibilité aux espaces verts et ouverts dont la fréquentation est souvent courante (De la Barrera et al., 2016 ; Tannier et al., 2012).

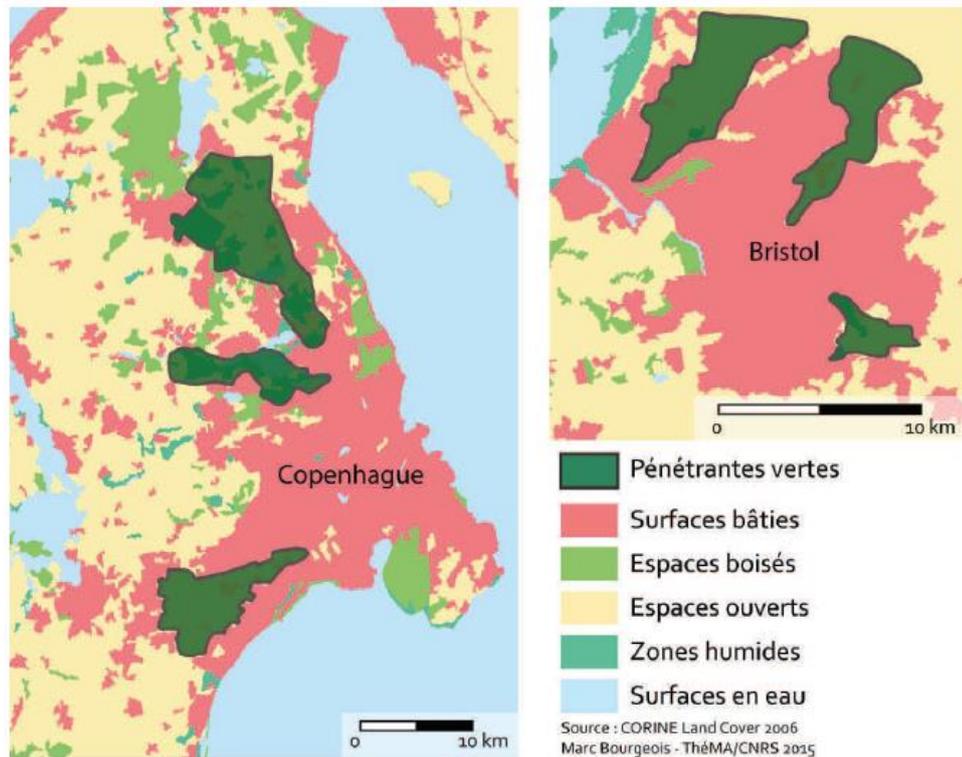


Figure I-10 : Des Greenalleys à Copenhague et à Bristol (UK)

Source : (Bourgeois, 2015)

I.5.4.4. Les corridors écologiques

Les discours portant sur la protection et la promotion des espaces naturels utilisent souvent le concept de corridor vert (Harris, 1985 ; Matagne et Beauvais, 1999 ; Smith, 1993). Le corridor vert ou lien vert, un concept révélé de l'écologie, correspond à une zone linéaire constituée de formations végétales et naturelles reliant deux ou plusieurs zones d'habitat naturel disjointes. Dans les milieux urbains, les corridors verts assurent l'interconnexion entre les espaces verts. Ils permettent le déplacement et la dissémination des espèces. La présence des corridors écologiques dans les villes favorise l'épanouissement de la biodiversité urbaine : « *L'aménagement de tels réseaux verts entre des aires naturelles isolées non seulement facilite la circulation et la dissémination des espèces, mais favorise aussi les interactions entre les espèces végétales et animales. Ces réseaux constituent également des aires d'échanges génétiques entre les espèces et assurent ainsi le maintien des processus naturels des populations présentes* » (Saint-Laurent, 2000). Ces couloirs verts sont généralement perçus comme le lien vital assurant la pérennité et la diversité des écosystèmes (Harris, 1985 ; Hudson, 1991).

Il importe de noter l'existence de confusion entre corridors verts et coulées vertes en raison de la similitude qui les rassemble. La littérature portant sur l'intégration des trames vertes dans les plans d'aménagement urbain, emploie souvent ces deux concepts de manière confondue (Bourgeois,

2015). Il est vrai qu'il existe des éléments en commun reliant les corridors verts et les coulées vertes. Leurs conceptions versent dans la même perspective de valorisation des espaces verts dans les villes, ils font ensemble partie des trames vertes. Mais ces deux composantes végétales urbaines se distinguent autant sur le plan morphologique que sur le plan fonctionnel. Sur le plan morphologique, les formes et les largeurs se diffèrent pour chacun de ces éléments. Les corridors verts ont des formes linéaires allongées avec des largeurs moins importantes. Par ailleurs, les coulées vertes ont des formes plutôt coniques avec plus de largeurs par rapport aux corridors verts. Les corridors verts ont la propriété de franchir sur ces deux côtés le tissu urbain ; par contre, les coulées vertes ne l'ont pas (figure I-7). Les corridors verts sont davantage favorables pour un « écoaménagement » des éléments linéaires tels que les cours d'eau, les bords de routes et de chemins de fers (Bourgeois, 2015).

L'intégration des trames vertes à grande échelle peut contribuer au façonnement du modèle de la ville compacte. Les ceintures vertes, les coulées vertes et les corridors verts sont des formes différentes d'aménagement vert. Leur intégration en milieu urbain permet l'augmentation de la part des espaces aérés, ainsi que leur accessibilité. L'amélioration du cadre de vie des habitants, dans une optique de soutenabilité urbaine, nécessite la prise en compte de ces éléments vitaux dans toute démarche d'aménagement spatial.

I.6. Des alternatives pour la compaction polycentrique

D'une manière consensuelle, la littérature scientifique a remis en cause l'étalement urbain contemporain comme modalité d'extension des agglomérations urbaines (Antoni, 2010 ; Simard, 2014). L'allongement des réseaux de transport et l'éloignement des fragments urbains sont constatés en mutuelle interdépendance. En effet, l'urbanisation linéaire le long des axes de transport a conduit au développement des formes urbaines nettement digitées. La tache urbaine résultante prend l'allure de doigt de gain, la macroforme de la ville de Copenhague au Danemark est une image exemplaire (figure I-10). Cette forme d'étalement urbain a comme conséquence l'allongement des distances motorisées et la fragmentation des paysages naturels. Aux États-Unis, le constat est plus que détestable. Les formes urbaines produites par l'urbanisation diffuse caractérisant ce pays pendant plus d'un demi-siècle n'ont gagné que des appréciations négatives : « *Depuis les années soixante, l'urbanisme et l'aménagement font l'objet de critiques virulentes. On reproche aux membres de ces professions et à leurs clients d'avoir mené des actions destructrices des tissus urbains et des communautés existantes et génératrices de nouveaux milieux urbains de piètre qualité* » (Fischler, 2003).

Des alternatives ont été développées et proposées pour faire face à cette modalité stigmatisée partout. Des mouvements urbanistiques sont émergés aux États-Unis consistant à transcrire les principes du

développement durable dans la planification et la gestion des villes. Dans cette optique, le *Smart growth* a pris place importante dans les propos portant sur la recherche des modèles de développement urbain plus adaptés aux impératives dictées par le développement durable. D'autres alternatives plus locales ont ainsi gagné plus de popularité chez les « designers urbains » travaillant sur les contextes locaux à savoir le Nouvel Urbanisme NU, le *Transit Oriented Development* TOD (Calthorpe, 1993), l'*Urban village* (Jabareen, 2006) et le *Wisely compact city* (Camagni et al., 2002b).

I.6.1. Le *Smart growth*

Avec l'avènement du développement durable comme modèle adopté par la communauté internationale, le *Smart growth* a pris place brillante dans les mouvements engagés pour corriger les issues néfastes causées par les modèles progressistes qui étaient à l'œuvre depuis la révolution industrielle. Pour de nombreux auteurs, le concept de *Smart growth* n'est dans sa définition qu'une version nord-américaine du concept du développement urbain durable (Lewis et al., 2002 ; O'Neill, 1999 ; Ouellet, 2006 ; Smart Growth, 2015). Selon Gillham (2002), le *Smart growth* trouve ses bases conceptuelles dans les théories « utopiques » de la gestion de l'urbanisation des années 60 pour s'évoluer par la suite vers sa forme actuelle en concomitance avec la généralisation du paradigme du développement urbain durable au début des années 1990. La vision que porte le *Smart growth* a reçu une large acceptation chez plusieurs organisations et associations américaines : « *De nombreux élus, dont plusieurs gouverneurs d'états, reconnaissant que la croissance est inévitable et même nécessaire mais qu'elle doit être mieux maîtrisée politiquement et surtout mieux canalisée spatialement afin d'être moins coûteuse aux contribuables et moins dommageable à l'environnement naturel. Leur but n'est donc pas de freiner le développement urbain mais d'en faire un enjeu de débat public et de lui donner des formes plus durables, tant écologiquement qu'économiquement et socialement* » (Fischler, 2003).

La diversité des acceptations du *Smart growth*, vu la vulgarisation sur l'ensemble de l'Amérique du Nord et que chaque état le perçoit différemment des autres, a fait de ceci un concept ambigu. Néanmoins, la vision la plus commune permet de définir un ensemble de principes de développement et d'aménagement qui ont essentiellement pour finalité la protection de potentiel naturel et foncier ainsi que le maintien d'une équité sociale en réduisant les disparités sociospatiales. Le *Smart growth* se veut une approche globale adoptée par les organisations et les instances nationales et régionales comme références conceptuelles dans toutes les actions publiques et privés : « *Un réseau national, le Smart Growth Network (SGN), fut créé en 1996 par l'Agence fédérale de la protection de l'environnement (EPA) et ses partenaires, et un nombre croissant d'acteurs publics, de tous les*

paliers, mettent désormais de l'avant des politiques basées sur le smart growth » (Ouellet, 2006). Le *Smart growth* s'est ainsi triomphé dans plusieurs pays développés. Au Canada par exemple, on trouve le *Smart Growth BC*, un groupe de portée nationale créé en 2003 pour regrouper des organisations non gouvernementales (Fischler, 2003 ; Ouellet, 2006).

I.6.2. Le Nouvel Urbanisme

À l'image du *Smart Growth*, le nouvel urbanisme ou *New Urbanism* s'est émergé en réaction aux types de développement périurbain caractérisant les villes nord-américaines depuis les années 1950. Le *New Urbanism* se veut une alternative de soutenabilité urbaine consistant à reformer les modes de planification et de développement urbain qui sont à l'œuvre. Dans un contexte plus global, le *New Urbanism* s'inscrit dans une tendance globale de remise en cause de l'architecture et de l'urbanisme modernistes et de réinvention des formes urbaines traditionnelle (Ouellet, 2006).

Le concept de Nouvel Urbanisme accepte une variété de définitions. Dans un sens plus large, il s'agit d'une approche systémique de l'urbanisme et de l'aménagement ou même, pour certains auteurs, d'une philosophie d'aménagement (Al-Hindi et Till, 2001 ; Marshall, 2000 ; Ouellet, 2006). Mais d'un point de vue général, le Nouvel urbanisme est de prime abord considéré comme un mouvement en aménagement et en design urbain. Ses principes fondamentaux sont illustrés dans la charte du *Congress for the New Urbanism*, une association de professionnels américains se débattant pour la diffusion et la concrétisation des thèses du Nouvel urbanisme. Actuellement, le Nouvel urbanisme est considéré comme la tendance la plus appréciée notamment pour les architectes et les urbanistes et les professionnels travaillant sur le design urbain : « *On parle aussi du nouvel urbanisme comme étant le plus important mouvement en urbanisme actuellement (et depuis longtemps), mouvement qui a à tout le moins contribué à alimenter et à réactualiser les débats autour de la question de l'étalement et de notre modèle de développement urbain* » (Ouellet, 2006).

En raison de l'intérêt particulier attribué aux formes urbaines classiques par le Nouvel urbanisme, les « nouveaux urbanistes » sont parfois appelés « les néotraditionnalistes ». À ce propos, Fischler (2003) a mentionné que : « *Les néotraditionnalistes, comme les nouveaux urbanistes sont parfois appelés, voient l'urbanisme avant tout comme un art, celui de créer des milieux urbains qui possèdent une identité forte, de façonner des espaces publics attrayants et conviviaux et d'intégrer tout nouveau développement dans son contexte historique et naturel* ». D'une manière globale, la finalité que cherche le Nouvel Urbanisme peut se résumer en doubles objectifs : d'une part, recréer de communautés (*communities*) qui offrent un cadre de vie de convivialité et d'interaction sociale ; d'autre part, le développement d'un environnement plus rattaché à la marche à pied et aux transports collectifs (Jones, 1996 ; Ouellet, 2006). Dans cette optique, une série de principes découlant de

l'aménagement et du design urbain est associée au Nouvel urbanisme. Ces principes de base peuvent être synthétisés en trois points principaux :

- Un développement suivant le modèle compact avec net attrait au transport en commun ;
- La prise en compte de l'échelle humaine dans l'établissement des plans d'aménagement avec des formes urbaines offrant plus d'accessibilité piétonne. Les déplacements praticables peuvent donc couvrir des distances de 400 m ou l'équivalent d'environ 5 minutes de marche à pied ;
- Une dotation convenable en infrastructure urbaine pour chaque quartier afin de mieux répondre aux besoins des habitants en matière d'équipement et de services communautaires.

Il importe de noter qu'il existe des correspondances entre le *Smart growth* et le Nouvel Urbanisme. Ces deux écoles partagent les mêmes principes de base en ce qui concerne l'aménagement urbain et s'inscrivent ensemble dans la perspective du développement urbain durable et la lutte contre l'étalement urbain. Ces deux concepts se différencient dans leurs mises en œuvre mais ils présentent des approches complémentaires. Le *smart growth* porte donc une vision plus globale qui se traduit à une échelle régionale par des politiques et des initiatives publiques. Le Nouvel Urbanisme se manifeste à une échelle plus locale touchant les quartiers et les zones urbaines sous forme de projets d'aménagement et de design urbain. Cette complémentarité s'exprime par le fait que les partisans du Nouvel urbanisme ont contribué à la vulgarisation du *Smart growth* : « *D'ailleurs, on compte le Congress for the New Urbanism parmi les fondateurs du Smart Growth Network* » (Ouellet, 2006). L'essor marqué du *Smart growth* et du Nouvel urbanisme revient principalement de leurs visions des solutions qu'il faut entamer pour contrer le déclin des centres urbains et l'éloignement des zones résidentielles de leurs noyaux d'activités. Cette vision, quoiqu'elle soit nouvelle, trouve sa consolidation dans les études antérieures, des années 1960 et 1970, contestant l'étalement des zones urbaines et le grignotage excessif des surfaces agricoles. Avec l'engagement de la communauté politique internationale pour la protection de la biosphère et l'adoption du paradigme du développement durable énoncé dans le sommet de Rio, le *Smart growth* et le Nouvel urbanisme sont devenues des doctrines d'ampleur.

I.7. Les impacts des différentes formes urbaines

La croissance spatiale des villes s'est accompagnée certainement d'amples transformations touchant aussi bien l'environnement humain que l'environnement naturel. L'engagement de l'ensemble de la communauté politique et professionnelle à l'échelle mondiale pour la protection des ressources humaines et naturelles dans l'ensemble des projets de développement territorial a suscité le débat sur l'apport des formes urbaines dans cette nouvelle optique. Le rapport de la ville à son environnement se diffère et dépend de la configuration spatiale qu'elle présente. Le profil de la ville de point de vue

de la soutenabilité urbaine est directement déterminé par la forme qu'elle présente (Allain, 2010 ; Jabareen, 2006).

I.7.1. Forme urbaine et qualité de vie

Les études portant sur la qualité de vie ont mentionné la difficulté de son évaluation particulièrement dans les milieux urbains, en raison d'une part de l'ambiguïté liée à ce concept et, d'autre part, aux aspects subjectifs qui sont aussi lui associés (Frey, 2003 ; Orum et Jenks, 2019 ; Patterson et Chapman, 2004 ; Rapoport, 2016 ; Sénécal et al., 2005). De nombreux auteurs ont aussi mis l'accent sur l'influence de l'environnement urbain sur la qualité de vie des habitants. D'une manière générale, l'environnement urbain est constitué d'un contenant et un contenu. Le contenant englobe les bâtiments, les espaces ouverts non bâtis ainsi que les différentes infrastructures et réseaux, etc. Le contenu se rapporte aux habitants qui sont des individus, des groupes d'individus ainsi que leurs activités (Bourgeois, 2015 ; Tannier, 2017 ; Y. Yang, 2008). La qualité de vie qui est parfois associée à la satisfaction résidentielle des habitants varie avec la variation du cadre de vie qui est en lui-même déterminé par la configuration urbaine (Sénécal et al., 2005 ; Youssoufi, 2011).

D'une règle globale, la qualité de vie des habitants dans les villes peut faire l'objet d'une évaluation en décortiquant les différentes dimensions définissant ce concept à savoir : la dimension morphologique, la dimension humaine et la dimension fonctionnelle (Bonaiuto et al., 2003). La dimension morphologique de la qualité de vie urbaine est en rapport avec les formes architecturales et du design urbain ainsi que les densités vécues ; la dimension humaine se rapporte aux interactions sociospatiales et aux rapports sociorelationnels tissés entre individus et entre groupes d'individus ; la dimension fonctionnelle est déterminée par la diversité des services ainsi que le niveau d'accessibilité aux aménités urbaines. Dans ce sens, l'esthétique du paysage urbain peut être considérée comme aménité contribuant positivement à l'amélioration de la qualité urbaine (Brueckner et al., 1999). Le paysage architectural perçu dans les milieux urbains et périurbains est cependant difficile à estimer, étant donné qu'il n'est pas forcément associé à la forme urbaine (Burchell et al., 1998). Mais la qualité, particulièrement environnementale, des projets de construction et d'aménagement peut avoir un impact important sur la qualité de vie que ce soit pour les utilisateurs ou pour l'ensemble des habitants (Huseynov, 2011 ; Iddrisu et Bhattacharyya, 2015 ; Kyttä et al., 2013 ; Omer, 2008 ; Wallhagen et al., 2013 ; Ye et al., 2013 ; Yusof et al., 2016). En ce qui est en rapport avec notre propos, c'est la densité et la configuration des bâtiments qui est davantage mise en exergue (AUCAME, 2008 ; CERTU de l'Ouest, 2002 ; Kyttä et al., 2013). La densité urbaine est une notion polysémique, sa perception est influencée différemment selon le contexte social et économique. D'une règle générale, la forme urbaine est liée à deux aspects

principaux de la densité urbaine : la densité du bâti et la densité résidentielle. La densité résidentielle correspond au rapport du nombre de logements à sa surface administrative. La densité du bâti est présentée par le rapport de surface bâtie à la surface administrative. Dans les documents d'urbanisme, elle est souvent assimilée à l'emprise au sol (CES). Plusieurs configurations peuvent être envisagées avec le même COS (figure I-11). Le CES ne suffit pas seul pour décrire la forme urbaine ; on fait souvent recours à un autre indicateur qui est le Coefficient d'Occupation du Sol COS (CETE de l'Ouest, 2002).

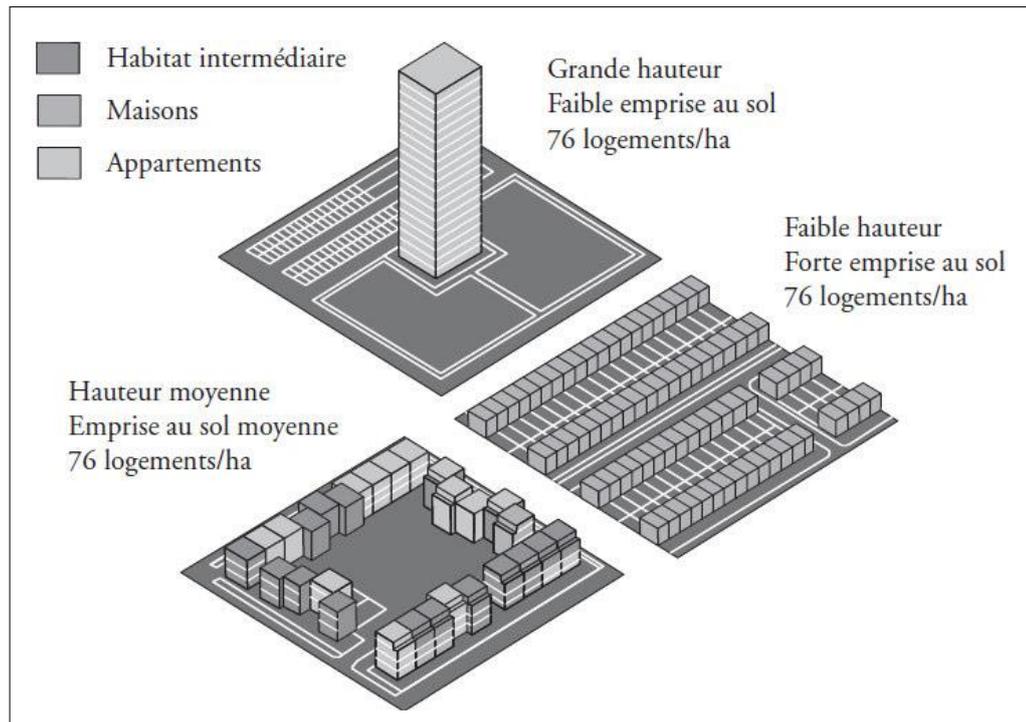


Figure I-11 : Plusieurs formes urbains pour une même densité de bâti (COS = 0,5) et même densités de population.

Source : d'après (Moulinié et Naudin-Adam, 2005)

Le CES et le COS sont souvent réglementés dans les documents d'urbanisme. La valeur du CES dépend de la localisation et de la valeur foncière de la parcelle. Cette valeur devient maximale dans le centre-ville et diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre vers la périphérie moins dense. Par ailleurs, le COS permet de décrire la forme urbaine en 2D. À travers cet indicateur, la surface non bâtie à respecter est délimitée, le COS sert donc comme un moyen de préservation des surfaces non bâties telles que les espaces verts et les autres surfaces perméables (CETE de l'Ouest, 2002; Dechaicha, 2013).

La perception de la densité ne peut se détacher du contexte auquel est liée. La densité élevée que présentent les centres-villes est souvent perçue positivement, elle est même requise par les

économistes en vue d'augmenter l'efficacité économique. En revanche, cette même densité élevée est associée à des connotations négatives dans les grands ensembles. À ce titre, l'AUCAME (2008) distingue six types de bâtiments en fonction de leurs densités résidentielles (figure I-12) : des maisons individuelles (5 - 20 logts/ha), des maisons de ville (25 - 40 logts/ha), les grands ensembles (50 - 110 logts/ha), les immeubles en plots (110 - 150 logts/ha), les immeubles de rénovation (150 - 170 logts/ha) et les immeubles du centre-ville (160 - 200 logts/ha).

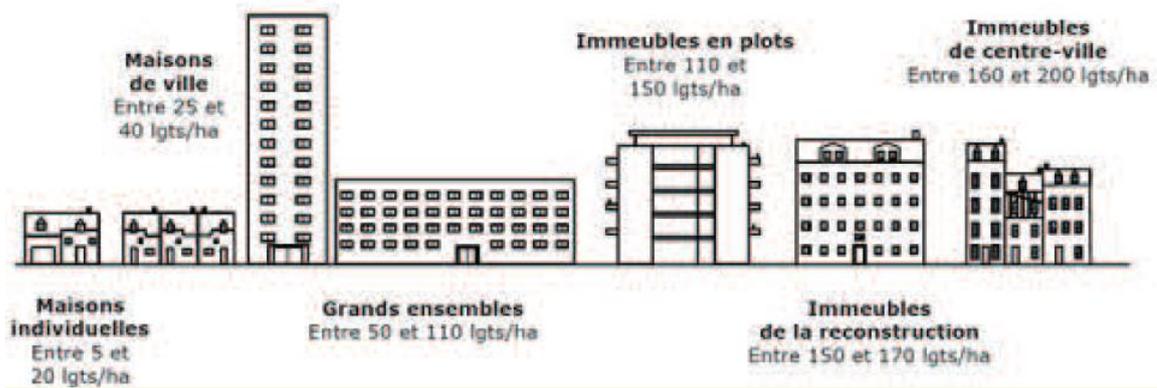


Figure I-12 : La densité résidentielle en fonction du type des bâtiments

Source : (AUCAME, 2008)

La question de l'influence de la densité urbaine, étant un indicateur morphologique de la forme urbaine, a été évoquée dans plusieurs études. Des rapports d'études sur cette question établies par le CETE de l'Ouest (2002), l'APUR (2003) et l'AUCAME (2008) soulignent la nécessité de distinguer entre densité réelle et densité perçue. La perception de la densité n'est pas la même pour par exemple les grands ensembles et le centre-ville. La densité urbaine dans les grands ensembles est considérée comme un facteur dégradant la qualité de vie malgré l'existence d'espaces verts et de loisir, contrairement au centre-ville qui est plus dense mais avec moins d'espaces aérés, mais qui attire plus de population. Sur ce point, Bourgeois (2015) a souligné que : « Plus que la densité réelle, il semblerais que ce soit la hauteur des bâtiments qui conduise à un sentiment d'oppression et de dégradation de la qualité de vie. Inversement, d'autres facteurs, comme l'environnement urbain, la convivialité et l'animation des quartiers améliorent la perception de la densité. Ainsi, les fortes densités bâties des centre-ville sont souvent perçus de manière positive » (Bourgeois, 2015).

L'influence de la densité urbaine sur la qualité de vie ne peut être estimée que dans une vision plus globale, mettant en corrélation les différents aspects de la densité avec d'autres facteurs liés à la qualité du paysage urbain et à son environnement bâti.

I.7.2. Formes urbaines et ségrégation sociospatiale : la concomitance étalement urbain et disparité spatiale

Le phénomène de la ségrégation sociospatiale est souvent évoqué en relation avec celui de l'étalement urbain. Les deux phénomènes sont en effet d'actualité universelle : « *L'étalement urbain et la ségrégation sociospatiale sont deux tendances majeures de l'urbanisation contemporaine* » (Pouyanne, 2006). L'étalement urbain et la ségrégation sociospatiale reflètent les deux des modalités contemporaines d'organisation de l'espace urbain. Il existe un consensus sur le constat que la ségrégation sociospatiale est l'une des conséquences de l'étalement urbain. Pour certains auteurs, elle n'est qu'une des facettes de la fragmentation des villes traduites par l'étalement urbain : « *La périurbanisation, qui permet à une partie de la population urbaine d'accéder à la propriété en périphérie des villes, est porteuse d'un processus de tri de la population dans l'espace et donc de ségrégation spatiale* (Charlot et al., 2009). D'autres auteurs voient qu'il s'agit de deux processus qui s'opèrent pratiquement avec des mécanismes d'évolution similaires, mais avec différence entre pays. Des familles de même classe de revenu se déplacent progressivement pour s'installer en périphérie de la ville formant au fil du temps des zones homogènes bien distinguées par rapport au reste de la ville. Ces mécanismes se diffèrent d'un pays à un autre. Aux États-Unis, là où s'est débutée cette tendance, c'est la classe riche qui a fait impulser la tendance de s'installer à l'écart des centres urbains donnant lieu à la périurbanisation. En Europe, le phénomène s'est tardivement déclenché, mais principalement alimenté par la classe moyenne. La hausse des prix dans les centres-villes a poussé les familles de moyens et faibles revenus à s'installer en périphérie de villes.

Plusieurs études empiriques ont mis en évidence l'interaction entre étalement urbain et ségrégation sociospatiale. À travers une étude économétrique portant sur les rapports entre étalement urbain et évolution des revenus fiscaux moyens des ménages par commune, Bresson, Madre et Piroette (2004) ont prouvé l'accroissement de la ségrégation entre 1986 et 1999. Ils mentionnent également qu'une tendance de ghettoïsation est à l'œuvre et qui touche aussi bien les communes les plus riches que les communes les plus pauvres². L'étude de Charlot, Hilal, et Bertrand (2009) effectuée sur 163 aires urbaines françaises, en se basant sur le suivi d'un indicateur de disparité sociale, considère que l'étalement urbain est une source de disparité spatiale et que : *l'intensité de la périurbanisation des cadres et des professions intermédiaires explique le degré de ségrégation sociale observé dans les agglomérations urbaines françaises* (Charlot et al., 2009). L'étalement urbain et la ségrégation sociospatiale sont en interaction et que l'une de ces deux dynamiques spatiales peut être une variable motrice de l'autre (figure I-13) comme le confirme Pouyanne (2006) qui a mentionné qu'« *il y a bien*

² Cité in (Mignot et Aguilera, 2004)

une tendance naturelle des agents d'une part à s'établir en périphérie, concourant ainsi à l'étalement, et d'autre part à opérer des regroupements géographiques sur la base d'un certain nombre de critères de ressemblance (revenu, ethnique, etc.), constituant ainsi des processus ségrégatifs » (Pouyanne, 2006).

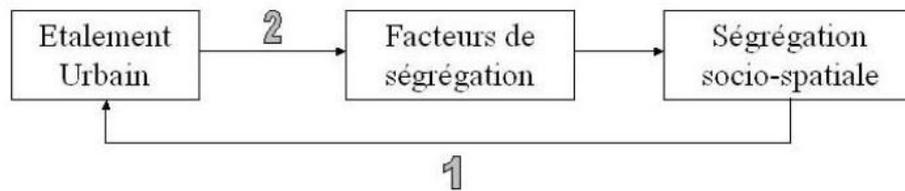


Figure I-13 : L'interdépendance entre étalement urbain et ségrégation sociospatiale

Source : (Pouyanne, 2006)

Les disparités spatiales se présentent davantage dans les villes ayant des formes urbaines plus étalées : « *le problème de la ségrégation sociospatiale est dépendant des formes urbaines dans la mesure où les prix des terrains influent sur la localisation des implantations résidentielles des individus* » (Bourgeois, 2015). Les tissus compacts sont considérés plus favorables aux interactions sociales, ils peuvent permettre la réduction de différentes formes de ségrégation sociospatiale en donnant plus de faveurs à la mixité sociale. Les nouvelles tendances de soutenabilité urbaine, telles que le *New Urbanism* et l'*Ecocity*, recommandent dans une vision d'équité sociale la mise en place de politiques foncières bien appropriées, permettant la mixité sociale dans les projets de densification urbaine. En France, par exemple, parmi les objectifs de la loi S.R.U de l'année 2000, on trouve la suppression du plafond de la densité et l'obligation d'une part de 20 % réservée au logement social (Pouyanne, 2006).

I.7.3. Formes urbaines et aménités spatiales

L'accessibilité aux différents types d'aménités spatiales est un élément déterminant de la compétitivité des villes à l'égard de la soutenabilité urbaine. Elle se rapporte aux aménités urbaines telles que le commerce, les services et les aménités récréatives qui englobent entre autres et les espaces de détente et de loisir. Elle est en rapport avec les aspects fonctionnels de la ville. La qualité de vie et la satisfaction des habitants sont fortement liées au niveau d'accessibilité aux services et aux espaces de récréation (Bramley et Power, 2009 ; Doi et al., 2008 ; Kweon et al., 2010 ; Nuvolati, 2009). Les formes urbaines se divergent en matière d'accessibilité. Chacune d'elles se distingue en même temps par des opportunités pour certaines aménités et des inconvénients pour d'autres. En ce qui concerne l'accessibilité aux espaces verts et ouverts, les formes étalées sont plus avantagées (Allain, 2010). Mais, des villes compactes ayant intégré des trames vertes dans leurs tissus urbains

peuvent assurer de meilleures accessibilités à ce type d'aménités. Dans ce sens, les corridors et les pénétrantes vertes offrent plus de faveurs pour améliorer l'accessibilité que les ceintures vertes. De par leurs implantations à l'intérieur des tissus urbains, les corridors et les pénétrantes vertes sont considérés comme des aménités de proximités. Par ailleurs, les ceintures vertes sont plus accessibles par les habitants des quartiers périphériques par rapport à ceux du centre-ville. D'une manière générale, les trames vertes ne sont pas tout à fait généralisées dans les villes compactes, ce qui influence négativement leurs qualités en matière d'accessibilité aux aménités vertes et de récréation (Bourgeois, 2015).

Quant aux aménités relatives aux services et au commerce, les villes compactes sont les plus avantagées. Ce modèle de villes assure plus de mixité fonctionnelle et donc plus d'accessibilité urbaine. Les habitants ont la possibilité d'accéder aux aménités avec moins de déplacements. En revanche, les villes étalées n'ont pas cette opportunité. En raison du caractère fragmenté de cette forme de villes, les bâtiments d'équipement et de services ne sont pas tout à fait en proximité de tous les habitants. L'accès à ce type d'aménités nécessite l'utilisation des moyens de transport ce qui conduit à l'augmentation des déplacements motorisés. On peut remarquer que les deux formes urbaines ne bénéficient pas de toutes les opportunités d'accessibilité à l'ensemble des aménités spatiales : « *Les modèles de villes à densité bâtie modérée améliorent l'accessibilité aux aménités vertes mais sont moins performants que le modèle des villes à forte densité bâtie pour l'accessibilité aux aménités urbaines* » (Bourgeois, 2015). Le modèle théorique de la ville fractale propose une forme urbaine pouvant assurer de meilleure accessibilité aux aménités urbaines et vertes. D'un côté, l'organisation multiéchelle des noyaux urbains que présente la ville fractale met en faveur l'accessibilité aux services urbains. De l'autre côté, le principe de génération du Téragone ou du Tapis du Sierpinski est une solution pour l'allongement des bordures qui conduit à l'augmentation de l'accessibilité aux aménités vertes et récréatives (Frankhauser et al., 2007 ; Tannier, 2009b). La ville fractale compacte apparaît comme une alternative pouvant assurer de meilleur compromis combinant l'accessibilité urbaine et l'accessibilité aux espaces verts ouverts.

I.7.4. Formes urbaines et dépenses économiques

L'impact des choix d'aménagement urbain sur les dépenses publiques est largement discuté dans la littérature. D'une manière générale, l'influence des formes urbaines sur les dépenses économiques concerne deux points principaux : l'efficacité économique des investissements et les coûts de viabilisation des nouvelles extensions urbaines (Bouinot, 2006 ; Camagni et al., 2002b ; Guelton et Navarre, 2010 ; Jaglin, 2010 ; Pouyanne, 2004). En effet, les coûts publics de viabilisation et raccordement en infrastructure sont plus importants dans les villes étalées. L'éloignement des

nouvelles zones urbaines, leurs faibles densités ainsi que les contraintes liées à la topographie sont en effet des sources de coûts supplémentaires qui pèsent plus sur les budgets intercommunales (Jaglin, 2010). Dans ce sens, un rapport d'étude comparative des coûts d'urbanisation projetée sur une période de 25 ans à travers l'ensemble des États-Unis estime une somme de 227 milliards de dollars supplémentaires que peut coûter l'étalement diffus par rapport l'urbanisation enrayée (Burchell et al., 2002). Une autre étude sur les villes suisses, établie par l'Office Fédéral du Développement Territorial suisse, mettant en comparaison cinq types d'urbanisation en fonction de leurs densités et en intégrant toutes les tailles des agglomérations, a conclu que le coût par habitant est plus élevé dans les zones bâties les moins denses : « *selon les calculs détaillés, il est établi que les coûts d'infrastructure par habitant sont nettement moins élevés si l'urbanisation se développe conformément au principe de la densification que dans le cas d'une viabilisation de nouvelles zones à utilisation extensive* » (ODT, 2017).

I.7.5. Formes urbaines, mobilité et consommation énergétique

Les villes sont actuellement jugées grand consommateur d'énergie polluante. Les bilans mondiaux révèlent qu'entre 60 et 80 % de l'énergie primaire consommée est urbaine (Grubler et al., 2012). En 2013, elles étaient responsables d'environ de 70 % d'émission du CO₂ mondial (UN-Habitat, 2016). D'une manière générale, la consommation énergétique de la ville se répartit entre trois secteurs : le transport urbain, les bâtiments résidentiels et l'activité économique et les services (Ishii et al., 2010 ; Ribeiro et al., 2017). Plusieurs facteurs peuvent influencer le comportement énergétique de la ville, les principaux facteurs qu'on peut citer sont : la forme urbaine, le transport, les besoins énergétiques des bâtiments, et les choix des politiques urbaines (Ewing et al., 2008 ; Owens, 1992). Des études ont révélé que les besoins thermiques et électriques des bâtiments résidentiels représentent environ 40 % de la consommation urbaine, tandis que les besoins du transport représentent le tiers (Brown et al., 2009 ; Steemers, 2003).

Rendre les villes contemporaines moins énergivores constitue un objectif primordial du développement soutenable. Dans cette perspective, les responsables nationaux et locaux se sont engagés pour la mise en place de politiques de réduction de la consommation énergétique. Les nouvelles doctrines urbaines recommandent la prise en compte de la forme urbaine en donnant plus de faveurs à la ville compacte comme alternative écologique permettant l'amélioration du comportement énergétique des agglomérations urbaines. L'amélioration de la performance énergétique de la ville fait appel aux différents niveaux d'intervention : à l'échelle architecturale, celle du bâtiment, à l'échelle de l'îlot et du quartier, et à l'échelle de la macroforme. Des normes et labels, tels que le LEED, le BREAM et la HQE, exigent la prise en compte des aspects énergétiques

aussi bien dans les nouveaux projets que dans les opérations de rénovation architecturale et urbaine. À l'échelle urbaine, la configuration urbaine joue un rôle important dans la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Celle-ci peut être envisagée à travers une démarche d'optimisation de la typologie d'implantation des bâtiments à une échelle intermédiaire. Ce qui peut contribuer à l'augmentation de la performance énergétique de l'ensemble de la ville (Dall'O' et al., 2012 ; Pauleit et Duhme, 2000 ; Whitford et al., 2001).

La forme urbaine influence aussi les besoins énergétiques des moyens de transport. Les déplacements sont plus importants dans les formes étalées (Camagni et al., 2002a ; Le Néchet, 2011 ; Pouyanne, 2007). Le choix modal dans les villes étalées donne plus de dépendance à l'automobile particulière (figure I-14). La mobilité motorisée est constatée parmi les principaux facteurs aggravant l'actuelle situation environnementale. Le secteur du transport occupe une part importante de la consommation énergétique des villes. Les bilans mondiaux révèlent qu'en 2010, la part des énergies polluantes consommées par ce secteur était de l'ordre de 25 % (IPCC, 2014), 40 % de cette consommation provient de la mobilité urbaine (EEA, 2014). La réduction de la consommation énergétique des villes fait du transport urbain un enjeu majeur à mettre en avant dans la planification et la gestion de l'espace urbain. Le lien entre forme urbaine et déplacements motorisés est largement étudié. Plusieurs études ont montré que la consommation des carburants fossiles augmente avec la diminution de la densité urbaine (Kenworthy et Laube, 2001 ; Newman et Kenworthy, 1989 ; Vivier et Pourbaix, 2006). Ces études recommandent la mise en place de politique de densification urbaine et la promotion des modes doux de transport.

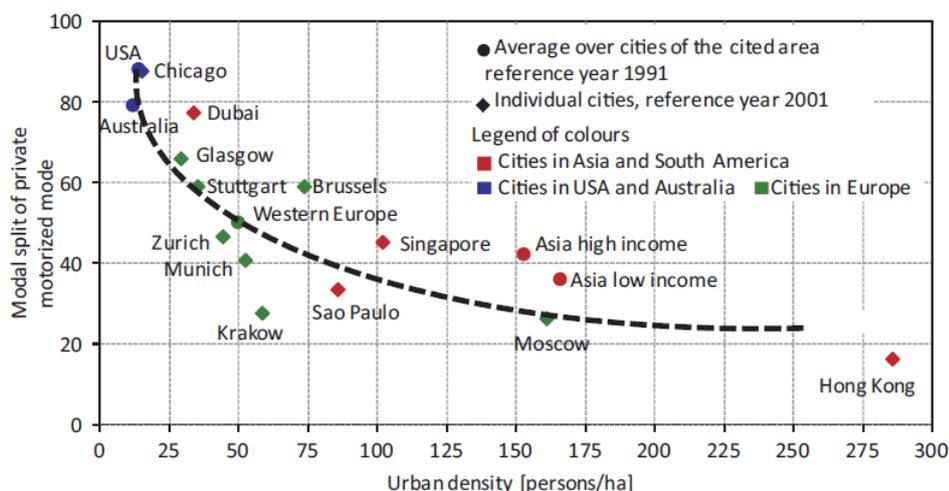


Figure I-14 : La part de l'automobile en fonction de la densité urbaine

Source : (Kenworthy et Laube, 2001 ; Newman et Kenworthy, 1989 ; Vivier et Pourbaix, 2006)

D'un point de vue énergétique, la ville est considérée comme système énergétique à part entière (Grubler et al., 2012). La performance de ce système est davantage offerte par le modèle que présente la ville compacte. L'attractivité aux modes de transport doux augmente proportionnellement avec la densité urbaine : « *Urban residents' mobility choices are strongly linked with density. In denser areas there is a higher propensity to opt for modes other than private cars. The shorter trip distances associated with high density areas naturally lend themselves to more walking and cycling. Higher density areas also involve high concentration of activities, thereby allowing public transport to efficiently connect the locations where the origins or destinations of trips are concentrated* » (UITP, 2015). Pour d'autres études, la ville compacte n'est pas le modèle parfait de point de vue mobilité. Certains problèmes liés au transport comme la congestion et le ralentissement des vitesses d'accès sont souvent en rapport avec la surdensité urbaine. Les tissus urbains denses ne contiennent pas des réseaux réservés aux déplacements motocycles (R Allain, 2005 ; Bochet, 2007). La densité urbaine n'est pas donc le seul facteur à prendre en compte pour la mise en œuvre d'une mobilité soutenable. L'intégration des espaces ouverts et des trames vertes qui permettent l'aménagement des allées de circulation piétonne et motocyclable peut contribuer à la promotion des modes doux de déplacement urbain (X. (Jason) Cao et al., 2009 ; Wang et al., 2011).

I.7.6. Formes urbaines et processus écologiques : positionnement épistémologique et méthodologique

Les villes sont responsables d'environ 70 % d'émission planétaire du CO₂ (EEA, 2014 ; UN-Habitat, 2016). La ville constitue l'écosystème artificiel le plus manifestant. Sa formation résulte de l'interaction d'un ensemble de facteurs humains et naturels. En matière d'occupation du sol, la ville représente aussi la plus immense tache artificielle. L'évolution de ces taches artificielles n'est pas aussi passive. La croissance spectaculaire des villes, enregistrée récemment, est jugée principale génératrice de nuisances environnementale. Les bilans recensent une consommation excessive de terres agricoles et naturelles, surexploitation des ressources naturelles, dégradation de la biodiversité. À une échelle plus globale, les villes contribuent continuellement à l'aggravation de phénomènes plus globaux : pollution, effet de serre, réchauffement climatique, recul de la biodiversité, etc. plus de 70 % d'émission du CO₂ sont dues de la part des villes (IPCC, 2014). La croissance démesurée des villes contemporaines, poussées par l'amplification de l'activité humaine, a abouti à des conséquences néfastes atteignant l'équilibre et le fonctionnement de notre macroécosystème : la biosphère.

Les régions fragiles sont plus affectées par ce phénomène d'urbanisation galopante, notamment dans les pays en voies de développement. Les milieux oasiens appartiennent à cette catégorie.

L'urbanisation est plus accentuée dans ses territoires sahariens dont les contraintes géographiques et environnementales sont plus pesantes. Les études portant sur l'amplitude de l'urbanisation et les mutations morphologiques et socioéconomiques accompagnantes sont nombreuses (Alkama, 2005b ; Belguidoum, 2005 ; Côte, 1998, 2005, 2012 ; Jouve et Jouve, 2012 ; Kouzmine, 2012 ; Kouzmine et Fontaine, 2018). Le suivi de l'artificialisation des espaces naturels et la compréhension des formes d'urbanisation et leurs effets sur les écosystèmes oasiens ne figure pas cependant en explorant la littérature scientifique concernée par ces milieux comme par ailleurs (Alberti, 2008 ; Alberti et al., 2007 ; Wentz et al., 2018). Les aspects écologiques sont moins considérés autant chez les chercheurs que chez les praticiens de l'urbanisme et de l'aménagement (Armand, 2016 ; Bendjelid et al., 2018 ; CNES, 2002 ; Côte, 2012 ; Hamdi-Aissa et Girard, 2004 ; Hammache, 2015 ; Kouzmine, 2012 ; Otmane et Kouzmine, 2011). La protection et même plus tard la promotion du potentiel oasien ne peuvent être envisagées qu'à travers la prise en compte des considérations écologiques particulières qui se diffèrent d'un milieu à un autre (Ahern, 2013 ; Andersson, 2006 ; Osmond et Pelleri, 2017 ; J. Wu, 2010, 2014). La présente étude s'inscrit dans cette optique. Elle consiste, à travers une approche spatiale, en considérant les formes étudiées comme résultante de l'interaction de l'activité humaine avec l'environnement physique et naturel, à caractériser les différentes formes d'urbanisation en mettant en relation l'évolution des surfaces urbanisées avec les transformations spatiotemporelles affectant les paysages oasiens. La finalité est double : d'une part, tenter de mettre en lumière les rapports entre formes urbaines et processus écologiques, d'autre part, montrer l'utilité conceptuelle et méthodologique que présente l'écologie du paysage urbain pour la compréhension et l'évaluation des dynamiques spatiotemporelles affectant les écosystèmes oasiens.

Conclusion

La transcription du concept de la soutenabilité urbaine dans le développement urbain par les aménageurs est envisageable à travers le remodelage des formes urbaines. À ce titre, la morphologie urbaine se présente comme une clé importante, étant donné qu'elle s'intéresse à la description des formes apparentes produites par la société. À la faveur de la vision multiscalaire qu'elle porte, elle aide à caractériser le profil de la ville d'un point de vue de soutenabilité urbaine. L'étude de l'étalement urbain n'est envisageable qu'à une échelle globale qui inclut l'ensemble de l'espace urbain avec son environnement immédiat, c'est donc l'échelle de la Macroforme. La transcription du concept du développement soutenable dans le développement urbain a mis en avant la Macroforme urbaine comme enjeu inévitable dans toute alternative d'aménagement urbain.

Si le consensus universel a donné avantage aux villes compactes comme référence de soutenabilité urbaine, les débats scientifiques et professionnels se consentent aussi qu'il n'existe pas une définition

bien précise d'une forme urbaine soutenable, mais des formes qui répondent le plus aux impérative de la soutenabilité.

Le meilleur compromis qui est largement défendu et recommandé par les nouveaux mouvements urbanistiques, tels que le *Smart growth* et le *New Urbanism*, est d'opter pour le « polycentrisme compact » ou la « concentration décentralisée ». L'opportunité que porte ce modèle de développement spatiale est, d'un côté, de favoriser la mixité sociale et les déplacements doux, de l'autre côté, il offre la possibilité d'augmenter l'accessibilité aux aménités naturelles à travers l'augmentation des bordures urbaines qui, par la même, permettent la création d'espaces vides aussi accessibles et en même temps favorables aux extensions urbaines. Dans ce sens, l'interaction de la ville avec son environnement, notamment dans les milieux fragiles comme ceux des oasis, doit être nécessairement mise en avant dans toute politique de soutenabilité urbaine, par la mise en place et d'une manière généralisée de dispositifs d'évaluation de l'impact des formes d'aménagement urbain proposées.

Chapitre II. Une approche écologique de la soutenabilité urbaine : les apports de l'écologie du paysage urbain

Introduction

L'aggravation des problèmes environnementaux enregistrés récemment sur l'ensemble de la planète a amené les scientifiques à faire le recours aux bases théoriques et méthodologiques développées par les écologues pour pouvoir comprendre et appréhender les interactions entre les sociétés et leurs environnements. L'écologie moderne est née d'une prise de conscience des effets (pollution, épuisement des ressources naturelles, disparition d'espèces vivantes, changements climatiques...) de l'activité de l'homme sur son environnement (industrie, transport, utilisation d'engrais, déchets industriels...). Elle s'intéresse donc à l'homme en tant que composante de l'écosphère. L'un des objectifs de l'écologie est de détecter, d'analyser et de combattre les dysfonctionnements éventuels d'un écosystème. Elle recherche également le bien-être des êtres humains sous la forme d'une harmonie avec son environnement naturel.

Le présent chapitre porte sur la vision de l'écologie du paysage urbain au développement urbain. Cette discipline fleurissante offre un cadre épistémologique et méthodologique assez riche permettant la compréhension et l'évaluation de l'impact de l'activité anthropique sur le milieu environnant. Les principaux concepts abordés dans ce chapitre et qui sont en rapport avec notre thématique seront abordés en premier lieu. Le reste de ce chapitre sera focalisé sur l'application des principes et des méthodes de cette discipline sur les milieux urbains et périurbains en essayant de mettre en avant les concepts de continuité écologique et connectivité paysagère.

II.1. L'écologie du paysage urbain : concepts et approches

II.1.1. Éléments de définition

Étymologiquement, le terme « écologie » vient du mot grec « *Oikos logos* ». *Oikos* signifie habitat ; *logos* signifie connaissance ou science. Il s'agit donc d'une science de l'habitat. Cette discipline est initiée en 1866 par le botaniste allemand Ernest Haeckel pour l'étude des rapports entre les organismes vivants et leurs milieux de vie. Ce domaine s'est considérablement évolué pour intégrer l'étude des conditions d'épanouissement des espèces vivantes, l'interaction entre elles même et avec leurs environnements naturels. Plusieurs concepts ont été développés au sein de cette discipline en la distinguant et lui attribuant sa particularité épistémologique et méthodologique. Parmi les

principaux concepts, on trouve : Biotope, Biocénose, et écosystème (Fischesser et Dupuis-Tate, 2017).

II.1.1.1. Biotope

Un biotope correspond à un milieu de vie géographiquement délimité, dans lequel les conditions écologiques (température, humidité, etc.) sont homogènes et favorables à l'épanouissement des êtres vivants qui y résident (appelés biocénose) et avec lesquels ils forment un écosystème.

Les biotopes se caractérisent par un ensemble de paramètres hydrologiques, géologiques, chimiques, climatiques et géographiques offrant un environnement parfois particulier duquel certaines espèces peuvent dépendre totalement. C'est pourquoi que dans des mesures de préservation d'espèces, il est nécessaire de protéger au préalable leur milieu de vie.

De façon évidente, un biotope particulier, bien qu'autonome, est en interrelation avec les milieux voisins, avec lesquels il échange de la matière organique et minérale ou de la lumière par exemple³.

II.1.1.2. Biocénose

La biocénose, aussi appelée communauté, correspond à l'ensemble des êtres vivants (animaux, végétaux, champignons, bactéries, etc.) hébergés dans un même milieu qui est le biotope. La biocénose et le biotope forment ensemble un écosystème⁴.

II.1.1.3. Écosystème

Une notion fondamentale en écologie, proposée par François-Alphonse Forel (1892). Elle correspond à un système composé d'un environnement (biotope) et un ensemble d'espèces vivantes (biocénose) qui y vivent, s'y nourrissent et s'y reproduisent. Il s'agit d'une unité écologique au sein duquel s'opèrent des échanges cycliques de matières et d'énergie, résultant des interactions entre les organismes vivants eux-mêmes et leur milieu de vie. En 1942, Raymond Lindemann a proposé une nouvelle approche à l'écologie, qui se focalise sur la compréhension des systèmes écologiques (les écosystèmes), leurs constitutions et leurs modes de fonctionnement. Cette approche est depuis lors devenue essentielle dans les études écologiques.

Les écosystèmes sont abordés à différentes échelles selon leurs tailles et leurs fonctions. Les échelles des écosystèmes peuvent varier du plus petit atome jusqu'au macroécosystème qui est notre biosphère (ou la sphère de la vie). Les écosystèmes sont essentiellement caractérisés par leurs équilibres internes. Une perturbation de l'écosystème peut être provoquée par la modification d'un

³ <https://www.futura-sciences.com>

⁴ Idem ¹

ou plusieurs paramètres conduisant à une rupture dans l'équilibre écologique. Ces variations peuvent être :

- Biologiques : apport ou disparition importante d'organismes constituant la biocénose ;
- Physiques : modification de facteurs abiotiques tels que le PH, la température ;
- Chimiques : pollutions diverses.

Parmi les principaux perturbateurs, on trouve : les hydrocarbures, les antibiotiques, les détergents, les pesticides (organochlorés, organophosphorés, carbamates), les matières minérales, les métaux lourds, etc.

II.1.2. Déséquilibre et dysfonctionnement des écosystèmes

Le long de son histoire, l'homme a vécu en harmonie avec son milieu. Mais à partir du dernier siècle, l'industrialisation de l'activité humaine et l'explosion démographique accompagnante ont abouti à mettre l'environnement en situation de dégradation. La surexploitation des ressources naturelles ainsi que le rejet et l'émission des matières nocives et d'une manière inappropriée menace actuellement le fonctionnement des écosystèmes à différentes échelles et l'équilibre global de notre biosphère.

De nos jours, il y a plus de six milliards d'êtres humains qui se concentrent dans des villes dont la majorité est surpeuplée et en confrontation à des problèmes complexes de pollutions et de risques sanitaires. En effet, de nombreux facteurs ont participé à l'amplification de cette crise des villes contemporaines et à l'enlaidissement et la détérioration de l'environnement urbain.

II.2. Un champ pluridisciplinaire florissant

La spatialisation des thèmes faisant partie intégrante des intérêts de l'écologie a conduit à l'émergence de l'écologie du paysage. Cette nouvelle discipline, initialement proposée par le biogéographe Carle Troll en 1939, permet d'associer les approches spatiales propres aux géographes (approches horizontales) aux approches fonctionnelles des écologues (approches verticales) : « *Caractérisée par une forte interdisciplinarité, l'écologie du paysage permet pourtant d'associer sciences naturelles et sciences humaines, car ses domaines d'application sont particulièrement vastes* » (Fournier, 2015). L'actuelle *landscape ecology* n'a vu son essor comme domaine scientifique de large portée mondiale que dans les années 80, période de vulgarisation des images satellites et des ordinateurs. La fondation de l'association internationale d'écologie du paysage (*International Association for Landscape Ecology IALE*) en 1982 a donné lieu à une série de publications et d'ouvrages (Forman & Godron, 1986 ; Risser et al., 1984 ; Turner et al., 1989 ; Urban et al., 1987). Ces travaux scientifiques posent par la suite les fondements d'une discipline portant sur « *les interactions entre paysage et activité anthropique* » (Bourgeois, 2015).

Grâce à la « spatialisation » des approches issues des études des milieux naturels, cette nouvelle technologie a permis le développement des réflexions écologiques relatives à l'hétérogénéité spatiale, les dynamiques non équilibrées, les conversions de l'occupation des sols, etc. La fertilité du cadre conceptuel et analytique offert par l'écologie du paysage lui a permis de s'imposer comme un référentiel épistémologique et méthodologique incitant les géographes, les urbanistes et les aménageurs d'y faire le recours, notamment pour la compréhension et l'évaluation des phénomènes se rapportant à l'occupation et à l'utilisation des sols urbains et périurbains (Wu, 2013 b).

II.2.1. Deux écoles de pensée

L'écologie du paysage est un domaine interdisciplinaire qui porte sur la compréhension et l'amélioration des rapports entre les processus écologiques et les modèles spatiaux à différentes échelles (Wu et Hobbs, 2007). Elle concerne aussi l'étude des interactions entre phénomènes et processus dans un milieu abritant différents habitats : végétal, animal et humain (Vink, 1983)⁵. Plusieurs définitions sont ainsi adoptées avec différents points de vue. Des points de vue se focalisent sur le développement de cadre conceptuel permettant la description des rapports spatiaux ; d'autres mettent en avant la nécessité de fonder une science pour l'action ; d'autres auteurs insistent sur l'importance de développer des démarches pluridisciplinaires (Décamps, 2004). Wu (2013) considère que l'écologie du paysage est globalement dominée par deux écoles de pensée : la vision européenne et la vision nord-américaine. La pensée européenne est caractérisée par une vision davantage holistique et humaniste, dont les recherches sont inspirées des usages et axées sur les solutions. Par ailleurs, l'école nord-américaine est dominée par une vision plus biologique donnant plus de privilège aux aspects analytiques avec plus d'intérêt donné aux questions et aux études basées principalement sur les sciences fondamentales. Ces deux visions ne sont pour autant ni inclusives ni exclusives, elles sont complémentaires. D'autres visions ont certainement leurs places, comme celle de l'écologie australienne qui a plus de privilège aux approches pragmatiques et fonctionnelles, et rattachées globalement aux questions de gestion, de restauration et de conservation des paysages (Ludwig et al., 1996).

II.2.2. Le paysage : un niveau spatial privilégié en écologie du paysage

Le terme « paysage » constitue actuellement un concept clé dans plusieurs domaines, allant des sciences sociales jusqu'aux sciences géographiques et écologiques. Avec l'essor de l'écologie du paysage durant ces dernières décennies, le concept du paysage a acquis une place marquante dans la littérature scientifique interdisciplinaire. Toutefois, cette interdisciplinarité a attribué à ce concept une pluralité d'acceptations avec origines et interprétations diversifiées. La même notion peut

⁵ Cité in (Agujedad, 2009)

désigner un paysage naturel, un paysage socioéconomique, un paysage culturel, un paysage mental ; il peut renvoyer aussi à un paysage vu, ou même à un paysage illustré par un d'artiste (Mitchell, 2000 ; Tress et Tress, 2001).

Même en écologie du paysage, cette notion accepte plusieurs significations ; elle est en rapport avec l'échelle spatiale et la composition du paysage (figure II-1). À titre d'exemple, le paysage est défini comme une étendue géographique de quelques kilomètres, ce qui correspond à une échelle humaine du paysage (Forman, 1981 ; Turner et Gardner, 2015). C'est à cette échelle que s'est originellement développé le champ de l'écologie du paysage en Europe, pour être par la suite généralisée la plupart des études à travers le monde (Forman et Forman, 1995). En écologie du paysage, l'échelle humaine correspond globalement aux unités géographiques telles que les zones urbaines, les bassins versants ainsi que les autres entités spatiales perceptibles par la vision humaine (Gobster et al., 2007). Elle concerne ainsi le public, les décideurs et les chercheurs conscients du contexte environnemental dans lequel ils vivent, travaillent et s'engagent dans des activités de loisir (Wu, 2013 b).

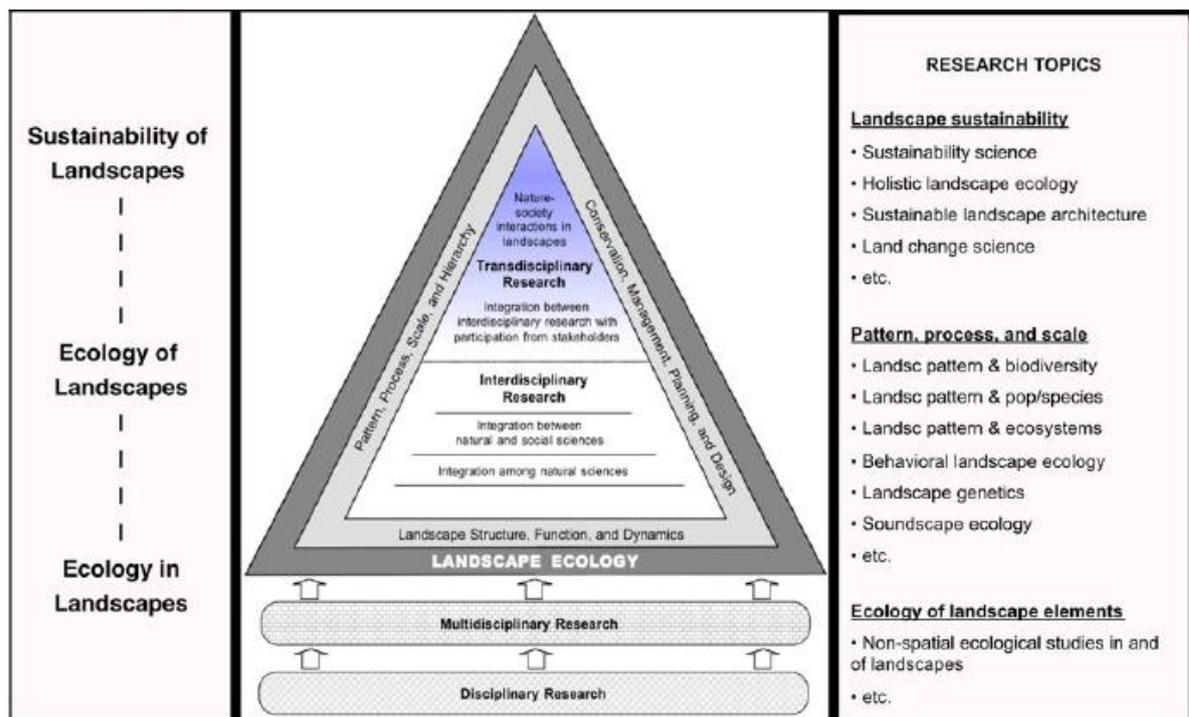


Figure II-1 : Vision hiérarchique de l'écologie du paysage

Source : (Wu, 2013)

L'écologie du paysage cherche donc à comprendre les interférences entre la structure de l'espace, étant contenant, et les processus qui s'opèrent par le biais des dynamiques des populations, des communautés et des écosystèmes. L'écologie du paysage est ainsi décrite selon les questions abordées. Elle porte sur l'influence de la configuration spatiale sur le fonctionnement des processus écologiques, elle porte également sur les rapports tissés entre les espèces vivantes elles-mêmes et

avec leurs milieux de vie : ici, le paysage est approché comme une entité spatiale hétérogène. L'écologie du paysage cherche à prendre en considération l'ensemble des aspects constituant les problématiques relatives aux paysages. Les composantes humaines et naturelles sont autant prises en compte (Aguajad, 2009). Cette multidimensionnalité fait de l'écologie du paysage un domaine pluridisciplinaire englobant une pluralité thématique et une diversité des approches développées : « *Cela signifie que l'écologie du paysage est pluridisciplinaire par essence, puisqu'elle intègre les sciences de l'espace et l'espace* » (Aguajad, 2009).

II.2.3. L'écologie du paysage : théories et concepts de base

II.2.3.1. La théorie biogéographique des îles

La théorie biogéographique des îles cherche à expliquer les conditions d'épanouissement des espèces en fonction de la distribution spatiale des habitats accueillant ces espèces (figure II-2). Selon cette théorie : « *les grandes îles comportent un nombre d'espèces plus importants que les petites îles et les îles proches des continents comportent plus d'espèces que les îles les plus isolées* » (Bourgeois, 2015). Cette théorie constitue un modèle important qui a influencé l'écologie du paysage et a suscité l'élaboration de nombreuses recherches en écologie urbaine (MacArthur et Wilson, 1967). Malgré la faisabilité de cette théorie, en raison de la « clarté de ses principes de base » (Aguajad, 2009), son application sur les milieux urbains est soulignée comme difficile, compte tenu des particularités et des différences des habitats urbains par rapport aux ceux des îles : « *D'abord, dans un cadre urbain, il n'existe généralement pas une seule zone source centrale au sens écologique du terme. Ensuite, en ville, la matrice peut ne pas être aussi hostile que l'eau entourant les îles car il existe en milieu urbain des connexions entre les taches d'habitats qui favorisent la dispersion des espèces* » (Aguajad, 2009). Néanmoins, en tenant compte de ces différences, le recours à la théorie biogéographique des îles a pu appuyer les investigations cherchant à expliquer l'influence des propriétés spatiales des habitats urbains sur l'épanouissement de la biodiversité (Aguajad, 2009 ; Wu, 2013a).

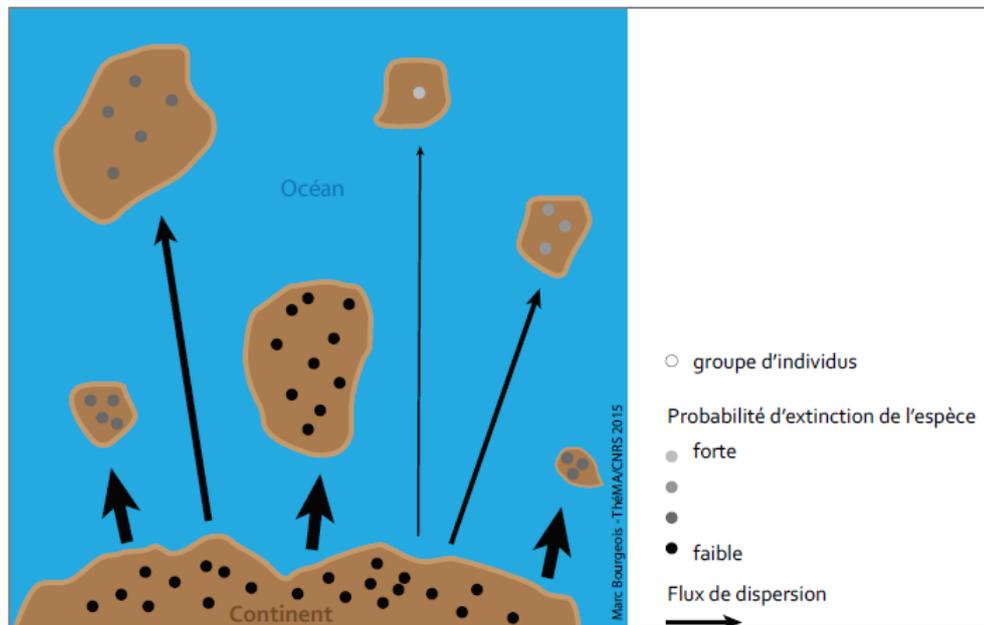


Figure II-2 : La théorie biogéographique des îles

Source : (Bourgeois, 2015, d'après MacArthur et Wilson, 1967)

II.2.3.2. La théorie des métapopulations

La théorie des métapopulations présente aussi un autre cadre important pour la recherche en écologie du paysage urbain. Le concept de « métapopulation », introduit la première fois en 1969 (Levins, 1969), trouve son émergence dans la théorie biogéographique des îles. Il se rapporte généralement à la dynamique des populations au sein des taches d'habitat continentales. Selon cette théorie, la métapopulation est une population formée de sous-populations soumises à des dynamiques locales d'extinction et de colonisation (figure II-3). Dans un milieu donné, la persistance d'une métapopulation est conditionnée par le rapport entre taux d'extinction et taux d'immigration (Levins, 1969).

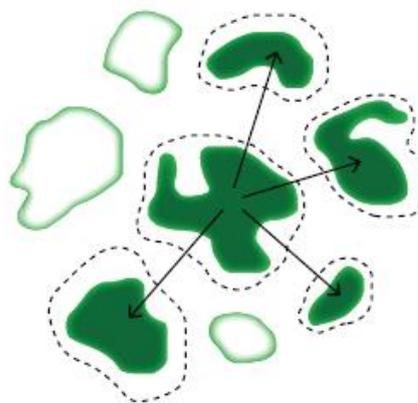


Figure II-3 : Une métapopulation

Source : (Levins, 1969)

Pour Hanski et Gilpin (1991), une métapopulation est un ensemble de sous-populations interconnectées par des individus qui se dispersent. La stabilité d'une métapopulation est conditionnée par deux propriétés qui sont en rapport avec les taches accueillantes : leurs qualités définies par leurs formes ainsi que les ressources qu'elles présentent, et leurs aptitudes de recevoir et émettre des individus (Bourgeois, 2015). Plusieurs modèles ont été développés à partir de cette théorie. Parmi ces modèles, on peut trouver le modèle « source-puits » (Pulliam, 1988) et le modèle des « populations fragmentées » (Gilpin et al., 1991)⁶. Dans le premier modèle, celui de source-puts, la répartition des espèces est liée d'une part à l'aptitude des espèces à coloniser de nouvelles taches à partir de leur tache (tache source) et, d'autre part, à la capacité de la tache colonisée (tache source) de recevoir et d'assurer les conditions favorables permettant leur épanouissement. Dans le second modèle, celui des populations fragmentées, la colonisation concerne toutes les taches d'habitats avec un important flux de dispersion assurant la liaison entre ces taches entièrement habitées (Bourgeois, 2015).

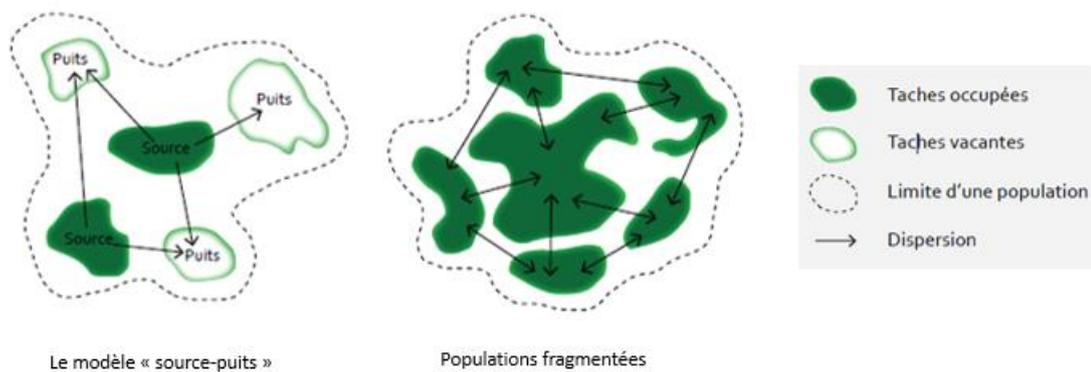


Figure II-4 : Des métapopulations

Source : (Bourgeois, 2015)

II.2.3.3. La perturbation intermédiaire

L'hypothèse de la perturbation intermédiaire est une troisième théorie qui a trouvé plusieurs applications en écologie du paysage (Connell, 1978). L'hypothèse de base de cette théorie est que : « la richesse des espèces est plus élevée dans les sites intermédiaires que dans les sites fortement perturbés ou non perturbés » (Aguéjdad, 2009). Plusieurs études ont mis l'accent sur la faveur des

⁶ Cité in (Bourgeois, 2015)

sites intermédiaires par rapport aux sites plus ou moins perturbés quant à la richesse et la diversité des espèces (Blair et Launer, 1997 ; Jokimäki et Suhonen, 1993).

II.2.3.4. Représentation spatiale de la mosaïque paysagère

En écologie du paysage, les structures paysagères sont spatialement lisibles à travers la notion de mosaïque paysagère (Forman & Godron, 1986). Celle-ci est considérée comme le modèle théorique de base par le biais duquel l'organisation spatiale du paysage peut être appréhendée. Il s'agit d'une vue zénithale du paysage. Trois éléments composent la mosaïque paysagère : les taches, les corridors et la matrice.

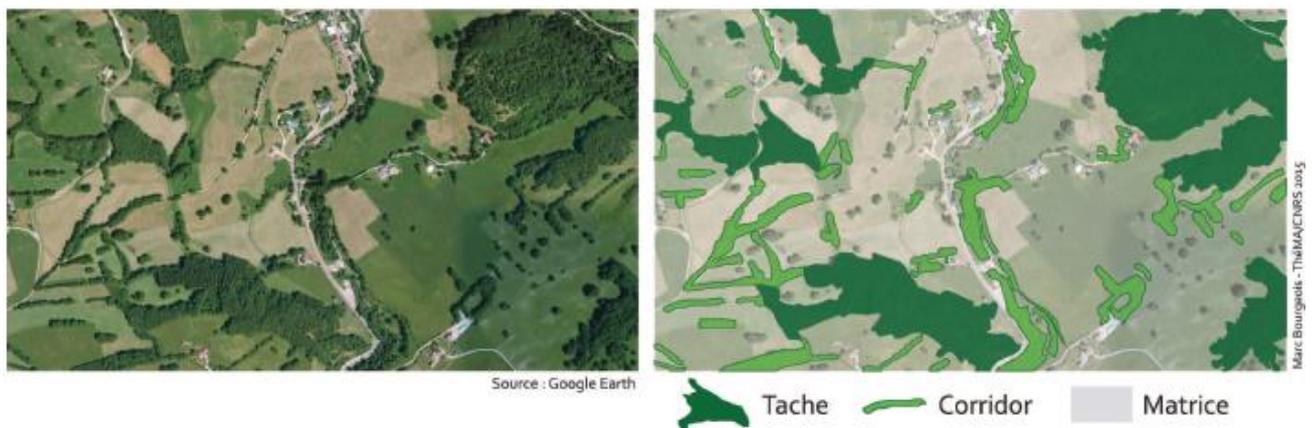


Figure II-5 : Une vue représentative d'une mosaïque paysagère (Commune de Foncine-le-Bas)

Source : d'après (Forman et Godron, 1986)

Ces notions sont généralement employées dans l'étude de la fragmentation des formes, de leurs connectivités, de la diversité des espèces et de leurs hétérogénéités, de la variété des fragments et les échelles d'étude du paysage (Aguejdad, 2009).

II.2.3.4.a. Les taches

Les taches ou fragments constituent les éléments de composition des paysages (Urban et al., 1987). Elles sont formées d'un intérieur et une lisière (figure II-6). Dans la littérature, plusieurs appellations correspondent à ses éléments de composition : écotope, composante, habitat, site, unité de paysage, ainsi que d'autres (R. T. Forman et Forman, 1995). Les taches peuvent être définies comme « *des portions d'espace non linéaires et différentes en apparence de leur environnement. Les taches sont des régions homogènes pour une propriété donnée* » (Aguejdad, 2009). Ces fragments spatiaux forment l'habitat où le lieu d'hébergement des espèces animales et végétales. Les conditions d'épanouissement et de vie de cette biocénose sont étroitement liées aux états et aux configurations de ces entités de paysages qui conditionnent l'interaction de différents organismes vivants constituant la biodiversité, le déplacement des animaux, le transfert d'énergie et de matière ainsi que l'abondance

ou la rareté dans la composition spatiale. Spatialement, les taches se distinguent par leurs morphologies, leurs aspects surfaciques, leurs abondances et par leurs dispositions par rapport à l'ensemble du paysage. Ce dernier point peut être abordé à travers l'étude de la continuité ou la discontinuité spatiale, des éléments descriptifs sont à examiner comme la contiguïté des fragments, leurs proximités, leurs éloignements, etc. (Aguajad, 2009).

II.2.3.4.b. Les corridors

Les corridors sont des bandes relativement étroites et organisées généralement en réseau. Avec cette forme linéaire, ces éléments du paysage servent comme éléments assurant la liaison entre taches qui accueillent le même type d'habitat (Figure II-6). Les corridors jouent un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes. Ils permettent le déplacement des populations et le transfert de matière et d'énergie. Mais, d'un autre côté, ils peuvent constituer une barrière entravant le mouvement de certaines espèces vivantes (Aguajad, 2009). Néanmoins, les corridors ne sont pas considérés comme éléments d'habitat quoiqu'ils assurent les conditions de mouvement et de transfert dont les espèces vivantes ont besoin : « *un corridor permet les déplacements d'individus entre deux taches d'habitat mais sans offrir les conditions nécessaires à leur survie. Il ne fait donc pas, en lui-même, partie de l'habitat d'une espèce* » (Pereboom, 2006).

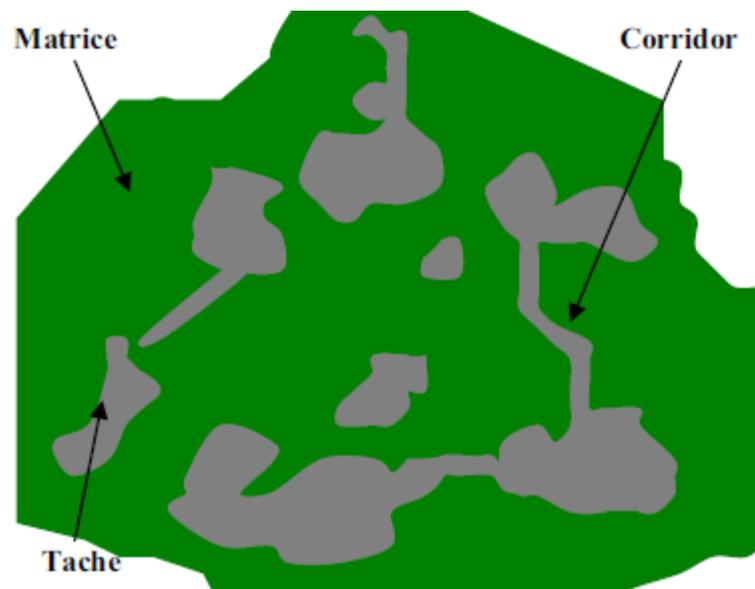


Figure II-6 : Éléments de constitution d'un paysage

Source : (Aguajad, 2009 d'après Clergeau, 2007)

À l'image des taches, les corridors peuvent se distinguer par leurs morphologies, leurs positions, leurs tailles (longueurs, largeurs), connectivité, etc. (Aguedad, 2009).

II.2.3.4.c. La matrice

La matrice correspond au milieu qui environne les fragments d'habitat. La structure et la constitution de la matrice sont différentes de celles des taches et des corridors : « *la matrice est donc devenue synonyme de milieu (plus ou moins) hostile à une espèce* » (Pereboom, 2006). Cet élément de paysage est souvent composé d'une grande variété de classes qui peuvent être définies par leurs formes ou leurs compositions (Aguedad, 2009).

Les taches, les corridors et les matrices se présentent en réalité avec une multitude de formes, de tailles et de dispositions. Leurs configurations sont en fait la résultante d'interaction de facteurs physiques, biologiques et sociaux. Le modèle d'organisation spatiale que présente un paysage peut donc conditionner les processus écologiques et peut aussi être un facteur déterminant de sa richesse biologique : « En effet, il est connu que des changements de taille et de connectivité des taches causent des changements au niveau de la richesse des espèces, la distribution et la persistance des populations » (Aguedad, 2009).

II.2.4. Paysage et connectivité écologique

La connectivité paysagère correspond au degré de communication ou de mouvement permis entre taches d'habitat préférentiel pour une espèce donnée. Il s'agit d'une propriété paysagère par laquelle les individus trouvent les possibilités de se déplacer entre les différentes taches d'habitat (Taylor et al., 1993). Deux éléments principaux sont considérés comme déterminants de la connectivité : la configuration spatiale du paysage et le mode d'interaction caractérisant le mouvement des individus (Wiens et al., 1997). Deux types de connectivités sont à distinguer (Merriam, 1984) : la connectivité structurelle et la connectivité fonctionnelle. La connectivité structurelle se rapporte à une disposition de liaison spatiale des structures d'une entité paysagère tandis que la connectivité fonctionnelle est définie par l'influence des structures paysagères sur les espèces vivantes. D'une règle générale, la connectivité fonctionnelle pour un individu donné est en rapport à la fois avec les taches d'habitats et la composition de la matrice paysagère englobant les taches elles-mêmes. La matrice paysagère joue un rôle déterminant dans le fonctionnement des processus écologiques. Elle peut favoriser le mouvement des individus dans le cas d'existence convenable de corridors comme elle peut le contraindre dans le cas inverse. La présence de corridors écologiques avec configuration adéquate est nécessaire pour favoriser les déplacements et, donc, l'interaction des espèces vivantes (Bourgeois, 2015 ; Wu, 2013a).

II.3. Les dynamiques paysagères : hétérogénéité et hiérarchie spatiales

Parmi les piliers fondamentaux sur lesquels se sont basées les études en écologie du paysage est la mise en avant de l'impact de l'activité humaine sur la nature. Le paysage est abordé comme une entité spatiale caractérisée par son hétérogénéité et pouvant couvrir des étendues géographiques plus larges que celles étudiées en écologie classique.

II.3.1. L'hétérogénéité des paysages

La spatialisation des thèmes relevant de l'écologie du paysage fait appel à la mise en compte de la configuration des structures paysagères. Le paysage, étant une entité spatiale diversifiée en matière d'occupation et utilisation du sol et accueillant aussi une pluralité d'espèces vivantes, est perçu comme un espace hétérogène dans sa composition et ses structures. L'hétérogénéité spatiale se manifeste à toutes les échelles, sa formation et son influence sur les processus écologiques constituent une préoccupation centrale dans l'écologie du paysage. Il est cependant important de noter que la dimension spatiale a longtemps été ignorée ou délibérément évitée en écologie, étant donné que tous les phénomènes écologiques se produisent dans des environnements spatialement hétérogènes et que la relation entre les organismes et leur environnement est le sujet même de l'écologie (Wu et al., 2000). Cette hétérogénéité est en rapport avec la variation spatiale des conditions environnementales qui peuvent être d'origine naturelle, anthropique ou l'association des deux. Il s'agit là, donc, d'une hétérogénéité d'ordre spatiale qui se rapporte à l'occupation et l'utilisation du sol d'une manière diversifiée. L'impact des interactions effectuées au sein du paysage sur la configuration de ses structures ainsi que sur sa composition occupe une place centrale en écologie du paysage : *« l'écologie du paysage a comme premier intérêt l'analyse des effets de configurations spatiales sur une grande variété de phénomènes écologiques »* (Bourgeois, 2015). L'hétérogénéité du paysage peut varier selon la thématique abordée et la vision adoptée par le chercheur. Elle varie aussi selon la diversité des éléments présents et qui sont pris en considération (Burel et Baudry, 1996).

II.3.2. Paysage et hiérarchie spatiale : la question des échelles

En écologie du paysage, le choix de l'échelle spatiale de l'étude est un préalable primordial. L'essor de la cartographie, à la suite de la vulgarisation des satellites et des photographies aériennes notamment à la fin du XXe siècle, et grâce aussi au développement de techniques et méthodes informatiques accompagnantes, a permis de meilleures appréhensions des paysages avec des visions plus synoptiques, ce qui a contribué à l'évolution de l'écologie du paysage. La question du niveau d'observation se trouve toujours posée. Le choix de l'échelle d'analyse peut être défini par l'étendue géographique de la zone d'étude et par le type d'objet ou de phénomène étudié. Le niveau de détail dépend de la taille de la zone étudiée : *« la lisibilité des phénomènes géographiques est en effet en*

rapport avec l'échelle » (Lhomme, 2005). En écologie du paysage, l'échelle se réfère souvent à l'étendue et à la finesse des grains qui représentent les unités élémentaires constituant la carte qui est généralement définie par la résolution spatiale (figure II-7). D'une règle générale, une analyse fine nécessite des données de haute résolution, mais la haute résolution peut être utilisée après agrégation pour des niveaux plus grossiers d'analyse (Wu, 2013b).

L'échelle paysagère, qui se réfère à un niveau intermédiaire d'organisation entre l'écosystème et l'œcoumène ou la région, est souvent préférée en écologie du paysage. En effet, pour une échelle pertinente, le niveau d'analyse doit permettre de caractériser les structures paysagères et les processus écologiques. L'échelle d'analyse ne peut se détacher de la dimension temporelle. Les études dans ce domaine ont mis l'accent sur l'importance des échelles spatiales et temporelles dans l'étude des processus écologiques : « *en effet, les modifications temporelles les plus courtes affectent les étendues les plus petites alors que les modifications temporelles les plus longues affectent les étendues les plus importantes* » (Bourgeois, 2015). Ce constat constitue en effet le soubassement sur lequel s'est fondée la théorie de la hiérarchie (Robert V O'Neill et al., 1986). Selon cette théorie, la configuration paysagère résulte d'une diversité de formes dont la genèse est conditionnée par des processus écologiques qui agissent à différentes échelles spatiotemporelles.

Le paysage englobe donc un système hiérarchisé avec plusieurs niveaux d'organisation. Les formes s'inscrivent dans cette hiérarchie selon leurs échelles fonctionnelles (Urban et al., 1987). Sur ce sujet, M. Bourgeois (2015) précise l'exemple suivant : « *un paysage forestier peut hiérarchiquement structurer en bassin versant, composés eux-mêmes d'écosystèmes locaux, composés eux-mêmes d'arbres individuel ou de troués d'arbres. Chaque élément, de l'arbre au paysage forestier, fonctionne comme une unité avec ses propres contraintes et son propre degré de pérennité. Toutes ces unités sont en interdépendance à travers les échelles spatiotemporelles* » (Bourgeois, 2015).

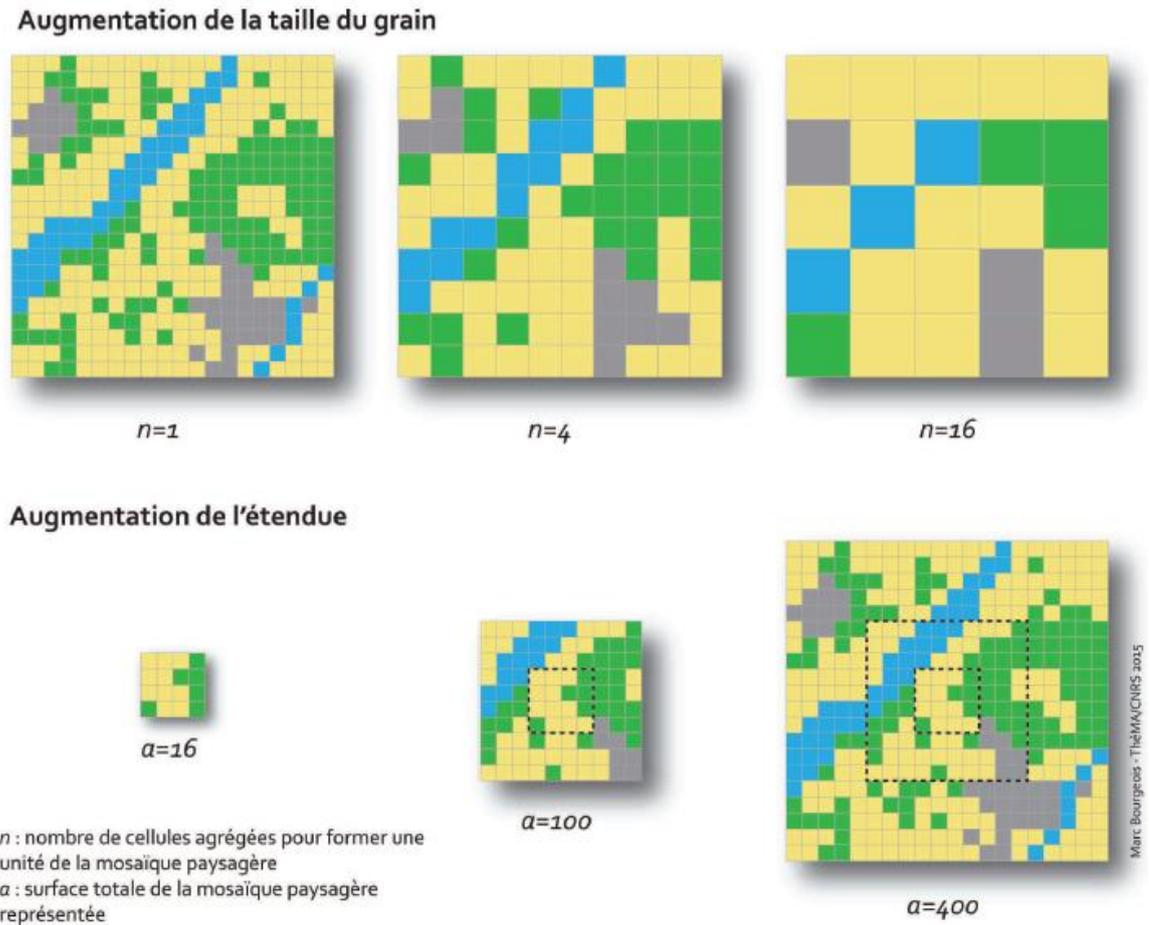


Figure II-7 : Influence de la taille du grain et de l'étendue dans la définition cartographique de la mosaïque paysagère

Source : (Bourgeois, 2015)

II.4. Impact de l'activité anthropique sur les structures paysagères : les dynamiques d'occupation et utilisation des sols

Les paysages sont perpétuellement soumis aux actions d'origines naturelles et humaines. La mise en avant des effets humains sur le paysage est l'un des intérêts principaux distinguant l'écologie du paysage de l'écologie dite traditionnelle. La mosaïque paysagère peut subir des transformations en conséquence de perturbations naturelles ou anthropiques. L'action anthropique peut agir de différentes manières : conversion des surfaces naturelles en surfaces agricoles, modification des espaces naturels par des activités forestières (implantation forestière, déforestation), altération de l'hydrologie d'une région par l'implantation de nouvelles structures hydrauliques telles que les barrages, les réseaux de canalisation ou de drainage, assèchement des plans d'eaux, envahissement des espaces naturels par l'urbanisation et les réseaux de transport.

Ces actions constituent des facteurs affectant les structures paysagères. La fragmentation paysagère est l'un des principaux mécanismes traduisant ces néfastes actions.

II.4.1. L'occupation du sol

L'occupation du sol correspond à la couverture biophysique observée sur une portion de la surface terrestre. Il s'agit d'une description physique de l'espace. Plusieurs catégories d'occupation du sol peuvent être distinguées, parmi celles-ci on peut trouver : les surfaces de végétations (telles que les surfaces boisées, les champs, la pelouse, les buissons, etc.), les sols nus, les sols durs (comme les roches par exemple), les surfaces humides et les plans d'eau, et les sols artificialisés comme les zones bâties et aménagées. La caractérisation biophysique de la couverture du sol contribue à la formalisation informationnelle et cartographique de l'espace et influence directement le système de collecte de données ainsi que leurs classifications. L'occupation du sol peut être observable, c'est-à-dire captée à distance en mobilisant différentes sources : l'œil humain, la photographie aérienne et l'imagerie satellite.

II.4.2. L'utilisation du sol

L'utilisation du sol renvoie aux représentations humaines des modes de couvertures terrestres. Plusieurs acceptations se présentent, mais elles se rapportent globalement à la dimension fonctionnelle dont les zones sont caractérisées selon leurs vocations socioéconomiques : zone résidentielle, commerciale ou industrielle, agricole ou forestière, zone protégée ou de loisir, etc. Des interrelations peuvent être établies entre utilisation et occupation du sol, mais cette correspondance n'est pas toujours évidente. À l'opposé de l'occupation du sol, l'observation des utilisations du sol est plus difficile et nécessite souvent un accomplissement de l'information. Dans une approche fonctionnelle, il est possible d'établir le lien entre occupation et utilisation des sols. Dans ce cas, l'occupation peut être déterminante (CE, 2001).

II.4.3. Suivi des changements spatiotemporels : évolution des classes UOS⁷

L'activité anthropique et naturelle engendre des changements de configuration de l'espace. Ces changements sont de natures différentes et s'opèrent dans l'espace et dans temps et à des échelles différentes. La mise en évidence de l'évolution des classes d'utilisation et d'occupation du sol permet *« d'établir un premier lien quantitatif entre les activités humaines, leurs répercussions sur l'environnement, et la dimension géographique (spatiale) »* (CE, 2001). La dimension temporelle est à considérer dans la collecte de l'information concernant l'évolution des classes d'utilisation et d'occupation du sol. Cette information constitue un support essentiel pouvant, d'une part, aider les

⁷ Utilisation et Occupation du Sol

décideurs locaux à appréhender les différentes situations environnementales de leurs territoires et élaborer les meilleures décisions en correspondance avec ces évolutions spatiotemporelles ; d'autre part, aider les scientifiques à révéler les forces motrices qui poussent ces dynamiques et d'estimer leurs conséquences.

D'une règle générale, deux dynamiques d'interaction de classes sont à mentionner : la conversion et la modification des classes. La conversion correspond aux changements de vocation ou de nature de classes ; il s'agit d'un passage d'une classe d'UOS à une autre. La modification indique l'évolution au sein de la classe elle-même, en conséquence des changements affectant ses attributs fonctionnels et/ou physiques. Il importe de noter que les attributs relatifs à l'occupation et à l'utilisation des sols, notamment ceux des classes, trouvent leurs utilités à travers l'identification, la description et l'analyse du processus en cours. Le suivi de l'évolution spatiotemporelle peut conduire à révéler la nature des processus en cours, dont des indicateurs peuvent être définis pour permettre la description des tendances caractérisant le phénomène étudié. Parmi ces tendances en peut trouver (CE, 2001) :

II.4.3.1. L'intensification ou la densification

Un flux définissant, pour un paysage déterminé et entre deux temps différents, une augmentation d'intensité d'occupation du sol pour une classe donnée.

II.4.3.2. L'extensification

Un processus inverse du précédent, c'est un flux désignant la diminution de l'intensité d'occupation du sol pour une classe donnée.

II.4.3.3. Le développement

Un flux reflétant l'anthropisation d'un espace ouvert en le transformant en un territoire souvent à vocation urbaine ou industrielle.

La description des dynamiques d'évolution des classes d'occupation et d'utilisation du sol peut être ainsi affinée en fonction de leurs interactions (conversion ou modification), l'ampleur du changement et le rythme d'évolution. Les approches adoptées sont variées et plus complexes. Elles peuvent inclure également les aspects fonctionnels tels que l'analyse des forces motrices qui sont généralement d'ordre économique, politique, social et environnemental, ainsi que les acteurs influençant ces dynamiques sociospatiales. Il convient de souligner que la qualification des processus en cours ainsi que l'évolution de l'occupation et l'utilisation du sol accompagnante dépend directement des propriétés thématiques et sociospatiales que véhicule l'information mobilisée. À ce titre, les données sur l'occupation et l'utilisation du sol se trouvent considérablement utiles en raison

des informations quantitatives qu'elles véhiculent, ce qui peut aider à l'évaluation et la caractérisation des phénomènes et processus mis en examen : « *La cartographie de l'occupation des sols est pour les gestionnaires territoriaux, un outil nécessaire leur permettant d'appréhender, d'analyser et de suivre les tendances de la couverture des sols pour mieux aménager les territoires. De plus, la disponibilité des données satellitaires qui ont l'avantage de couvrir les territoires à toutes les échelles, offrent la possibilité de réaliser cette cartographie. Cependant les méthodes de traitement sont nombreuses et inhérentes aux caractéristiques de l'image* » (Aguejdad, 2009).

II.5. Étalement des surfaces bâties et changement des structures paysagères : apport de la télédétection urbaine

L'étalement urbain, étant un processus d'artificialisation des territoires agricoles et naturels, engendre en continu des mutations profondes de l'espace en lui apportant des changements irréversibles. Le paysage est de ce fait soumis aux perpétuelles sollicitations de modification de sa structure et sa composition. L'avancée de la frange urbaine accompagnée par l'extension des zones résidentielles, d'activités et des réseaux de transport se traduit spatialement par des changements d'occupation et d'utilisation des sols. Ces changements sont jugés responsables de la fragmentation du paysage en induisant à cet effet des dysfonctionnements et des perturbations des écosystèmes avoisinants : « *Cet étalement urbain induit des changements dans l'occupation des sols, notamment une artificialisation des sols qui se fait aux dépens des territoires agricoles et naturels. Ce phénomène contribue également à la fragmentation du paysage* » (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016).

II.5.1. L'artificialisation des sols et ses conséquences sur les paysages :

L'artificialisation est un processus par lequel un sol, d'un milieu ou d'un habitat naturelle ou semi-naturel, perd ses qualités qui sont celles de la naturalité. Celle-ci se rapporte à la capacité entretenue pour héberger certaine biodiversité et de contenir des cycles naturels (cycle l'eau, cycle de l'oxygène, cycle du carbone, cycle d'azote, etc.) et biogéochimiques tels que les puits de carbones (Lecomte, 1999). L'affection de la résilience écologique du milieu artificialisé, souvent traduite par une perte progressive de sa capacité d'autocicatrisation, est une résultante évidente de ce processus.

Sur ce sujet, il importe de préciser que le concept « territoire artificialisé » renvoi généralement aux espaces empiétés par le bâti résidentiel, d'activité et les espaces aménagés (routes, parkings, terrains de jeux, etc.) ainsi que les autres infrastructures installées ou en cours d'installation telles que les décharges publiques, les carrières, les chantiers, les aires d'attraction et de loisir, etc. (IFEN, 2006). L'urbanisation au sens plus large cause l'artificialisation des sols, l'imperméabilisation de ceux-ci amène forcément à leurs détériorations. Elle se propage particulièrement au détriment des surfaces agricoles et forestières à travers deux modes d'action : conversion en matière d'utilisation et

occupation des sols et déformation spatiale des aires non touchées par la conversion. Dans l'analyse du changement d'occupation et d'utilisation des sols, les surfaces terrestres sont représentées par des groupes d'unités spatiales. Chacun de ces groupes d'unités se rapporte à une classe d'occupation du sol avec une représentation discrète, ou à un ensemble d'attributs biophysiques avec une représentation continue (Geist, 2006). D'un point de vue pertinence et concision, la première représentation est davantage par le fait qu'elle permet de mettre en valeur l'information descriptive du passage d'une classe d'UOS à une autre. Toutefois, les résultats peuvent contenir des surestimations de conversions d'occupation du sol sans considérer aussi les modifications s'effectuant au sein de la même classe (Geist, 2006 ; Hubert-Moy, 2004).

Quant à l'étalement urbain, le mitage par conversion de surfaces à vocation agricole et naturelle est irréversible, à la différence des modifications affectant l'occupation du sol sous l'effet de l'avancée urbaine qui peuvent être réversibles quand il s'agit de terrains agricoles et naturels (Aguéjdad, 2009). L'analyse et la cartographie de l'étalement des villes se basent pratiquement sur les informations relatives aux changements d'occupation et utilisation des sols, notamment les surfaces converties. Cette démarche est plus privilégiée en raison, d'une part, des possibilités techniques qu'elle présente en matière d'accès et formalisation de l'information sur l'état d'occupation et d'utilisation du sol, d'autre part, le manque de l'information sociospatiale décrivant l'étalement urbain : « *Les études portant sur l'identification, la mesure et le suivi de l'étalement urbain traitent presque exclusivement des conversions d'occupation des sols, à travers l'analyse des transitions des espaces naturels et agricoles vers les espaces artificialisés.* » (Aguéjdad, 2009). Évidemment, les surfaces agricoles et naturelles sont les plus touchées par l'avancée de l'urbanisation. Ce constat est confirmé, d'une manière consensuelle, dans la littérature scientifique et professionnelle traitant ce sujet (Acevedo et al., 2006 ; Weng, 2012). À titre d'exemple, l'Agence Européenne de l'Environnement a estimé un bilan de 800 000 hectares de terres agricoles et forestières qui ont été artificialisées par l'urbanisation entre 1990 et 2000, la majorité de ces surfaces affectées sont des terres arables ou cultivées avec un pourcentage de 48 %, puis les pâturages et les cultures mixtes présentent, en second rang, 36 % (EEA, 2005).

II.5.2. Impact écologique du changement d'UOS : fragmentation et discontinuité spatiales

D'un point de vue général, la fragmentation désigne une discontinuité, pour un système ou processus spatial donné, induisant une rupture ou un manque de connectivité conduisant à entraver des processus écologiques. Il s'agit d'un « mécanisme » de morcellement d'entité écologique, qui se répercute négativement sur les habitats en empêchant leurs connectivités et donc leurs interactions.

La continuité écologique est souvent assurée par les corridors verts (Aguejdad, 2009 ; Lord et Norton, 1990 ; Wu, 2013b).

La fragmentation paysagère s'opère généralement en accompagnement de deux processus : morcellement des unités écologiques et diminution de leurs superficies. Les taches abritant la biodiversité se trouvent décomposées en plusieurs fragments. Le nombre de fragments issus de la fragmentation ainsi que leurs tailles indiquent le niveau de fragmentation qu'a subi le paysage. Plus les fragments sont petits et désagrégés, plus la fragmentation est considérée plus importante. La fragmentation conduit souvent à la diminution des taches et même à la disparition progressive de l'habitat naturel.

D'une façon consensuelle, l'activité anthropique est certainement jugée principale force génératrice de fragmentation et altération des paysages naturels. Parmi les principaux facteurs causant la fragmentation on trouve l'agriculture intensive, le développement des réseaux et des infrastructures de transports et, enfin, l'urbanisation qui généralement englobe l'avancée du bâti résidentiel et industriel, l'extension des zones d'activité et les autres projets d'aménagement du territoire (Aguejdad, 2009). Les effets néfastes de ces activités sur les écosystèmes sont largement abordés dans la littérature scientifique et professionnelle (Abu Ghurah et al., 2018 ; Aguejdad et Hubert-Moy, 2016 ; Ganasri et al., 2013 ; Mas, 2000).

La fragmentation est l'un des cinq principaux processus pouvant amener à l'affection des processus écologiques et la destruction de la biodiversité (figure II-8). Les taches de l'habitat naturel tendent sous l'effet de ces processus à la décroissance puis à la disparition. L'apparition de nouveaux petits fragments « étrangers » et incompatibles avec les unités écologiques subsistantes est une première étape de ces processus de conversion. En seconde étape, ces nouveaux petits fragments s'étendent à l'intérieur des unités écologiques, originellement compactes, provoquant leurs perforations. Puis, une étape de « dissection » produite par les nouvelles tâches qui, en revanche, ne cessent pas de s'accroître pour se fusionner en fin de compte.

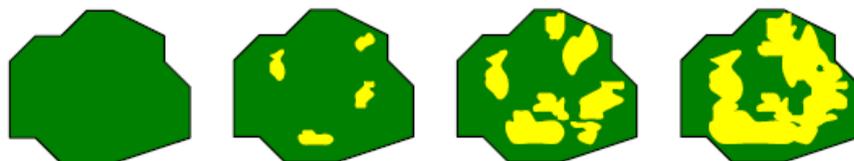


Figure II-8 : Processus de perforation des taches naturelles

Source : (Aguejdad, 2009)

À ce niveau d'évolution, la fragmentation devient une réalité, les taches formant la biodiversité se trouvent éloignées, donc moins connectées, avec des tailles plus petites. En conséquence, la

configuration spatiale se trouve modifiée et le paysage devient dominé par l'habitat modifié (Aguajdad, 2009).

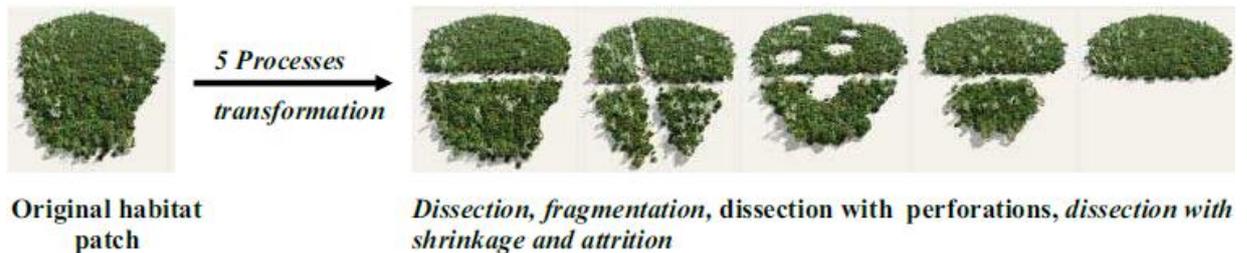


Figure II-9 : Les cinq processus de destruction d'un habitat naturel

Source : (Aguajdad, 2009, d'après ECFRPC, 2001 ; R. Forman & R T T. Forman, 1995 ; Soulé, 1991)

La création de barrières sans empiétement total de l'habitat naturel peut conduire aussi à une sorte de fragmentation. L'impact de ces barrières dépend de leurs étendues et de leurs ampleurs. Le paysage résultant de la fragmentation est une matrice complexe, composée de taches isolées et de fragments en corridors (R.F Noss et Csuti, 1997 ; Pereboom, 2006).

Plusieurs facteurs déterminent le degré de la fragmentation à savoir : le nombre de taches « patch » ainsi que leurs tailles ; le niveau d'hétérogénéité du paysage définie par la diversité des classes d'occupation et utilisation des sols et leurs relations spatiales ; la résolution spatiale des données d'appui adoptées pour l'évaluation (Rutledge, 2003). La fragmentation est considérée de niveau élevé pour un paysage présentant un nombre important de petits fragments avec des tailles se rapprochant à l'équivalence et une grande diversité d'occupation du sol. La dominance d'un fragment n'aura pas lieu dans ce cas-là (Aguajdad, 2009). Le paysage est moins fragmenté quand il s'agit de la présence d'une tache dominante alors qu'avec le même nombre de fragments et la même diversité de classes d'occupation du sol, ce paysage est plus fragmenté par rapport à la première situation. Ainsi, le niveau de fragmentation d'un paysage est directement lié à la diversité de classes d'occupation du sol, l'accroissement de celles-ci conduit à l'augmentation de la fragmentation, tandis que cette fragmentation tend vers la diminution avec la réduction du nombre de classes d'occupation du sol qui signifie la disparition des classes d'ordre minuscules (Monica G Turner, 1990).

La mesure et la qualification de la fragmentation dépendent directement de la qualité des données mobilisées, notamment la résolution spatiale. Celle-ci correspond à la taille du plus petit objet qui peut être identifié et, donc, détecté. Les résolutions les plus fines permettent l'identification des plus petits fragments spatiaux existants dans le paysage étudié, ce qui facilite la lecture et l'évaluation du paysage. La résolution spatiale influence aussi les mesures surfaciques et linéaires des paysages telles

que les surfaces des taches et des bordures entre fragments (lisières). Ce qui met les indices de mesures relatifs à ces aspects, particulièrement les indices morphologiques, en étroite liaison avec l'échelle et la résolution de données utilisées (Benson et MacKenzie, 1995 ; Turner et al., 1989). Il convient de mentionner que la résolution spatiale des données sélectionnées est généralement définie en fonction de l'échelle d'étude qui elle aussi dépend de l'étendue de l'aire d'étude. Le niveau et l'échelle de l'analyse présentent ainsi des éléments non négligeables pour un choix adéquat de la résolution spatiale de données à adopter comme un support d'entrée pour la mesure et la caractérisation de la fragmentation des paysages.

II.5.3. Les conséquences sur la biodiversité

Les effets néfastes du morcellement des entités écologiques sur la biodiversité sont largement constatés dans la littérature portant sur ce sujet. Ceci est considéré comme l'un des principaux facteurs causant le recul et la disparition de l'habitat naturel incluant les populations et leurs biotopes. Il cause également la dégradation des écosystèmes et l'altération des paysages conduisant de ce fait à la perte de leurs qualités et spécificités (Jaeger et al., 2007). Le rapport de l'Agence Européenne pour l'Environnement, intitulé « *l'étalement urbain en Europe : un défi environnemental ignoré* » (Halleux, 2007), évoque la nécessité de mettre en avant l'enrayement de l'étalement urbain et lutte contre destruction et le morcellement effréné des espaces naturels.

La fragmentation spatiale à travers les processus de morcellement et réduction surfacique des fragments accueillants l'habitat naturel amène à l'appauvrissement des écosystèmes affectés, d'un côté, par l'abattement des capacités alimentaires nécessaires pour la biocénose subsistante et, d'autre côté, l'isolement de celle-ci menant à sa diminution voire à sa disparition : « *le processus de fragmentation se traduit par une dégradation progressive des unités écologiques « naturelles » et leur découpage en unités de petite taille. Elle sépare les unités fonctionnelles de l'habitat d'une espèce et isole les populations. Les axes routiers et les tronçons ferroviaires représentent de véritables obstacles souvent infranchissables.* » (Aguejdad, 2009).

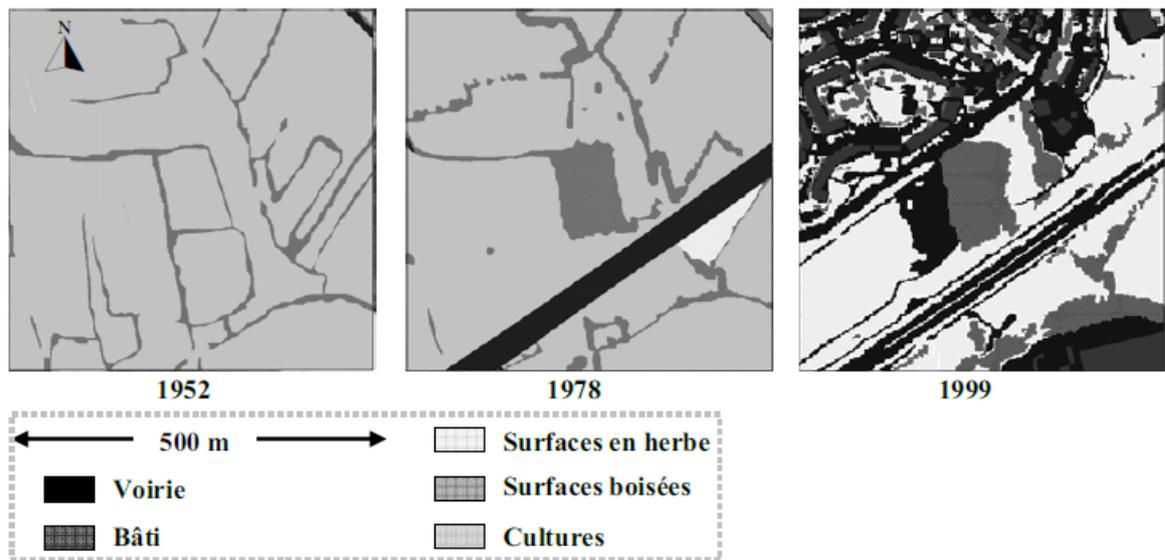


Figure II-10 : L'effet barrière que peut constituer un réseau de transport en plus de l'apparition de taches artificialisées au sein de l'habitat naturel : deux processus pouvant causer l'isolement et la disparition de l'habitat naturel (l'exemple du quartier La Poterie en périphérie de Rennes).

Source : d'après (Aguiejdad, 2009)

II.5.4. Effets de la propagation du bâti sur les structures paysagères

Nous avons vu que l'activité anthropique influence directement la configuration du paysage, sa structure et son fonctionnement écosystémique. L'artificialisation des territoires est ainsi un facteur de modification pouvant altérer les structures paysagères. La fragmentation peut donc correspondre à un morcellement d'un habitat, d'un écosystème ou d'une occupation du sol en plusieurs taches plus petites. D'une règle générale, plusieurs sortes de modifications peuvent indiquer qu'un processus de fragmentation est en cours. À titre d'exemple, l'implantation d'une nouvelle installation de transport ou d'une nouvelle zone bâtie peut introduire des perforations, des coupures, un morcellement, un rognage ou une ablation (figure II-11).

D'un point de vue global, la littérature portant sur ce sujet met en évidence deux processus principaux : la fragmentation paysagère et la disparition de l'habitat. En se référant aux formes de modification illustrées dans la (figure II-11) la fragmentation se rapporte aux processus de perforation, de rognage, de morcellement et de coupure, tandis que la disparition de l'habitat se rapporte au processus d'ablation.

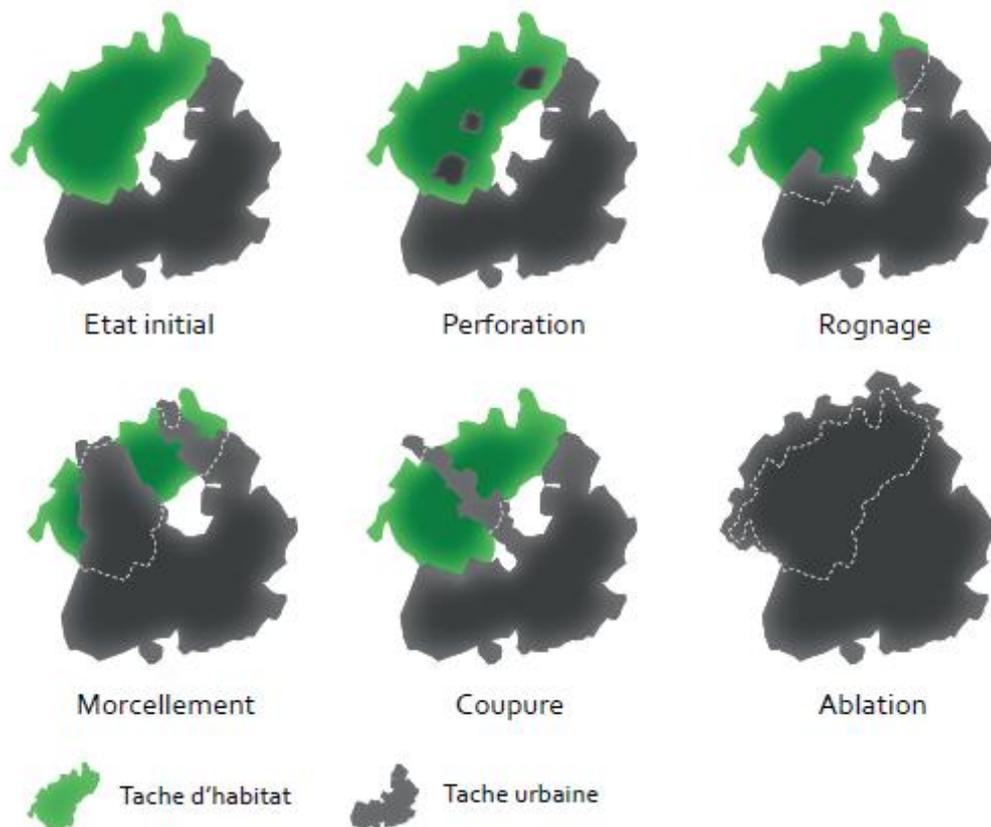


Figure II-11 : Différentes formes d'altération de l'habitat naturel par l'étalement du tissu urbain

Source : d'après (R. T. Forman et Forman, 1995)

L'apparition de nouvelles surfaces anthropisées telles que les nouvelles zones urbanisées peut introduire des effets divers. Cette urbanisation peut, d'un côté, conduire à la réduction de la richesse biologique de certains écosystèmes naturels existants. Dans un autre côté, la substitution d'un nouvel écosystème urbain peut contribuer à l'augmentation de la biodiversité de certains écosystèmes dont la pauvreté en matière de biodiversité est une propriété par essence (Bourgeois, 2015 ; Pickett et Cadenasso, 2008). Dans les milieux urbains et périurbains, l'étude des interactions entre l'homme et son milieu naturel fait partie des préoccupations d'une discipline issue de l'écologie du paysage, il s'agit de l'écologie urbaine.

II.6. L'écologie urbaine : une vision écosystémique de la ville

L'écologie urbaine porte sur les conditions d'équilibre et d'épanouissement de l'écosystème urbain en appliquant les méthodes et modèles d'analyse issus de l'écologie des milieux naturels. Les premières études donnant naissance à l'écologie urbaine sont celles entamées par l'école de Chicago à partir des années 20. Les pionniers de cette école ont adopté l'approche écologique pour décrire les structures et le fonctionnement de la ville (Grafmeyer et Joseph, 1984). L'appellation *Urban ecology*

a été introduite dans leurs propos pour décrire la nouvelle discipline (Park et al., 1925)⁸. Par la suite, l'écologie urbaine s'est évoluée pour intégrer un champ large d'applications mettant en avant non seulement la protection et la promotion de la biodiversité urbaine, mais aussi toutes les interactions effectuées entre la communauté humaine et son environnement. La succession de publications et de programmes de recherches en écologie urbaine, à partir des années 70, a conduit à l'intégration d'une variété d'approches provenant de divers domaines, notamment le programme *Man and Biosphère* lancé par l'UNESCO correspondant à la création des réserves naturelles qui a préconisé l'intégration de différentes disciplines comme les sciences naturelles, l'ingénierie et les sciences sociales (Deelstra, 1998).

Depuis lors, plusieurs définitions ont mentionné le caractère interdisciplinaire distinguant l'écologie urbaine. Alberti (2008) considère que l'écologie urbaine est le domaine associant les disciplines qui ont comme préoccupation la compréhension des structures et du fonctionnement définissant les écosystèmes urbains. McDonnell (2011), quant à lui, considère que l'écologie urbaine intègre à la fois des sciences fondamentales et d'application relevant des sciences humaines et naturelles pour explorer et élucider les différents aspects des écosystèmes urbains. L'objectif général de l'écologie urbaine moderne est, d'après Wu, (2008) la compréhension des interactions entre formes d'urbanisation et processus écologiques. Cette discipline offre donc un cadre conceptuel permettant l'appréhension des conditions d'épanouissement favorisant la coexistence entre les humains et les différentes espèces vivantes constituant la biodiversité urbaine. Il s'agit là donc d'une vision de soutenabilité urbaine qui est omniprésente dans les recherches portant sur les milieux urbains et périurbains. À ce propos, les études en écologie urbaine s'inscrivent dans deux perspectives majeures (figure II-12) : l'écologie dans la ville et l'écologie des villes (Wu, 2008).

⁸ Cité in (Bourgeois, 2015)

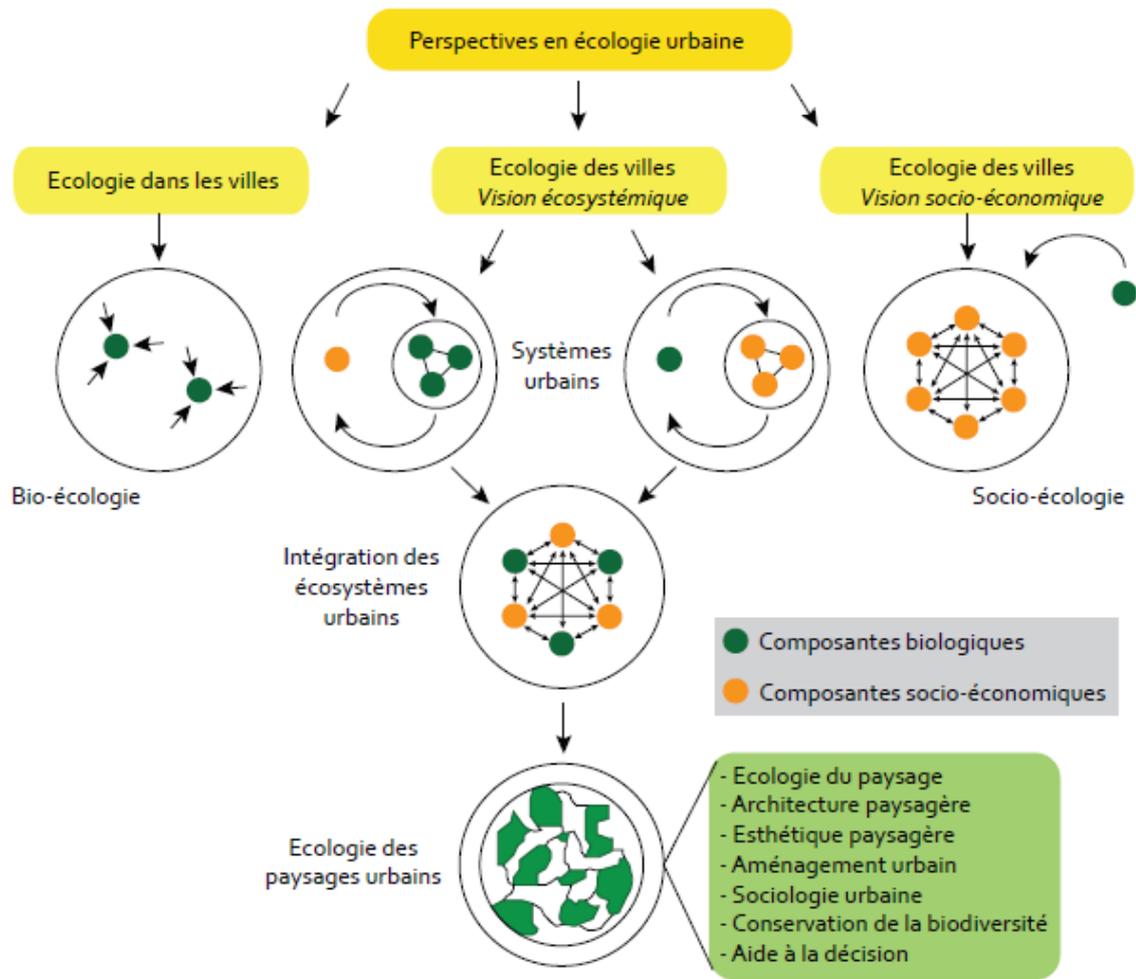


Figure II-12 : Des perspectives multiples en l'écologie urbaine

Source : (Bourgeois, 2015, d'après Wu ,2008)

La vision bioécologique caractérise davantage l'écologie dans les villes. Les aspects socioéconomiques ne présentent pas d'importante considération. Elle donne plus d'intérêt au maintien et à la protection des réseaux écologiques dans les villes en se focalisant par exemple sur l'établissement des inventaires de biodiversité urbaine et l'intégration des concepts écologique dans la planification et l'aménagement urbains. L'écologie des villes peut être abordée suivant deux approches : une approche écosystémique et une approche socioéconomique. La première approche considère la ville comme un écosystème à part entière. Les populations humaines et animales forment ensemble la biocénose urbaine. Les espaces urbains et naturels forment le biotope urbain. Les interactions entre biocénoses et biotopes forment les écosystèmes urbains (Savard et al., 2000). La seconde approche met en avant les rapports établis entre la population humaine et son environnement au sein de la ville. L'application des méthodes issues de l'écologie du paysage pour la compréhension des écosystèmes urbains a donné essor du champ de l'écologie du paysage urbain. La ville, en

écologie du paysage urbain, est vue comme un paysage hétérogène constitué de taches naturelles et artificielles en perpétuelles dynamiques d'interaction. Dans un autre niveau de perception, la ville peut faire partie d'un paysage plus large pouvant inclure plusieurs écosystèmes (Wu, 2013a). L'écologie du paysage urbain offre donc un cadre scientifique assez intéressant pour l'étude des interactions entre l'activité humaine et l'environnement à l'intérieur et aux alentours des zones urbaines et périurbaines dans des perspectives de durabilité des territoires humanisés (Andersson, 2006 ; Breuste et Qureshi, 2011).

II.6.1. Le paysage urbain comme dimension matérialisée caractérisant les territoires urbains et périurbains : les apports de l'écologie du paysage urbain

Dans une vision écosystémique, la ville est considérée comme un écosystème urbain constitué en sous-systèmes qui sont les quartiers et les différentes parties de la ville. Cet écosystème artificiel est structuré et hiérarchisé selon une logique morphologique et fonctionnelle conditionnée par les configurations du réseau urbain, du site d'implantation, des choix politiques de développement socioéconomiques et aussi par des attributs « supra-urbaines » octroyées à la ville selon son statut dans le système urbain à laquelle elle appartient. En écologie urbaine, la ville est ainsi vue comme un organisme vivant en perpétuelle évolution, mais aussi en perpétuelle interaction avec son environnement. La croissance spatiale de cette entité urbaine avec les dynamiques socioéconomiques dont elles l'accompagnent se trouve traduite par un empiétement des espaces vitaux pour l'agriculture et la biodiversité urbaine et périurbaine. L'approche écologique cherche donc à envisager un développement urbain mieux équilibré avec moins d'impact sur l'environnement (Clergeau, 2007).

À ce titre, l'écologie du paysage urbain, qui découle de l'écologie urbaine toute en faisant référence aux méthodes issues de l'écologie du paysage, offre un cadre conceptuel permettant la compréhension et l'évaluation des impacts engendrés par l'étalement urbain sur l'environnement, basé sur l'étude du paysage étant une entité spatiale réunissant plusieurs écosystèmes organisés en harmonie. Le paysage est abordé comme un niveau d'analyse supérieur à celui de l'écosystème et inférieur à celui du biome. Ce niveau d'analyse est de favorable coïncidence avec l'analyse urbaine, notamment l'évolution de la macroforme. À cet égard, la ville se présente comme un paysage spatialement hétérogène et complexe (Skupinski et al., 2009). Les modifications générées par l'étalement de la tache urbaine peuvent être appréhendées à travers le suivi et la mesure des changements affectant le paysage dont les fragments du bâti en font partie composante. Ces modifications peuvent toucher la structure, la composition et la configuration spatiale du paysage

concerné (Herold et al., 2005). L'approche écologique du paysage se focalise généralement sur ces trois aspects (Pickett et Cadenasso, 2008 ; Wu, 2013a).

Conclusion

L'écologie du paysage urbain offre un cadre conceptuel et méthodologique assez utile pour la compréhension et l'évaluation de l'évolution spatiale des surfaces urbaines ainsi que les transformations paysagères accompagnantes. Les interactions spatiotemporelles produites en conséquence de cet étalement spatial peuvent être abordées en mettant en avant les processus de changement spatiotemporel de la configuration des paysages urbains et périurbains. Deux actions peuvent être visualisées en analysant ces transformations spatiales : la modification et la conversion des classes d'occupation et d'utilisation du sol (UOS). L'activité anthropique influence directement la configuration du paysage, sa structure et son fonctionnement écosystémique. L'artificialisation des territoires est ainsi un facteur de modification pouvant altérer les structures paysagères.

La fragmentation des paysages est une conséquence directe de la croissance des surfaces bâties. Elle peut correspondre à un morcellement d'un habitat, d'un écosystème ou d'une occupation du sol en plusieurs taches plus petites. Les modifications générées par l'étalement de la tache urbaine sont irréversibles. Ces modifications peuvent être appréhendées à travers le suivi et la mesure des changements affectant le paysage dont les fragments du bâti en font partie composante. Ces modifications peuvent toucher la structure, la composition et la configuration spatiale du paysage concerné. L'analyse et la cartographie de l'étalement des villes se basent pratiquement sur les informations relatives aux changements d'occupation et utilisation des sols, notamment les surfaces converties. La mesure et la qualification de la fragmentation dépendent directement de l'échelle d'étude ainsi que la qualité des données mobilisées.

Chapitre III. La télédétection urbaine comme outil de suivi et d'évaluation des dynamiques spatiales dans les villes

Introduction

Les villes actuelles sont en perpétuelles dynamiques de croissance spatiale, par étalement sur leurs périphéries et par densification et renouvellement à l'intérieur des périmètres urbains. La cartographie de ces dynamiques d'une manière actualisée moyennant les méthodes classiques d'enquête et de relevé de terrain est avérée impraticable en raison des coûts élevés en matière de moyens humains et financiers ainsi que les temps consommés. La télédétection urbaine s'impose comme outil nécessaire permettant le suivi et l'actualisation de l'information sociospatiale. Cet outil permet la quantification et la confrontation des formes générées aux indicateurs d'évaluation dont les responsables locaux ont besoin pour de meilleures compréhensions et prise de décisions.

Les milieux urbains n'ont bénéficié de la télédétection spatiale qu'après l'évolution des résolutions spatiales des images satellites et le développement informatique accompagnant, notamment les SIG. Les applications de la télédétection urbaine et des SIG en milieux urbains et périurbains se sont multipliées au fur et à mesure pour toucher pratiquement toutes les thématiques se rapportant à l'espace urbain. En effet, cet outil est devenu incontournable pour le suivi, l'analyse et l'évaluation des évolutions spatiales dans une vision écosystémique plus large incluant les différents aspects de développement soutenable.

Ce chapitre portera sur la télédétection spatiale comme un outil d'aide à la compréhension et à l'analyse des dynamiques urbaines, notamment la croissance spatiale. On essayera de prime abord d'exposer quelques éléments de définition et quelques repères historiques relatifs à l'application de ces outils en milieux urbains et périurbains, puis des aspects méthodologiques relatifs à l'extraction et l'interprétation de l'information spatiale seront abordés. En fin de compte, l'utilité de la télédétection urbaine dans les différents domaines portant sur la ville sera mise en évidence en essayant de présenter les différentes applications cartographiques et analytiques liées à la planification et la gestion urbaines.

III.1. Le besoin en information spatiale actualisée pour suivre les dynamiques urbaines dans les pays en voie de développement

III.1.1. Acteurs locaux et système d'information urbain : vers une vision globale de gestion de la ville

À l'opposé des villes des pays développés, l'urbanisation dans les pays en voie de développement se diffère tant dans son contexte historique que dans ses modes et ses effets : « *Le processus d'urbanisation en cours dans le tiers monde est spécifique, et sans équivalence historique possible : concentration accrue dans des mégapoles et déséquilibre des hiérarchies urbaines caractérisent l'urbanisation actuelle dans les pays en développement* » (Dureau et Weber, 1995). En plus des rythmes effrénés et inédits de la croissance urbaine que connaissaient les pays du tiers monde, les formes de cette croissance sont ainsi très différentes. Les populations urbanisées se concentrent de plus en plus dans les grandes villes, notamment les mégapoles, tandis que les villes occidentales sont actuellement en phase de redéploiement, un processus opposé de déconcentration des populations urbaines au profit des territoires périphériques.

En accompagnement de cette croissance rapide des agglomérations urbaines des PVD⁹, très variées en matière de formes, de tailles, de rythmes de croissance ainsi qu'une grande disparité en matière de mécanismes et moyens technico-financiers de gestion et d'aménagement, la tendance à la fragmentation des tissus urbains est de commun. À l'intérieur de la même ville « tiers-mondiste » s'opposent d'une manière nette deux entités urbaines : la ville volontariste, planifiée et dotée en infrastructure, et la ville spontanée, composées de quartiers irréguliers moins ou même dépourvues d'équipements. À ce propos, A. Duhau (1991)¹⁰ confirme qu'« *une citoyenneté à deux vitesses est de règle dans les villes de ces pays, entre les 'citoyens propriétaires' habitant la ville légale, reconnue à travers divers systèmes de représentation démocratiques et les classes populaires ne pouvant exhiber de titres de propriété, 'demi-citoyens' dont la légitimation est laissée à l'arbitraire de la bureaucratie* ».

III.1.2. Une nouvelle approche basée sur la télédétection spatiale et les SIG

Dans cette situation de « crise de villes » selon Dureau et Weber (1995), le défi à faire face autant pour les acteurs locaux que nationaux est d'envergure. Comment appréhender la réalité urbaine générée par les dynamiques sociospatiales dans sa globalité sans exclure une composante aussi importante, de par son illicéité et même statuée insoluble, notamment avec des mécanismes bureaucratiques inadaptés et une insuffisance de moyens technico-financiers de gestion et

⁹ Pays en Voie de Développement

¹⁰ Cité in (Dureau et Weber, 1995)

d'aménagement ? « Rien ou presque », telle est la réponse de Tribillon (2002) qui insiste sur le caractère novateur comme condition préalable pour un renouveau d'urbanisme, qui repose prioritairement sur des approches de « revivification » des villes du tiers monde. À ce propos, Dureau et Weber (1995) ont souligné que : *« C'est bien vers cette voie que s'en gagent à l'heure actuelle nombre d'experts, confrontés à un décalage croissant entre les objectifs affichés par les politiques et l'évolution effective des villes, produite par des dynamiques spontanées des populations citadines, qui soulignent la crise de la planification urbaine. »*.

III.1.3. Vers une actualisation permanente de l'information urbaine

Dans ce contexte d'urbanisation rapide, l'information constitue un besoin primordial pour une meilleure prise de décision en matière de planification et gestion de l'espace urbain. L'appréhension des dynamiques de croissance spatiales des villes des pays en voie développement ne peut se baser que sur l'actualisation effective et permanente des données sociospatiales. La pertinence de la décision dépend directement de la pertinence du système de lecture de la ville et de ses dynamiques sociospatiales. En effet, une politique urbaine stratégique ne peut être envisagée qu'à travers un diagnostic approfondi de la réalité sociospatiale sur le plan démographique, social, économique et spatial. En effet, l'inadéquation en matière d'urbanisme constatée jusqu'à nos jours a amené à une remise en causes de pratiques actuelles et des modes de diagnostic ainsi que les concepts mis en œuvre : *« Dans de nombreux domaines, la recherche urbaine sur les pays en développement a démontré l'inadéquation aux villes du tiers monde de certains concepts issus de l'expérience occidentale de l'urbanisation. »* (Dureau et Weber, 1995).

L'avancée technique et méthodologique, enregistrée récemment dans les domaines de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique, a suscité de nouvelles attentes pour renouveler les approches de lecture de la ville. Les technologies innovantes en termes de collecte, de traitement et d'analyse de l'information urbaine ont permis de surmonter les difficultés et les contraintes souvent confrontées dans les pays en voie de développement. Ceci s'exprime par la demande croissante de ces outils dans ces pays, suite à une période de maîtrise et de maturation atteinte grâce aux différents programmes de coopération internationale.

Envisager une vision de soutenabilité urbaine de la ville, qui met en avant « la ville réelle dans sa totalité », fait nécessairement recours aux méthodes d'observation et d'évaluation efficaces et plus adaptées à l'ensemble des situations. C'est dans cette optique que : *« la télédétection spatiale et les systèmes d'information urbains peuvent alors jouer un rôle essentiel : c'est bien en termes de possibilités qu'ils offrent pour renouveler l'approche de la ville qu'il importe d'appréhender ces*

nouveaux outils de connaissance du milieu urbain. » (Dureau et Weber, 1995). Les vues globales offertes par les images satellites permettent donc d'appréhender l'ensemble de l'agglomération.

En effet, les images satellites offrent une vue globale sur la ville, ce qui permet la lecture de l'ensemble de l'agglomération et l'appréhension des différentes dynamiques spatiales, volontaristes et spontanées. Ainsi, par le même fait des fauchées spatiales et des périodicités régulières que présentent les images satellites, cette source de données multitemporelle permet un suivi spatialisé de l'évolution des agglomérations urbaines, de comprendre leurs recompositions et leurs fragmentations dans l'espace comme dans le temps. L'imagerie satellitale se présente ainsi comme le « pivot » de développement des systèmes d'information géographique appropriés à l'urbanisation spontanée qui est aussi rapide et manifestante et loin d'être cartographiée et réglementée dans la documentation traditionnelle d'urbanisme. Sur ce sujet, Dureau et Weber (1995) ont souligné que : « *les nouveaux outils de connaissance que sont les SIU et la télédétection spatiale peuvent alors être les chevilles ouvrières d'une nouvelle lecture de la ville, qu'impose le constat d'échec des approches traditionnelles de la ville dans le contexte des métropoles du tiers monde* ».

III.2. La télédétection spatiale : notions et concepts de base

III.2.1. Définition

La télédétection spatiale se rapporte à la discipline qui porte sur l'observation à distance de la surface terrestre. Elle correspond à l'ensemble des techniques d'acquisition de l'information sur des objets, des scènes ou des phénomènes terrestres par la mesure de certaines de leurs propriétés électromagnétiques. Bonn (1998) définit la télédétection spatiale comme : « *la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plateformes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes* ». La télédétection spatiale correspond donc à l'acquisition de l'information sur des objets, des scènes ou des phénomènes terrestres sans contact physique direct avec ceux-ci (Kerle et al., 2004).

Le néologisme « remote sensing » a vu son apparition aux États-Unis dans les années soixante avec l'acquisition des premières images reçues des capteurs satellites en complément avec la photographie aérienne. Le terme « télédétection » a été introduit dans les dictionnaires français en 1973 avec comme définition : « *Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques* »¹¹. Une définition plus complète est donnée par le Centre Canadien de la Télédétection : « *la télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir*

¹¹ Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988

de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information » (CCT, 2005).

III.2.2. Principe de fonctionnement : schémas de base

D'une manière générale, la télédétection s'appuie sur l'interaction entre le rayonnement incident et les cibles. Le processus de télédétection, à travers un système composé de plusieurs éléments, englobe sept étapes qui sont illustrées dans la figure (figure III-1).

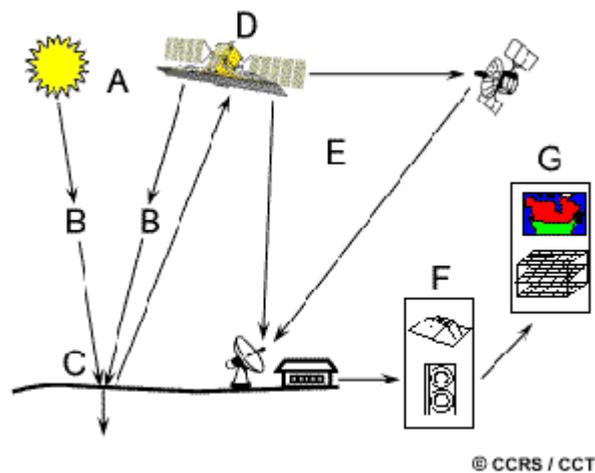


Figure III-1 : Système de télédétection

Source : (CCT, 2005)

A. Source d'énergie ou d'illumination : à l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

B. Rayonnement et atmosphère : durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

C. Interaction avec la cible : une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

D. Enregistrement de l'énergie par le capteur : une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.

E. Transmission, réception et traitement : l'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

F. Interprétation et analyse : une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

G. Application : la dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

III.2.3. Types de télédétection

Deux systèmes se distinguent en télédétection (Kerle et al., 2004) : la télédétection aérienne, dont le vecteur d'enregistrement des données est porté sur un avion ou un ballon ; la télédétection spatiale d'où le porteur du vecteur d'enregistrement est un satellite.

III.2.3.1. La télédétection aérienne

Le vecteur d'enregistrement des données est porté sur un avion ou un ballon. Elle consiste à obtenir de l'information géospatiale sur les territoires terrestres à travers l'acquisition de photos aériennes. La photographie aérienne, une technologie initialement militaire mobilisée lors de la Première Guerre mondiale, a vu sa première vulgarisation civile avec l'élargissement des prospections dans les domaines pétroliers et de l'archéologie. L'extraction de l'information se faisait par interprétation visuelle. Au cours de la Deuxième Guerre mondiale, de nouvelles techniques ont été développées en concomitance avec l'évolution de l'aviation. Les domaines de l'invisible, notamment celui de l'infrarouge, ainsi que les systèmes « Radar » ont été introduits simultanément avec les survols sur de très hautes altitudes. Ces nouvelles techniques ont été par la suite appliquées pour la détection de la végétation et le contrôle de leurs affections. L'association de trois technologies a conduit à l'essor de cette technique : l'aviation, la photographie et la photogrammétrie (Albert, 2007).

III.2.3.2. La télédétection spatiale

Elle correspond à l'acquisition de l'information géospatiale à travers les satellites qui supportent les dispositifs d'enregistrement des rayonnements émis par la surface terrestre. La naissance de cette technologie est liée aux fameux programmes de conquête spatiale des années soixante. La mise en orbite des premiers capteurs satellites a donné lieu à de nouvelles visions sur la planète terrestre, mettant le point sur l'importance de cette source de données géospatiale. De nouvelles attentes ont été suscitées amenant au développement des techniques d'observation des territoires terrestres qui étaient en premier temps que pour des fins militaires. Le lancement, en 1972, du premier satellite

américain à caractère civil a ouvert le champ aux applications civiles et a suscité le développement et la diversification des programmes spatiaux conduisant par la suite à la vulgarisation et la commercialisation des images satellites (Alberti et al., 2007 ; Khorram et al., 2016b).

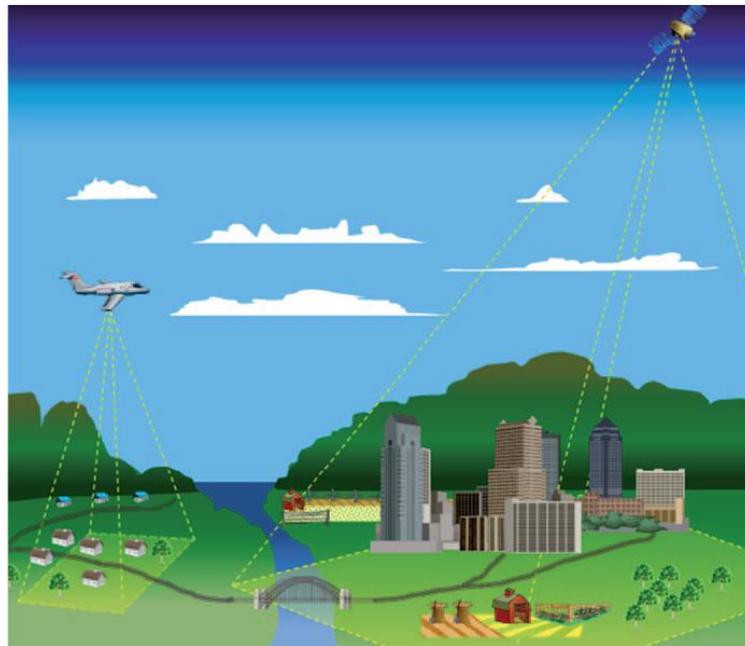


Figure III-2 : Télédétection aérienne et satellitale

Source : (Khorram et al., 2016a)

III.2.4. L'image satellitale : définition

Une image est une représentation numérique de l'énergie électromagnétique captée et enregistrée, quel que soit le dispositif d'enregistrement ou la longueur d'ondes utilisées (figure III-1). L'énergie enregistrée peut être visualisée de façon photographique ou de façon électronique. Il importe donc de distinguer entre image et photographie. Une photographie désigne particulièrement toute image captée et enregistrée sur une pellicule photographique à travers une réaction chimique sur une surface sensible à la lumière. Les longueurs d'onde enregistrées habituellement en photographie varient généralement entre 0,3 et 0,9 mm, ce qui correspond aux portions du visible et d'infrarouge réfléchi. Toute photographie est donc considérée comme image, mais les images ne sont pas toutes des photographies (CCT, 2005).

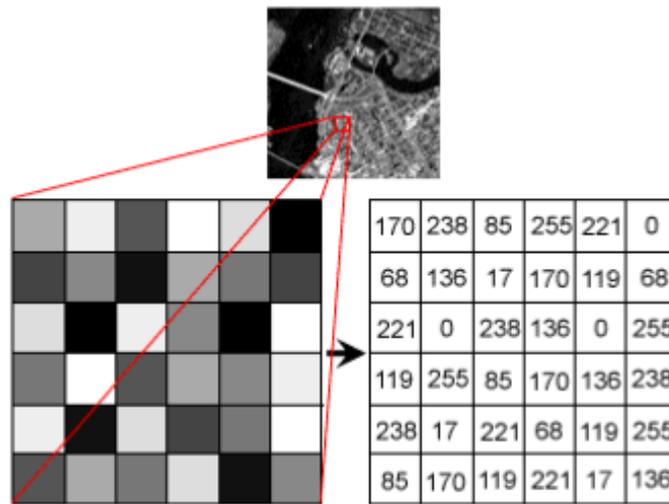


Figure III-3 : Représentation numérique des images

Source (CCT, 2005)

Les données captées par les satellites sont enregistrées numériquement au moyen de détecteurs électroniques. L'information est ensuite enregistrée sous forme d'image et retransmise à des stations terrestres de réception. À bord des satellites, le capteur enregistre les images sous forme de bandes spectrales. Chacune des bandes spectrales donne une image en noir et blanc, où les tons de gris varient. En superposant trois bandes spectrales avec des filtres de couleur, il est possible d'obtenir une image en couleurs ou un composé coloré. Chaque composition colorée donne des interprétations différentes sur l'occupation du territoire (CCT, 2005).

III.2.4.1. Les propriétés d'une image satellite

La connaissance des caractéristiques des images satellites constitue un préalable primordial à prendre en considération avant l'exploitation de ce type de support et l'utilisation des données qu'il peut véhiculer. D'une règle générale, les propriétés techniques caractérisant une image satellite peuvent inclure :

- Les différentes résolutions : spatiale, spectrale et radiométrique ;
- L'étendue spatiale (la fauchée) ;
- La résolution temporelle ;
- Le niveau de bruit.

III.2.4.1.a. La résolution spatiale

La résolution spatiale correspond à la capacité d'un capteur de distinguer des objets terrestres. Elle dépend de la taille des éléments unitaires composant les images qui sont les pixels. Un pixel est généralement de forme carrée, dont les dimensions de ses cotés définissent la résolution spatiale.

Plus la taille du pixel augmente, plus la résolution est basse : la détection des objets devient donc grossière. Par contre, la résolution spatiale devient plus haute dans le cas des pixels de tailles fines : dans ce cas, le niveau de détail devient plus important. Trois paramètres peuvent influencer la qualité informationnelle de l'image satellite acquise à savoir : la distance entre le capteur et la cible terrestre, le niveau de détail à obtenir, et l'étendue de la région observée. Les plus larges étendues sont couvertes par les capteurs les plus éloignés dont les résolutions spatiales sont plus modestes, tandis que les capteurs de très haute résolution spatiale sont positionnés sur des orbites moins élevées, mais avec couvertures géographiques moins larges. Les images satellites peuvent être classées selon leurs résolutions spatiales, mais il importe de mentionner qu'il existe une confusion terminologique dans les dénominations, notamment entre les classifications civiles et militaires. En se limitant au domaine civil, quatre catégories sont à distinguer (tableau III-1) : Basse Résolution (BR), Moyenne Résolution (MR), Haute Résolution (HR), et Très Haute Résolution (THR).

| Abbrégé | Dénomination | Résolution spatiale (m) |
|----------------|--------------------------|---|
| BR | Basse Résolution | 1000 m |
| MR | Moyenne Résolution | 80 m |
| HR | Haute Résolution | 10 – 30 m |
| THR | Très Haute Résolution | < 5 m |
| EHR | Extrême Haute Résolution | Non définie pour les applications civiles |

Tableau III-1 : Classification des images satellites selon leurs résolutions spatiales

Source d'après (Lhomme, 2005)

Par rapport à cette classification (tableau III-1), il convient de préciser notre position. Les images utilisées dans la présente étude sont des images Landsat TM, ETM⁺ et OLI/TIRS, qui ont des résolutions spatiales de l'ordre de 30 m. Elles sont considérées donc comme des images de Hautes Résolutions spatiales (HR).

III.2.4.1.b. La résolution spectrale

La résolution spectrale est définie comme « *l'aptitude d'un système de détection à distinguer des rayonnements électromagnétiques de fréquences différentes* » (CCT, 2005). Elle correspond à la capacité d'un capteur satellite à discriminer des petites fenêtres de longueurs d'onde (Lhomme, 2005). Cette caractéristique détermine la largeur des bandes spectrales. Les fenêtres des différents canaux d'un capteur deviennent de plus en plus étroites quand sa résolution spectrale tend à être de plus en plus fine. Les bandes spectrales occupent des intervalles du spectre électromagnétique sur lesquelles se fera la mesure de la réflectance par un capteur. À l'issue du calcul de réflectance, une

seule valeur pourra être obtenue pour chaque bande spectrale. Pour les capteurs multispectraux, une image est acquise pour chaque bande spectrale (Kerle et al., 2004).

Le spectre électromagnétique représente la gamme totale des longueurs d'onde des radiations électromagnétiques. Les ondes électromagnétiques sont réparties en fonction de leurs longueurs d'onde, leurs fréquences et leurs énergies (figure III-4). Le spectre électromagnétique s'étend continuellement des courtes longueurs d'onde (rayon gamma, rayon X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et onde radio). En télédétection, trois portions du spectre électromagnétique sont couramment utilisées : le domaine du visible, le domaine de l'infrarouge IR (proche IR, IR moyen et IR thermique), et le domaine des micro-ondes ou hyperfréquences (Kerle et al., 2004).

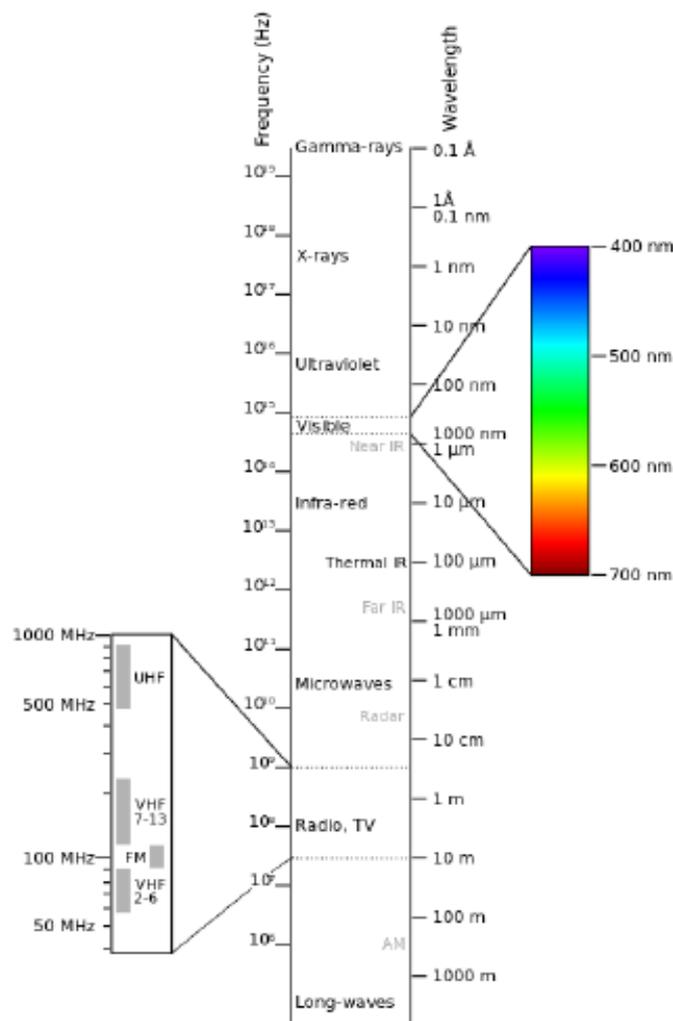


Figure III-4 : Le spectre électromagnétique

Source (Congedo, 2016)¹²

¹² Image publiée par Victor Blacus : <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>

À travers le calcul des réponses spectrales, il est possible de discriminer des classes de propriétés différentes en comparant leurs différentes réponses sur un éventail de longueurs d'onde. Le niveau de séparation des classes dépend du niveau de la résolution spectrale. Des classes larges et homogènes (comme la végétation et l'eau par exemple) peuvent être séparées en utilisant un intervalle de longueurs d'onde assez large comme le visible et l'infrarouge. Mais ce n'est pas le cas pour des classes plus particulières, qui se rapprochent en matière de réponses spectrales (les différents types de roches par exemple). Leur séparation n'est possible qu'avec l'utilisation d'un intervalle de longueurs d'onde beaucoup plus fin, ce qui fait appel à un capteur ayant une résolution spectrale plus grande (CCT, 2005).

III.2.4.1.c. La résolution radiométrique

Ce paramètre est mesuré en bits (binary digits). Il indique la plage des valeurs de luminosité disponibles. Dans une image, la radiométrie correspond à l'étendue maximale des valeurs numériques (Digital Number DNs). La description de l'information contenue dans une image dépend de ses qualités radiométriques. Par exemple, une image ayant une radiométrie de 8 bits comprend 256 niveaux de luminosités (Richards et Jia, 2006). La résolution radiométrique d'un système de télédétection décrit sa capacité de reconnaître des petites différences dans l'énergie électromagnétique. Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue. La gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible se nomme «plage dynamique». Les données enregistrées sont souvent affichées en tons de gris dont le noir représente une valeur numérique de "0", et le blanc correspond à la valeur numérique maximale (CCT, 2005). En comparant une image de 2 bits à une image de 8 bits d'une même scène, on peut remarquer l'énorme différence dans le nombre de détails qu'il est possible de distinguer en fonction de la résolution radiométrique (figure III-5).

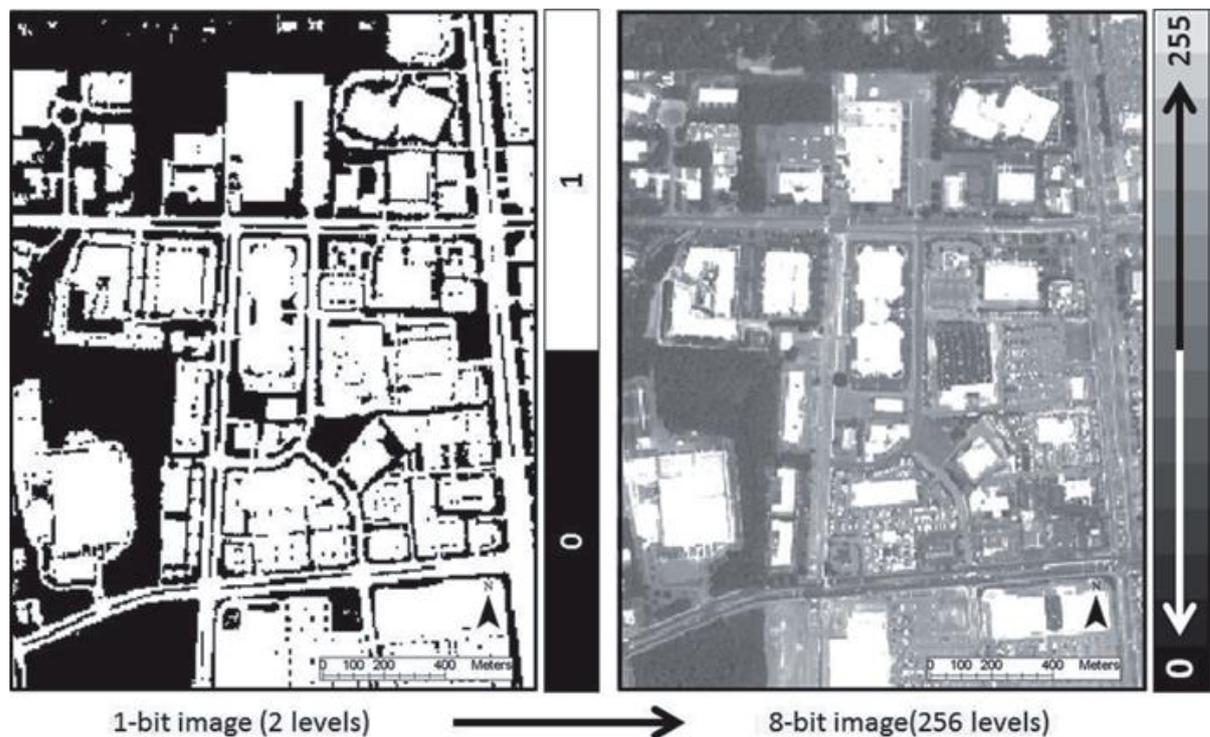


Figure III-5 : La même scène avec deux radiométries différentes (1-bit à gauche vs 8-bit à droite)

Source : (Khorram et al., 2016a)

III.2.4.1.d. La résolution temporelle

La résolution temporelle (ou répétitivité temporelle) est le paramètre de périodicité. Elle est définie comme « *la fréquence de la couverture temporelle d'un système de détection* » (CCT, 2005). Pour un capteur donné, cette caractéristique indique le temps nécessaire pour revisiter la même scène terrestre. Il s'agit donc d'un cycle orbital complet à effectuer. La résolution temporelle est fondamentalement en fonction de l'orbite du capteur.

III.2.4.1.e. La fauchée

La fauchée correspond à l'étendue géographique de la scène détectée. Le CCT (2005) la définit comme : « *la bande de terrain visée par un système de détection* ». Ce paramètre définit la taille du champ global d'observation. La fauchée détermine ainsi la taille maximale de l'image acquise. Selon les capteurs satellites, les fauchées varient d'une dizaine à une centaine de kilomètres. La figure qui suit (figure III-6) illustre cette variation en montrant les dimensions de chacune des fauchées des satellites Landsat TM, SPOT XS, Quickbird, et Ikonos.

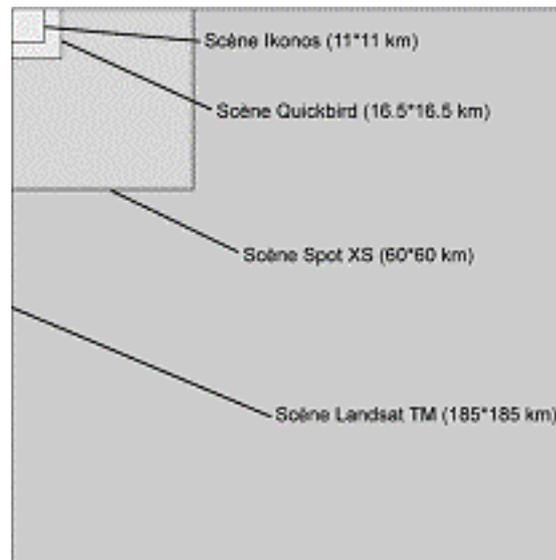


Figure III-6 : Comparaison des étendues spatiales de quelques capteurs satellitaires

Source d'après (Lhomme, 2005)

III.3. Extraction et lecture de l'information spatiale : interprétation des images satellites

III.3.1. Un processus intellectuel lié aux notions UOS

En télédétection, l'extraction de l'information peut être effectuée à travers l'interprétation des images satellitaires. D'une façon générale, l'interprétation est définie comme : « *l'étude des images en vue d'identifier et de caractériser des éléments déterminés* » (CCT, 2005). Il s'agit d'un processus intellectuel permettant la lecture et la compréhension du contenu d'une image (Collet et Caloz, 2001). La finalité de l'interprétation est la formalisation d'une information utile : « *L'objectif de l'interprétation est de transformer l'information (visuelle ou numérique) fournie par les images en information d'intérêt pour les utilisateurs. Cette information étant généralement spatialisée* » (Lhomme, 2005). Pour pouvoir se procéder à l'interprétation des images satellitaires, il est nécessaire de faire le recours aux notions d'occupation et d'utilisation du sol (UOS). L'occupation du sol se rapporte aux propriétés biophysiques des surfaces terrestres (végétation, roche, asphalte, tuile, etc.) ; l'utilisation du sol correspond à leurs vocations (bâtiments résidentiels, zones industrielles, voies de communication, zones protégées, etc.). Dans le cas des zones urbaines, l'attention est davantage portée sur l'utilisation du sol alors que les signatures spectrales ne véhiculent que des informations sur l'occupation du sol. De ce fait, l'interprétation des images satellites couvrant les milieux urbains est plus complexe que celle des milieux naturels qui sont généralement caractérisés par une superposition assez nette entre occupation et utilisation du sol (J.-P. Donnay et al., 2000). En milieux urbains, la définition de l'information d'intérêt dépend de la nature d'application qui est assez

diversifiée. L'information correspondant à l'utilisation du sol urbain, et même périurbain, s'étend sur un large champ d'application. Une variété de domaines d'application a été définie et catégorisée différemment selon les auteurs. La formalisation de l'information d'intérêt dépend ainsi des organismes disciplinaires et des catégories d'utilisateurs. Le tableau qui suit (tableau III-2) illustre quelques utilisations de l'information issue de la télédétection urbaine en fonctions des types d'utilisateurs (Puissant, 2003).

| Utilisateurs | Niveau d'intervention | Domaines d'application |
|---------------------------------|-----------------------|---|
| Gestion du territoire (G1) | Niveau opérationnel | Aménagement technique, cartographie de base (gestion du réseau...) |
| Analyse du territoire (G2) | Niveau tactique | Planification urbaine, urbanisme pré-opérationnel, étude d'impact, observatoire |
| Demandeurs de synthèses (G3) | Niveau stratégique | Décision, stratégie de développement, prospective... |
| Administrateurs de données (G4) | Niveau transversal | Archivage, stockage, mise en forme, mise à jour, numérisation... de données |

Tableau III-2 : Domaines d'application de la télédétection urbaine en fonction des types d'utilisateurs

Source : d'après (Puissant, 2003)

Il importe de noter que l'échelle de l'analyse est ainsi un préalable déterminant du type d'information d'intérêt (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016 ; C. Cao et Lam, 1997). Différentes échelles de lecture et d'interprétation peuvent être définies (Lhomme, 2005).

L'échelle de la macroforme (ou la tache urbaine) peut être adoptée pour caractériser les formes urbaines (Longley et Mesev, 2000), suivre et décrire l'étalement urbain (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016 ; Ban, 2016 ; Gamba et Dell'Acqua, 2016), et même pour délimiter les périmètres urbains (Guérois, 2003 ; Weber, 2003). À une échelle plus fine, la télédétection est utilisée par exemple pour estimer des informations statistiques (Baudot, 2001 ; Dureau et Weber, 1989), pour cartographier l'occupation du sol (Sawaya et al., 1997) et ses changements (Grey et al., 2003). Auparavant, l'échelle d'interprétation a été limitée par la modestie de la résolution spatiale des images satellitaires qui était trop grossière (Donnay, 1997).

III.3.2. La lisibilité des images satellites

Une des opportunités informationnelles des images satellites est qu'elles peuvent être à la fois source d'information et support de traitement et d'analyse de données qu'elles véhiculent (Weber, 1995). L'interprétabilité de l'image, c'est-à-dire son aptitude de rendre compte de la réalité spatiale en matière d'occupation du sol, dépend, d'un côté, de sa qualité qui est en rapport avec les caractéristiques techniques vues précédemment, et d'un autre côté, de l'objectif de l'interprétation

(Lhomme, 2005 ; Provencher et Dubois, 2007). La qualité d'une image est déterminée par le niveau de correspondance géométrique et radiométrique que présentent les différents pixels constituant cette image et la réalité du terrain, sans tenir compte des démarches d'interprétation (Lhomme et al., 2003). Pour notre étude, l'objectif est l'obtention de l'information spatiale sur des territoires urbains. La connaissance des particularités géométriques et spectrales des objets appartenant aux milieux urbains et périurbains est nécessaire pour pouvoir tirer profit de l'imagerie satellitale.

III.3.2.1. Des considérations spatiales

La lecture et l'interprétation spatiale d'une image dépendent principalement de deux facteurs qui, eux-mêmes, sont étroitement interreliés : l'échelle de l'interprétation et la résolution spatiale de l'image. D'une manière générale, l'échelle de l'analyse dépend de l'étendue géographique de l'aire d'étude et du type de l'objet ou du phénomène étudié. L'interprétabilité spatiale d'une image est en rapport avec l'échelle (C. Cao et Lam, 1997)¹³. En télédétection, la résolution spatiale est déterminée par le niveau de détail, des objets et des structures, recherché. Cela dépend aussi de la surface couverte par une image. En effet, la question du choix de la résolution spatiale ne peut être dissociée de l'échelle adoptée pour l'analyse. Quant aux milieux urbains, cette considération est d'autant plus importante. La lisibilité des images est de prime abord déterminée par la résolution spatiale (Baudot, 1997 ; Forster, 1985 ; Sobrino et al., 2012). Il est difficile de déterminer avec précision une résolution spatiale optimale pour la description des objets urbains en raison de la diversité des échelles adoptées et la diversité des thématiques abordant les milieux urbains : *« Les différentes études présentées montrent des écarts dans la nature et la méthodologie des analyses. Il est cependant possible de dégager quelques points essentiels. La résolution spatiale optimum se situe dans une fourchette allant de 5 à 30 mètres pour des analyses intra-urbaines ne nécessitant pas l'identification des objets. Par contre, si l'on considère l'analyse individuelle des objets urbains, la résolution spatiale optimale se situe entre 0,8 et 15 mètres. Il ressort également de cette analyse qu'il n'existe pas de résolution spatiale adaptée à l'ensemble des objets urbains. Cette dernière remarque est d'autant plus exacte qu'il existe des variations dans la taille des objets à l'intérieur d'une même ville et entre les types de villes »* (Lhomme, 2005).

III.3.2.2. Des considérations spectrales

L'interprétabilité des images pour la discrimination des surfaces et des objets urbains est en fonction de l'aptitude d'un système de mesure à discriminer les réponses spectrales des objets. Tenant compte de la grande hétérogénéité en matière d'occupation et d'utilisation du sol caractérisant les milieux

¹³ Cité in (Lhomme, 2005)

urbains et périurbains, le comportement spectral de ces milieux se trouve très varié ce qui fait varier aussi l'analyse spectrale. La caractérisation spectrale des milieux urbains, qui est en rapport avec le niveau d'analyse et la nature des matériaux identifiés, dépend directement de la gamme de longueurs d'onde et de la précision des appareils de mesure (Lhomme et al., 2003).

Les propriétés spectrales des milieux urbains se diffèrent d'un niveau d'analyse à un autre. À un niveau global, qui correspond à la macroforme, la caractérisation spectrale peut être réduite à l'identification de trois classes d'occupation du sol : les surfaces artificialisées, les sols nus, la végétation et, dans quelques cas, les plans d'eau. À un niveau secondaire, la caractérisation spectrale des zones urbaines se trouve en rapport avec des catégories majoritaires d'occupation du sol. La figure qui suit illustre un exemple de caractérisation spectrale des milieux urbains pour des longueurs d'onde variant de 0.4 à 10 µm.

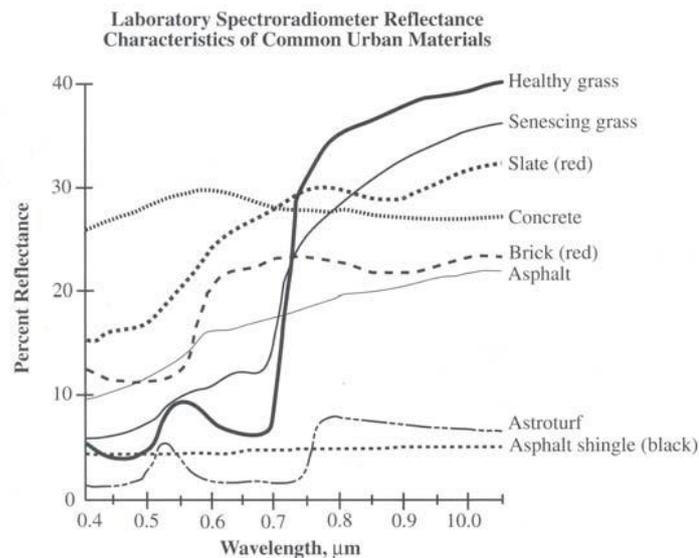


Tableau III-3 : Réflectance spectrale de quelques matériaux identifiés dans les villes

Source : (Jensen, 2000)

Quand il s'agit d'un niveau d'analyse plus détaillé, l'étude cherche à caractériser d'une manière plus fine l'ensemble des matériaux présents sur la scène étudiée. Pour se procéder à cette caractérisation, deux manières sont envisageables : soit en se procédant à l'établissement d'une librairie spectrale (Herold et al., 2004 ; Munafò et Congedo, 2017), soit en se procédant à la recherche de spectres élémentaires moyennant des méthodes de démixage permettant les séparations spectrales (Rashed et al., 2003 ; Small, 2003). Par exemple, Herold et al. (2004) a proposé une librairie basée sur la nomenclature de l'USGS¹⁴ (Anderson, 1976 ; J. R. Jensen, 2000), selon cette nomenclature,

¹⁴ U.S. Geological Survey

l'occupation du sol urbain est devisée en quatre niveaux hiérarchiques. Le premier niveau se rapporte à une classification d'ordre global catégorisée en quatre classes majeures : surface imperméable, sol nu, végétation et eau (Ridd, 1995). Le tableau qui suit (tableau III-4) illustre une nomenclature élaborée par Jensen (2000), contenant les types d'occupation du sol urbain à employer pour la création d'une librairie spectrale.

| Land cover classification scheme used for the analysis | | | | |
|--|---|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Level 1 | Level 2 | Level 3 | Level 4 | |
| 1. Built up | 1.1 Buildings/roofs | 1.1.1 Composite shingle roof | 1.1.1.1 Black shingle | |
| | | | 1.1.1.2 Blue shingle | |
| | | | 1.1.1.3 Brown shingle | |
| | | | 1.1.1.4 Green shingle | |
| | | | 1.1.1.5 Grey shingle | |
| | | | 1.1.1.6 Mixed shingle | |
| | | | 1.1.1.7 Orange shingle | |
| | | | 1.1.1.8 Red shingle | |
| | | | 1.1.1.9 Tan shingle | |
| | | | 1.1.1.10 White shingle | |
| | | | 1.1.2 Plastic roofs | 1.1.3.1 Light Glass |
| | | | 1.1.3 Glass | 1.1.4.1 Gray gravel |
| | | | 1.1.4 Gravel roof | 1.1.4.2 Red gravel |
| | | | 1.1.5 Metal roof | 1.1.5.1 Brown metal |
| | | | | 1.1.5.2 Light grey metal |
| | | | | 1.1.5.3 Green metal |
| | | | 1.1.6 Asphalt roof | 1.1.6.1 Light grey asphalt |
| | | | 1.1.7 Tile roof | 1.1.7.1 Red tile |
| | | | | 1.1.7.2 Gray tile |
| | | | 1.1.8 Tar roof | 1.1.8.1 Black tar |
| | | 1.1.8.2 Brown tar | | |
| | | 1.1.9 Wood shingle roof | 1.1.9.1 Dark wood shingle | |
| | 1.2 Transportation areas | 1.2.1 Asphalt roads | 1.2.1.1 Light asphalt (old) | |
| | | | 1.2.1.2 Dark asphalt (new) | |
| | | | 1.2.2.1 Light concrete | |
| | | | 1.2.3.1 Light Gravel | |
| | | | 1.2.4.1 Dak Parking lot | |
| | | | 1.2.5.1 Railroad tracks | |
| | | | 1.2.6.1 Light concrete | |
| | | | 1.2.6.1 Red brick | |
| | | | 1.2.7.1 White street marks | |
| | | | 1.2.7.2 Yellow street marks | |
| | | | 1.2.7.3 Red street marks | |
| | | | 1.2.7.4 Blue street marks | |
| | | | 1.2.7.5 Other street marks | |
| | | 1.3.1 Tennis courts | | |
| | 1.3 Sport infrastructure | 1.3.2 Red Tartan | | |
| | | 1.3.3 Basketball court | | |
| 2. Vegetation | 2.1 Green vegetation | | | |
| | 2.2 Non-photosynthetic vegetation (NPV) | | | |
| 3. Non-urban bare surfaces | 3.1 Bare soil | | | |
| | 3.2 Beach | | | |
| | 3.3 Bare Rock | | | |
| 4. Water bodies | 4.1 Natural/quasi-natural water bodies | | | |
| | 4.2 Swimming Pools | | | |

Tableau III-4 : Nomenclature élaborée pour l'établissement d'une librairie spectrale

Source : (Jensen, 2000)

III.4. L'imagerie satellitale pour l'étude des milieux urbains

III.4.1. Bref historique

Les études urbaines n'ont commencé à exploiter les images satellitales qu'au début des années 1970, avec le lancement des capteurs Landsat MSS 1 - 2 et 3. La résolution spatiale caractérisant ces premiers capteurs (80m) ne permettait d'étudier ces milieux qu'à une échelle plus globale, celle n'approchant la ville que dans sa globalité. L'espace urbain se distingue par la continuité du bâti et peut être extrait comme entité homogène (Albert, 2007).

Le début des années 80 a été marqué par la « mise en orbite » d'une nouvelle génération Landsat. Les deux capteurs *Thematic Mapper* (TM) de Landsat 4 et 5 fournissent des images ayant une

résolution spatiale de 30m. Quelques années plus tard, le satellite français SPOT commence à fournir des images de 10m de résolution. Cette évolution de qualité des images a placé la télédétection comme source importante de données.

La levée de la restriction militaire sur les images satellites de Très Haute Résolution spatiale (THR), inférieure à 5m de résolution spatiale, par le gouvernement américain en 1992, a suscité le développement des satellites commerciaux. Les satellites « privés » se sont multipliés avec des résolutions spatiales plus fines (de niveau décimétrique). Les approches et méthodes de traitement sont ainsi évoluées (Albert, 2007 ; Q. Weng, 2012).

| Capteur | Année de lancement | Résolution spatiale | | Répétitivité | Fauchée |
|----------------------|--------------------|---------------------|--------|--------------|---------|
| | | MS | Pan | | |
| Landsat TM (5) | 1984 | 30 m | | 16 jours | 180 km |
| Landsat ETM+ (7) | 1999 | 30 m | 15 m | 16 jours | 180 km |
| Landsat OLI-TIRS (8) | 2013 | 30 m | | 16 jours | 180 km |
| Spot 5 | 2002 | 10 m | 2.5 m | 26 jours | 60 km |
| Ikonos 2 | 1999 | 3.2 m | 0.80 m | 35 jours | 11 km |
| Quickbird 2 | 2001 | 2.4 m | 0.61 m | 20 jours | 16 km |
| Pleiades | 2011 (1A) | 2.8 m | 0.70 m | | 20 km |
| Alsat 2A | 2010 | 10 M | 2.5 M | 03 jours | 17.5 km |

Tableau III-5 : Caractéristiques techniques de quelques capteurs satellites

Source : (Albert, 2007 ; Weng, 2012)

III.4.2. Choix des images : le meilleur compromis

Il convient de noter que les capteurs dits THR (Très Haute Résolution) n'ont que des fauchées limitées qui ne couvrent pas la totalité des grandes zones urbaines (métropoles et grandes villes), et que les satellites ayant des fauchées plus importantes (60 km pour Spot et 180 km pour Landsat) sont cependant limités à des résolutions décimétriques (20 m pour Spot et 30 m pour Landsat). Le choix du capteur doit répondre au meilleur compromis qui tient compte tout d'abord de l'échelle d'étude qui détermine les qualités exigées en matière de résolution spatiale, spectrale et temporelle, et aussi de fauchée. Dans notre cas, l'échelle d'étude est celle de la macroforme, la Haute Résolution spatiale (HR) semble suffisante pour détecter les surfaces urbanisées. Les images Landsat sont à privilégier en faveur des caractéristiques qu'elles présentent : une résolution spatiale avec richesse spectrale

convenable pour l'étude de la tache urbaine, une fauchée assez large (180 km), et aussi le libre accès à cette source satellitale qui enferme des archives historiques assez importantes remontant jusqu'au début des années 70 (Gong et al., 2013 ; Griffiths et al., 2013 ; Phiri et Morgenroth, 2017 ; Woodcock et al., 2008; Zhu, 2017 ; Zhu et Woodcock, 2014).

III.4.3. L'extraction de l'information urbaine

D'un point de vue télédétection spatiale, les zones urbaines sont des espaces complexes et hétérogènes dont l'occupation et l'utilisation du sol est très diversifiée. Plusieurs matériaux peuvent se présenter dans les couvertures des sols (Albert, 2007) :

- Des couvertures minérales (dallage en béton, ardoise de toiture, tuiles, asphalte de voiries, etc.) ;
- Des couvertures métalliques (tôles ondulées des hangars industriels et d'entrepôt, etc.) ;
- Couvertures végétales (jardins, arbres divers, gazons, etc.) ;
- Couvertures hydriques (rivières, lacs, mers, etc.) ;
- Des sols nus.

L'information contenue dans l'image satellite peut être extraite à travers deux procédés : de manière visuelle par photointerprétation ou de manière semi-automatique par classification thématique.

La photointerprétation consiste à l'extraction de l'information à travers la lecture visuelle de l'image. Il s'agit d'un processus intellectuel qui se base fondamentalement sur des connaissances d'experts. Des compétences appropriées sont donc exigées dans cette démarche. Avec l'augmentation des quantités de données spatiales accompagnant l'avènement des images HR et THR, cette démarche « traditionnelle » est devenue moins appropriée, étant donné que son utilité dépend directement des compétences de l'utilisateur, et qu'elle est aussi subjective et consommatrice de temps. Le recours à l'automatisation offerte par l'outil informatique est devenu un besoin grandissant des utilisateurs. Des méthodes semi-automatiques ont été développées et mises en œuvre, permettant l'extraction et la classification des données contenues dans les images satellitales (Donnay et al., 2000).

III.5. Traitement et analyse des images satellites

L'interprétation et l'analyse des images acquises par télédétection ont comme finalité l'identification et la mesure des différentes cibles contenue dans ce type de support, afin de pouvoir en extraire l'information spatiale. Le traitement et l'analyse des images satellitale qui sont de format numérique font appel aux outils informatiques. Une démarche de prétraitement des images est requise avant de se procéder à l'extraction de l'information recherchée (CCT, 2005).

III.5.1. Prétraitement et rehaussement des images brutes

Le prétraitement des images satellites est un ensemble d'opérations de corrections radiométriques et géométriques à effectuer sur les données brutes contenues dans ce type de supports à afin de les rendre aptes à l'analyse et à l'interprétation. Cette démarche est un préalable nécessaire consistant à normaliser les images en éliminant les anomalies pouvant altérer la qualité des informations obtenues. Pour pouvoir passer à la classification et à l'analyse des données, plusieurs opérations sont à effectuer : correction radiométrique, correction géométrique, rehaussement des images, transformation des données.

La correction radiométrique inclus la correction des données dues à l'irrégularité du capteur, du bruit causé par l'atmosphère, et la conversion de la radiométrie mesurée afin rendre les valeurs enregistrées plus précises et représentatives de la réflectance mesurée par le capteur. La correction géométrique consiste à corriger les données de géolocalisation due aux distorsions géométriques engendrées par les variations de la géométrie Terre-capteur et l'inscription des données dans un système de coordonnées géographiques.

Les opérations de rehaussement consistent à l'amélioration de la qualité des images en matière d'apparence (figure III-7) afin d'aider à l'interprétions et l'analyse visuelle. Le rehaussement des images inclut la manipulation du contraste pour avoir de meilleure distinction de ton entre les différents objets d'une scène. Il offre aussi la possibilité d'effectuer le filtrage spatial, qui permet l'élimination ou la mise en éclat des patrons spatiaux spécifiques sur une scène.

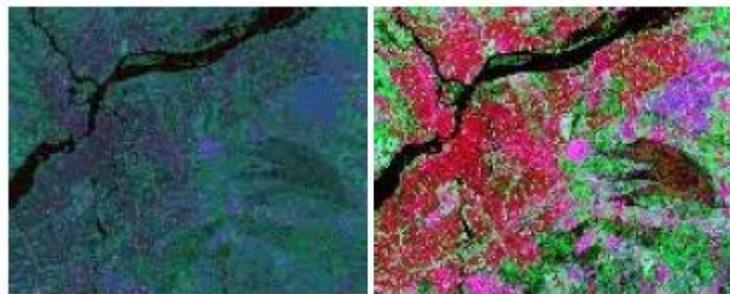


Figure III-7 : Apparence améliorée d'une scène satellite

Source : (CCT, 2005)

III.5.2. Classification des images satellitales

Les informations contenues dans une image satellitale sont de deux natures : spatiale et spectrale. Tout pixel d'une image satellite est inscrit en fonction de ses caractéristiques spectrales et spatiales. Selon le descripteur choisi au départ, deux catégories de méthodes d'extraction semi-automatique de l'information sont généralement utilisées en télédétection urbaine (figure III-9) :

III.5.2.1. Les méthodes de classification

Qui cherche à transformer les informations spectrales des pixels en informations thématiques utiles pour la compréhension et l'analyse. La classification se base uniquement sur les caractéristiques spectrales des images multibandes (images multispectrales) ;

III.5.2.2. Les méthodes de segmentation

Qui consistent à partitionner une image à bande unique en un ensemble de régions homogènes. Il s'agit donc d'un regroupement de pixels ayant des caractéristiques similaires (Smits et Annoni, 1999). À l'encontre de la classification, cette méthode est basée sur les descripteurs spatiaux d'une image monospectrale. La segmentation est une procédure traditionnellement utilisée en analyse d'image qui s'est généralisée pour être appliquée en télédétection urbaine (Pesaresi et Bianchin, 2003 ; Puissant, 2003).

En ce qui concerne notre étude, la classification des données satellitales sera la méthode choisie étant donné que cette méthode est couramment utilisée pour les études portant sur les formes urbaines à une échelle globale.

III.5.3. La classification des données satellites : approche « Par pixel »

La classification consiste à regrouper les pixels en catégories ou classes d'occupation du sol selon leurs valeurs spectrales. Cette opération de classification est appelée aussi reconnaissance de groupements spectraux. Le but est d'affecter à chaque classe thématique (bâti, végétation, sol nu, eau, etc.) les pixels qui l'appartiennent. La finalité est l'obtention d'une nouvelle image (ou carte) thématique constituée d'une mosaïque de classes d'occupation du sol dont chacune de ces classes a sa propre valeur numérique la distinguant des autres. Les méthodes de classification sont réparties sur de catégories : les méthodes de classification supervisées et les méthodes de classification non supervisées.

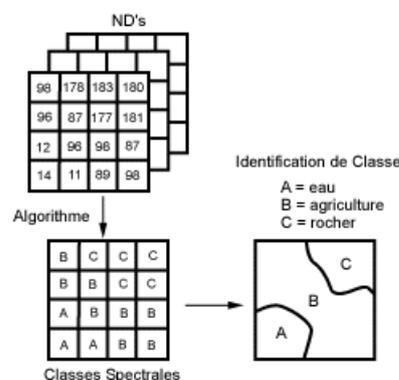


Figure III-8 : Schème de classification d'une image satellite

Source : (CCT, 2005)

Dans les méthodes de classification supervisées, les classes thématiques sont à priori définies par l'analyste. Pour se procéder à cette méthode, l'analyste doit identifier des zones homogènes de l'image servant comme des échantillons représentatifs des types d'occupation du sol qu'il souhaite extraire de l'image. Le choix des zones de test se fait par photointerprétation des images en se basant sur la connaissance de l'analyste de la réalité du terrain. À partir de ces zones de test, la signature spectrale pour chaque classe thématique sera identifiée ce qui permet par la suite aux pixels d'être affectés à la classe la plus correspondante. L'analyste supervise donc la classification des données selon des types prédéfinis d'occupation du sol favorables à l'extraction de l'information spatiale recherchée.

Quant aux méthodes de classification non supervisées, le procédé est inversé. L'analyste n'est pas en mesure de prédéfinir des classes thématiques. Ce sont les classes spectrales qui sont définies en premier lieu à travers une application algorithmique qui sert à regrouper les pixels en classes selon leurs ressemblances spectrales. Une fois les classes spectrales sont générées, l'analyste intervient en utilisant son interprétation pour former des classes thématiques en correspondance avec les classes spectrales obtenues. Dans cette méthode, l'analyste peut avoir la possibilité de préciser le nombre de classes voulu ou même de les combiner en manipulant leurs séparations spectrales à fin de fusionner des classes ou, au contraire, de les subdiviser en sous-classes.

Le choix des méthodes dépend des connaissances de l'analyse de la réalité du terrain, mais aussi de la qualité des images utilisées notamment les deux résolutions spatiale et spectrale. Quant aux milieux urbains et périurbains, la classification supervisée est la plus courante notamment quand il s'agit des images HR et des études globales comme celles de la tache urbaine. : « *En milieu urbain, la classification non-supervisée est très peu utilisée car elle est adaptée pour des classes qui se distinguent nettement dans l'un ou l'autre canal (tel que l'eau ou la végétation, par exemple). Par contre, la classification par maximum de vraisemblance est la méthode la plus souvent utilisée sur des images HR. Elle est appliquée depuis le lancement des premiers satellites d'Observation de la Terre et est encore largement utilisée à l'heure actuelle sur des images satellites HR* » (Puissant, 2003).

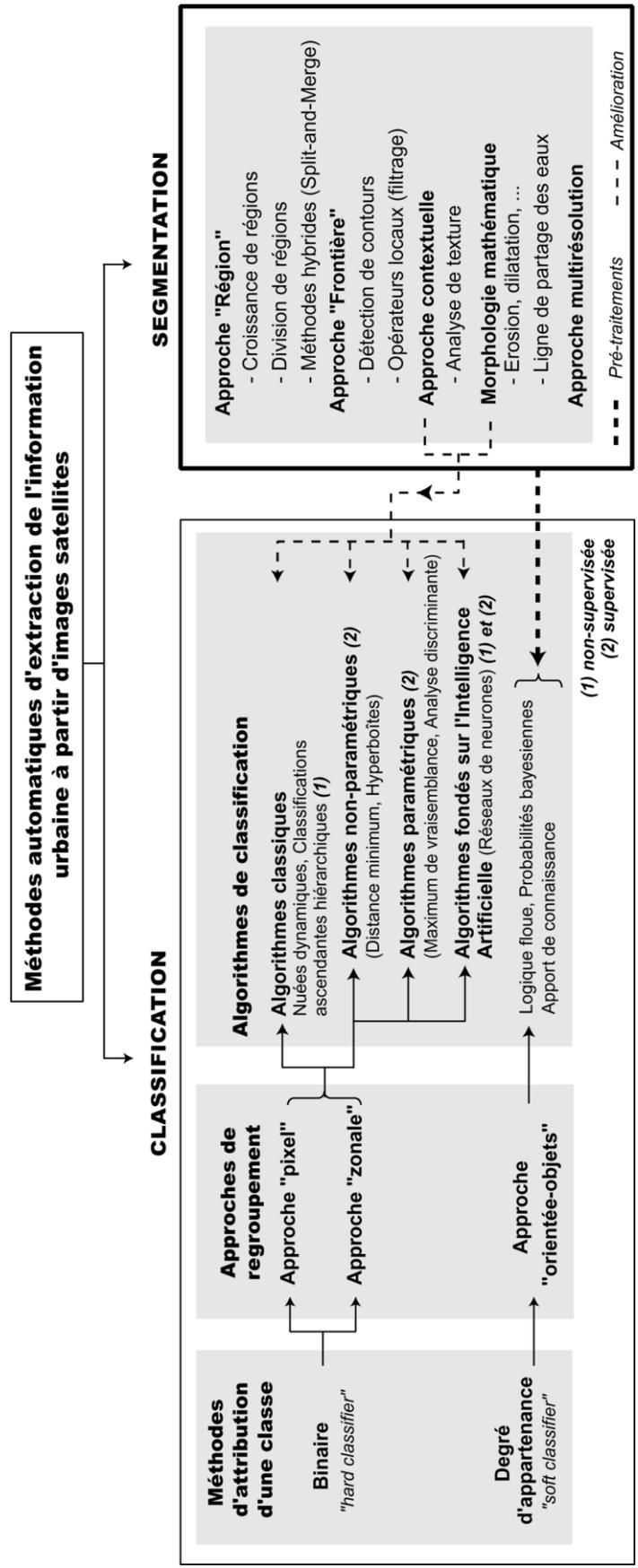


Figure III-9 : Méthodes d'extraction utilisées en télédétection urbaine

Source : d'après (Puissant, 2003)

III.6. Télédétection spatiale et SIG : application en milieux urbains et périurbains

La vulgarisation des images satellitaires a ouvert le champ pour le développement de la connaissance sur les processus terrestres. De nouvelles attentes ont été suscitées impulsant les études portant sur les territoires inaccessibles ou difficiles à y accéder à avoir lieu. Les milieux urbains n'ont pas eu l'opportunité d'être investigués par l'imagerie satellitaire qu'après l'amélioration des résolutions spatiales des capteurs satellites, notamment avec le lancement des capteurs *Thematic Mapper* de Landsat (30* 30m) au début des années 80, et Spot (20* 20m) en 1986. L'hétérogénéité de ces milieux en était la contrainte. Les résolutions spatiales de tailles grossières ne permettaient pas la discrimination des objets urbains, ce qui défavorise son utilisation à des échelles locales (urbaines et infra-urbaines). D'autres handicaps en rapport avec les capacités informatiques et électroniques à l'œuvre sont aussi à mentionner. D'après Weber (1995), il s'agit de : « *l'investissement intellectuel et technique, l'adéquation entre les différents produits et les informations habituelles (cartes, relevés, ...), les efforts méthodologiques, tant en analyse du signal qu'en analyse de données, et peut être aussi l'irruption dans un monde électronique, informatique qui à la fin des années 70 n'était pas encore, loin de là, aussi convivial, séduisant et domestiqué que maintenant.* ».

L'avancement de l'outil informatique, notamment traduit par le développement des moyens matériels et logiciels assez puissant, conjuguée avec l'amélioration des qualités des images satellites en matière de résolution spatiale et spectrale ont permis la perfection progressive des résultats. Depuis lors, l'information spatiale a acquis la double utilité d'être en même temps support et vecteur de connaissance : « *les informations, en général, ont acquis un statut différent. Elles ne sont plus considérées comme des éléments statiques de la connaissance, mais bien comme des gisements dynamiques, manipulables, reproductibles, polymorphes.* » (Weber, 1995). Le caractère numérique que porte l'image satellite lui permet d'être intégrée dans les SGBD¹⁵ qui contiennent les systèmes d'information localisée tels que les SIG et pouvant se servir comme source utile pour l'observation des territoires et de leurs dynamiques.

Les images satellites sont riches et assez variées en matière d'informations sur la surface terrestre. Selon la thématique et les objectifs recherchés, elles peuvent fournir des données pouvant aider dans l'analyse des phénomènes, mais aussi dans le développement de la réflexion : « *L'image de télédétection tant aérienne que satellitaire est sans doute le modèle visuel le plus fidèle, le plus riche de l'espace géographique. Elle est la source d'informations abondantes et précises sur l'occupation du sol et sur les phénomènes qui se déroulent à la surface de la planète* » (Collet et Caloz, 2001). Les applications de la télédétection spatiale dans les milieux urbains et périurbains sont très variées.

¹⁵ Systèmes de Gestion de Base de Données

La totalité des domaines se rapportant à la ville ont pratiquement y fait recours. À ce titre, on trouve entre autres : l'élaboration et l'actualisation cartographique ; l'analyse spatiotemporelle et le suivi de l'évolution urbaine ; l'analyse thématique et la production de l'information nouvelle.

III.6.1. Occupation du sol, inventaire et actualisation cartographique

Les chercheurs se consentent que les techniques d'observation et de « saisie » de la réalité terrestre sont incontestablement évoluées avec l'avènement de la télédétection spatiale : « *Les progrès les plus spectaculaires portent sur l'utilisation des satellites que ce soit pour la localisation ou l'observation de la terre* » (Pinson et al., 1987)¹⁶. Ce progrès a contribué à faire un « bond » à la fois quantitatif et qualitatif en matière d'identification et représentation des objets terrestres, et à donner la possibilité de combler les zones « non attribuées » en leur permettant d'être inventoriées dans les bases de données localisées : « *les grandes taches blanches qui caractérisaient les cartes des contrées inaccessibles se remplissent, l'incertitude - le mystère disparaît !* » (Weber, 1995).

Actuellement, les pays du monde se basent pratiquement sur la télédétection spatiale pour la création et l'actualisation de leurs cartographies. Les modes et les techniques de production cartographiques basées sur la numérisation sont ainsi généralisés et mise en oeuvre pratiquement dans tous les pays développés et les pays en voie de développement, avec écart évident entre ces deux mondes (Weber, 1995).

III.6.2. Cartographie et mise à jour à différentes échelles spatiales

Les images satellites peuvent se servir comme support de base dans la production cartographique à différents niveaux, mais avec différentes manières selon la finalité et l'échelle prédéfinie. Dans le cas des cartes topographiques à petites échelles (1/50 000^e, 1/100 000^e et plus), qui sont des cartes de références et servent pour la localisation des projets territoriaux, l'imagerie satellite intervient comme support aidant à différencier les surfaces terrestres (végétation, plans d'eau, etc.). Dans le cas des cartes thématiques, les images satellitaires trouvent leurs utilités dans le processus d'identification et de localisation des phénomènes terrestres selon les variables mis en valeur telles que le bâti, les surfaces protégées, la verdure, etc. À une échelle urbaine ou régionale (1/10000^e à 1/50000^e), les images satellitaires sont employées dans les études de planification et d'aménagement de l'espace, de gestion des ressources, et aussi dans la simulation et les études prospectives.

Un autre produit aussi important a pris place dans la nouvelle gamme satellitaire : la spatio-carte. Il s'agit d'une carte topographique superposée sur un fond d'images satellitaires. L'avantage que présente ce type de produit est qu'elle est soumise à une procédure de traitement et de rectification

¹⁶ Cité in (Weber, 1995)

géométrique conformément à un système de références géographiques, ce qui lui permet d'être utile comme un document réunissant à la fois les qualités cartographiques et la représentativité objective de la réalité spatiale : « *Elle offre en plus des insertions habituelles (informations cartographiques linéaires ou ponctuelles, habillage géographique et toponymes), des informations visuelles jusque-là absentes des cartes classiques, comme le relief* » (Weber, 1995). L'élaboration des spatiocartes se distingue aussi par des coûts moins élevés que ce soit pour les nouvelles créations ou les mises à jour, avec une qualité d'informations faisable pour les études urbaines en raison du niveau de détail que présente ce type de cartes.

III.6.3. Les Systèmes d'Information Géographiques

Les systèmes d'information géographique étant des outils technologiques basés sur des Systèmes Informatiques ont joué un rôle crucial dans le développement et la production de l'information spatiale. Ils constituent avec la télédétection spatiale des outils « de distinction » de la géomatique (Lhomme, 2005). Le comité fédéral américain (Federal Interagency Coordinating Committee) définit les SIG comme « *des systèmes composés de matériels, de logiciels et de procédures qui permettent d'acquérir, de gérer, de manipuler, d'analyser, de présenter et d'afficher les données géoréférencées* ». Ils sont devenus les outils les plus répandus dans la gestion et la planification spatiale. En effet, la télédétection spatiale et les SIG sont en étroite correspondance, le développement de l'un est lié au développement de l'autre : « *Dès la naissance du concept de systèmes d'information géographique (SIG), des liens étroits ont été établis entre la source d'information que les images de télédétection représentent et la similitude algorithmique qui caractérise les traitements à ceux du mode image* » (Collet et Caloz, 2001).

Les SIG et la télédétection ont été conjointement poussés par l'avènement technologique constaté ces dernières décennies. Bien que les images satellites aient la faveur d'être le support d'entrée le plus avantageux en analyse spatiale, le besoin d'un environnement de traitement complémentaire est nécessaire pour qu'elles soient utiles ; les SIG se présentent comme l'outil le plus avantageux pouvant assurer cette association. En effet, l'information spatiale obtenue à travers la télédétection n'est exploitable qu'à travers une procédure de traitement et d'analyse d'images satellites, complétée par l'intégration d'informations géolocalisées moyennant les SIG (Collet et Caloz, 2001).

De par le caractère cartographique que portent les images satellites, tout comme les cartes et les relevés de terrain, ainsi que la géolocalisation des données qu'elles supportent, ces sources satellitaires ont l'opportunité d'être mobilisées par la faveur des applications SIG pour « *toutes les approches de représentation de l'espace ou d'aide à la décision qui demandent une appréciation de l'occupation du sol et des contraintes associées* » (Weber, 1995). L'éventail de formats que peuvent

accepter les images satellites ainsi que la fluidité possédée en matière de changement de forme et structure de données leur permettent d'être une source privilégiée d'information. Cette source est devenue « quasi incontournable » dans le domaine des SIG compte tenu de ses opportunités de périodicité, d'exhaustivité et de reproductibilité des résultats. Le modèle numérique que porte la radiométrie des images satellites offre la possibilité de multiplier les manipulations des données spatiales, ce qui leur donne l'avantage de diversifier leurs utilisations. En effet, la télédétection spatiale associée aux méthodes SIG sont pratiquement devenues des outils incontournables dans tous les domaines traitant de l'information spatiale (Donnay, 1999 ; Rongbo et al., 2015 ; Weber, 1995).

III.6.4. Typologie et inventaires

L'étude des dynamiques d'occupation du sol est sans doute l'une des principales finalités de l'imagerie satellitale. Du fait qu'elle offre l'observation de la réalité biophysique des territoires, elle contribue à la formalisation d'information assez conforme aux attentes de précision, d'actualisation, d'extensibilité et de maniabilité de traitement.

La connaissance de l'occupation et de l'utilisation du sol et de leurs implications constitue un préalable primordial dans toute prise de décision relative à la gestion et à la planification spatiale, notamment des territoires urbains et périurbains, étant admis que tout développement soutenable est essentiellement basé sur la valorisation des ressources naturelles que l'imagerie satellitale offre la possibilité de les suivre. Depuis la Deuxième Guerre mondiale, le recours à l'imagerie spatiale n'était que pour des tâches complémentaires appuyant les méthodes de cartographie et d'aménagement de l'espace, à l'œuvre, qui sont principalement basées sur les images aériennes, les levés et les enquêtes sur terrain. Dans les pays en voie de développement, l'imagerie a prouvé ses opportunités pour surmonter les contraintes techniques et financières entravant les procédures de renouvellement et de mise à jour cartographique. Elle permet le suivi de la croissance rapide et moins contrôlée des villes, s'opérant particulièrement sur des marges non prises en considération dans les documents locaux d'aménagement et d'urbanisme. La mobilisation de la télédétection spatiale dans ces pays offre la possibilité de se procéder à une observation en continu de la totalité de l'espace urbanisé et d'établir donc une vision systémique de la croissance urbaine (Flouriot, 1995).

À la différence des villes des pays du Nord, dont le recours à la télédétection est de finalité diversifiée, la majorité des villes des pays du Sud trouve cette source indispensable notamment pour compenser le déficit informationnel dont la cartographie urbaine en a besoin. Sur ce point, Weber (1995) a indiqué que : « *Si pour les villes des pays industrialisés, l'imagerie satellitale permet d'accéder à un autre type de renseignements que ceux usuellement utilisés par les collectivités locales ou les usagers urbains, pour les villes des pays en voie de développement, elle est considérée comme*

l'apport primordial, palliatif aux manques de documents à jour, complets, accessibles ». La cartographie urbaine, en plus de la distinction des différents quartiers constituant la ville, permet également la localisation des zones d'extension, la compréhension des tendances et la visualisation des modifications altérant le paysage (Chaume et al., 1993).

Dans une optique de développement soutenable partagé, l'imagerie satellitale peut constituer pour les acteurs urbains une « Platte forme commune » sur laquelle se fonde un observatoire local, ou même régional, dont les intérêts sont spatialement localisés toute en prenant en compte la diversité de problématiques en rapport avec les particularités thématiques. À partir des années 90, plusieurs pays ont engagé des programmes spatiaux visant l'intégration des données satellitales pour la création et l'actualisation de leurs bases de données locales : *« Le couplage des nécessités de planification et de gestion des milieux urbains, et des moyens mis à disposition avec une plus ou moins grande envergure, augure du développement de l'usage des images satellitaires intégrées à d'autres types de données afin de pouvoir répondre aux obligations qui se font de plus en plus prégnantes pour les administrations territoriales quels que soient les pays, à savoir : le développement social et économique, la politique du logement, la réduction des atteintes à l'environnement »* (Weber, 1995).

III.6.5. Applications environnementales

Le progrès qu'a enregistré l'imagerie satellitale a considérablement contribué dans le développement de nouvelles connaissances sur l'interaction des établissements humains avec leurs environnements. L'amélioration des résolutions, spectrales, spatiales et temporelles, des images satellites a permis l'acquisition de données plus fines permettant l'observation et le suivi des différentes composantes de l'environnement aux seins et aux alentours des territoires urbanisés. Deux approches sont envisageables : la première se focalise sur l'état de l'environnement à l'intérieur et dans les périphéries des villes ; la seconde met en avant les rapports de causalité établie entre croissance spatiale et environnement. Les deux approches se convergent vers l'estimation des déséquilibres engendrés par l'activité anthropique et l'évaluation des politiques visant à maintenir l'équilibre écosystémique des agglomérations urbaines et périurbaines. Plusieurs études ont montré l'importance de la télédétection spatiale pour le suivi et l'évaluation des impacts de l'urbanisation sur l'environnement. Maints aspects ont été abordés : la déforestation (Barlow et al., 2007 ; Hansen et al., 2013 ; Klein et al., 2012 ; Walker et al., 2000), recul du potentiel agricole urbain et périurbain (Bianchin et Bravin, 2008 ; DeFries et al., 2010 ; KIEFFER et SERRADJ, 2013 ; Long et Leveiller, 2016), pollution et qualité de l'air (Desailly, 2005 ; Donnay et al., 2003 ; Du et al., 2014 ; Hoffhine Wilson et al., 2003), îlots de chaleur urbain et changement climatique (Aboelnour et Engel, 2018 ;

Bechtel, 2011 ; Bechtel et Daneke, 2012 ; Congedo et Macchi, 2015 ; Congedo et Munafò, 2014 ; Peng et al., 2016 ; Reid et al., 2000 ; Voogt et Oke, 2003 ; Q. Weng, 2009 ; Zak et al., 2008), pollutions et qualité de l'air (Engel-Cox, Hoff, et al., 2004 ; Engel-Cox, Holloman, et al., 2004 ; Gupta et al., 2006 ; Han et al., 2014 ; Q. Weng et Yang, 2006), pollution et qualité de l'eau (Jensen et al., 2004 ; Dengsheng Lu et Weng, 2006 ; Miller et Small, 2003 ; Pratt et Chang, 2012 ; Slonecker et al., 2001 ; Wilson et al., 2003 ; Yin et al., 2005 ; Zhao et al., 2015). Gestion et prévention des risques urbains (Dousset et al., 2007 ; Leh et al., 2013 ; Machault et al., 2012 ; Rashed et al., 2007 ; Tatem et Hay, 2004 ; van der Sande et al., 2003) et bien aussi d'autres.

III.6.6. Patrimoine naturel, espaces verts et écosystèmes

La biodiversité urbaine a ainsi tiré avantage des applications de la télédétection spatiale. Le suivi et la protection de cette composante vitale en milieux urbains constituent un enjeu majeur que tous les acteurs cherchent à le mettre en avant, étant un élément déterminant de la qualité de vie des habitants (Buyantuyev et al., 2010 ; Seto et al., 2012). Les rapports réciproques existant entre le cadre bâti et la végétation ont amené la communauté scientifique à proposer des indicateurs pour décrire les structures des paysages urbains au regard de la répartition du couvert végétal. Parmi ces indicateurs on trouve, entre autres, l'indice de végétation NDVI et l'indice du bâti NDBI (Deng et Wu, 2012 ; DU et al., 2010 ; C Small, 2001 ; Yuan et Bauer, 2007). Les images satellites offrent aussi, dans une vision écosystémique, la possibilité de prendre en compte de l'ensemble de l'espace que présente la biodiversité ainsi que l'analyse des aménités spatiales dans la ville : « ... *il est intéressant de noter qu'il est possible d'analyser l'espace urbain en fonction des potentialités d'accès à des espaces verts publics par la population.* » (Weber, 1995). De nouvelles méthodes basées sur la modélisation ont permis l'établissement de « zonage écologique » au niveau des territoires urbains à travers l'exploitation de l'information extraite de l'imagerie satellitale en mettant en relief les zones couvertes par la végétation et les plans d'eau, en rapport avec celles occupées par le bâti : « *La représentation simultanée par combinaison de ces deux surfaces statistiques offre en une information synthétique, des réponses rapides pour l'analyse de schémas spatiaux urbains* » (Donnay et Nadasdi, 1992).

III.6.7. Aménagement et planification spatiale : prédiction et analyse des scénarii

La collecte et l'analyse des données satellitales constituent actuellement une étape importante dans les études précédant l'élaboration des projets d'aménagement urbain. Ces projets peuvent intégrer plusieurs interventions à différents niveaux et à différentes échelles par exemple : l'identification des zones aptes à l'urbanisation (urbanisables) et les autres zones à risques ou inconstructibles ; l'étude multicritères visant l'établissement d'arbitrage et sélection des solutions pour de futures extensions

urbaines ; l'estimation et l'évaluation des besoins socioéconomiques en matière de logement, d'équipements et des infrastructures, et leurs planifications sur les différents termes ; la mise en valeur des quartiers vétustes et dégradés et la visualisation des propositions de leurs réhabilitations ou renouvellement. Les données satellitales peuvent entrer dans la constitution des bases de données localisées et qui peuvent être manipulées au moyen d'un SIG. En se basant sur les données recueillies des images satellitales, les méthodes SIG permettent d'aboutir à l'établissement de diagnostic et d'arriver par la suite à appréhender les défis que les responsables locaux sont appelés à faire face.

La prédiction de la croissance urbaine fait ainsi partie des possibilités offertes par la télédétection spatiale en association avec les SIG. La simulation des scénarii permet la visualisation et l'évaluation de différentes solutions de développement urbain. À ce titre, une démarche participative peut être envisagée, les images satellitales peuvent constituer des documents de références à partir desquels se développent des débats et des négociations autour des projets de grande envergure. La mise à disposition des données satellitales permet de visualiser et de cartographier les transformations prévues en matière d'occupation du sol et mettre en valeur l'impact environnemental et socioéconomique de ces projets (Chatain et al., 1994).

III.6.8. L'analyse spatiotemporelle des dynamiques spatiales

D'un point de vue général, l'étude spatiotemporelle est déterminée par « *les relations entre un mode de fonctionnement et un élément de base considéré comme l'unité d'intervention dans l'espace considéré* » (Weber, 1995). Dans le cas des agglomérations urbaines, le mode de croissance est généralement en rapport avec les éléments constituant le tissu bâti. Selon l'époque historique, ces éléments changent de statuts qu'ils présentent et changent ainsi de rapports qu'ils entretiennent avec l'espace urbain : « *La ville, par sa capacité à se modifier sans se perdre, laisse entrevoir ainsi des différences de niveaux de compréhension qui s'articulent sans être totalement lisibles* » (Weber, 1995).

Depuis plus d'un demi-siècle, les villes actuelles sont en perpétuelles dynamiques de croissance spatiale, par étalement sur les périphéries et par densification et renouvellement à l'intérieur des périmètres urbains. La cartographie de ces dynamiques d'une manière actualisée fait nécessairement appel aux outils offerts par la télédétection urbaine, notamment par le biais des images multitemporelle. Cet outil permet la quantification et la confrontation des formes générées aux indicateurs d'évaluation dont les responsables locaux ont besoin pour une meilleure compréhension et prise de décision : « *Les besoins de comparaison, à des fins de régulation notamment, rendent indispensable la mise au point d'indicateurs, d'indices, de catégories qui favorisent une mesure de variation. L'application d'une nomenclature dans ce que cela comporte de systématique entre dans*

ce contexte, car elle induit la comparabilité selon une terminologie applicable quels que soient les lieux. » (Weber, 1995).

Conclusion

La télédétection spatiale se rapporte à tout le processus d'acquisition, de traitement et d'analyse de l'information obtenue via les capteurs satellites. Elle offre des images riches en information spatiale avec de larges visions sur les territoires observés. L'image est une « représentation spatiale de la réalité ». Les images satellitaires ont joué un rôle essentiel dans tous les domaines se préoccupant des territoires terrestres, étant un support pertinent d'identification et de distinction spatiale des objets et des processus se rapportant à la surface terrestre et qu'elle peut fournir une « perception de la réalité proche de celle de la vision humaine ». Les opportunités apportées par l'imagerie satellitaire ont fait de celle-ci un outil incontournable dans l'étude des objets et des phénomènes terrestres comme l'urbanisation et l'environnement.

Les applications de l'imagerie satellitaires en milieux urbains et périurbains sont nombreuses et très diversifiées. De par la nature numérique diversifiée des images satellites ainsi que leurs variétés en matière de résolutions spatiales, spectrales et temporelles ont permis des possibilités variées pour l'étude des villes tant dans des visions statiques que dans des visions diachroniques. Parmi les domaines bénéficiant de la télédétection urbaine, on trouve la cartographie d'une manière actualisée de l'occupation et de l'utilisation des sols urbains ainsi que l'établissement des inventaires relatifs au potentiel naturel et environnemental ; le suivi de l'évolution urbaine ainsi que son évaluation à travers les outils de quantification et d'examen via des indices appropriés. En somme, la télédétection urbaine associée aux SIG peut servir comme des outils d'aide au suivi, à l'analyse et à l'évaluation des dynamiques spatiales s'opérant sur les territoires urbains et périurbains.

Chapitre IV. Détection et évaluation spatiales des formes d'urbanisation : application des méthodes de Détection du Changement (DC) et des métriques paysagères

Introduction

En écologie du paysage urbain, l'impact de la croissance des tissus urbains peut être abordé à travers le suivi et la mesure des transformations spatiotemporelles affectant les configurations et les structures des paysages. La démarche suivie se base essentiellement sur les données acquises de la télédétection spatiale et l'application des méthodes de calcul implémentées dans les SIG.

L'étalement rapide des zones urbaines peut être suivi et appréhendé à travers les outils offerts par la télédétection spatiale. La détection du changement (DC) est l'une des principales applications, qui sert à mettre en valeur les changements spatiotemporels dus à l'avancée de la frange urbaine. Les modèles de détection du changement LUCC (*Land Use and Land Cover Change*) permettent l'identification et la visualisation des zones affectées par l'urbanisation ainsi que leurs quantifications. Ils peuvent amener à l'élaboration d'une cartographie actualisée du changement avec description quantitative des surfaces changées et inchangées.

Une seconde procédure intéressante peut compléter la détection du changement. Il s'agit de l'application des métriques paysagères pour mesurer et évaluer les configurations générées par la croissance spatiale des villes. Les métriques paysagères sont développées et appliquées en écologie du paysage à partir des années 80, dont la vocation initiale était l'évaluation des formes de la végétation dans les paysages naturels, pour être par la suite généralisées et appliquées dans les milieux urbains et périurbains.

Le présent chapitre portera sur les approches de suivi et d'évaluation de la croissance spatiale des surfaces urbaines en essayant de mettre en évidence les méthodes proposées en écologie du paysage urbain, qui sont essentiellement basées sur la combinaison des outils issus de la télédétection spatiale et des SIG. Les deux principales approches seront successivement exposées. En premier lieu, nous essayerons d'étudier les modèles de détection du changement (DC). Par la suite, l'application des métriques spatiales dans les paysages urbains et périurbains ainsi que leurs importances seront abordées.

IV.1. La télédétection urbaine comme support de cartographie du changement : application des modèles de Détection du Changement (DC)

Les villes accueillent actuellement la grande partie de la population mondiale. Des dynamiques inédites de croissance urbaine sont en cours depuis la fin du dernier siècle et s'opèrent particulièrement sur les zones urbaines. Ces dynamiques sont traduites par un remarquable étalement des surfaces bâties au détriment du potentiel agricole et naturel environnant. Cet étalement démesuré est jugé générateur de nuisances et de dysfonctionnement des écosystèmes tant au niveau local que mondial. Les écologistes se consentent que l'urbanisation contemporaine est l'une des principales causes de dégradation de l'environnement et des atteintes des processus écologiques que les bilans environnementaux le confirment depuis des décennies : surconsommation énergétique et épuisement des ressources naturelles, pollution et émission des gaz à effet de serre en montée, déforestation et grignotage des espaces agricoles, réchauffement climatique et augmentation des zones vulnérables aux risques urbains, recul de la biodiversité, etc. Ces atteintes ont poussé la communauté internationale, à la suite d'une généralisation d'une prise de conscience, à prendre part pour y faire face.

IV.1.1. Le suivi des changements spatiotemporels pour comprendre les effets de l'étalement urbain

L'étalement urbain, étant un processus d'artificialisation des territoires agricoles et naturels, engendre en continu des mutations profondes de l'espace en lui apportant des changements irréversibles. Le paysage est de ce fait soumis aux perpétuelles sollicitations de modification de sa structure et sa composition. L'avancée de la frange urbaine poussée par l'extension des zones résidentielles, d'activités et des réseaux de transport se traduit spatialement par des changements d'occupation et d'utilisation des sols. Ces changements sont jugés responsables de la fragmentation du paysage en induisant des dysfonctionnements et des perturbations des écosystèmes avoisinants. La figure qui suit (figue IV-1) illustre quelques aspects de perte de l'habitat naturel en conséquence de l'étalement des zones bâties. Plusieurs formes de dégradation du potentiel agricole et forestier peuvent être générées : conversion et morcellement des espaces verts, interruption des processus écologiques sous « l'effet barrière » véhiculé par l'urbanisation (Aguéjdad, 2009 ; Bourgeois, 2015).

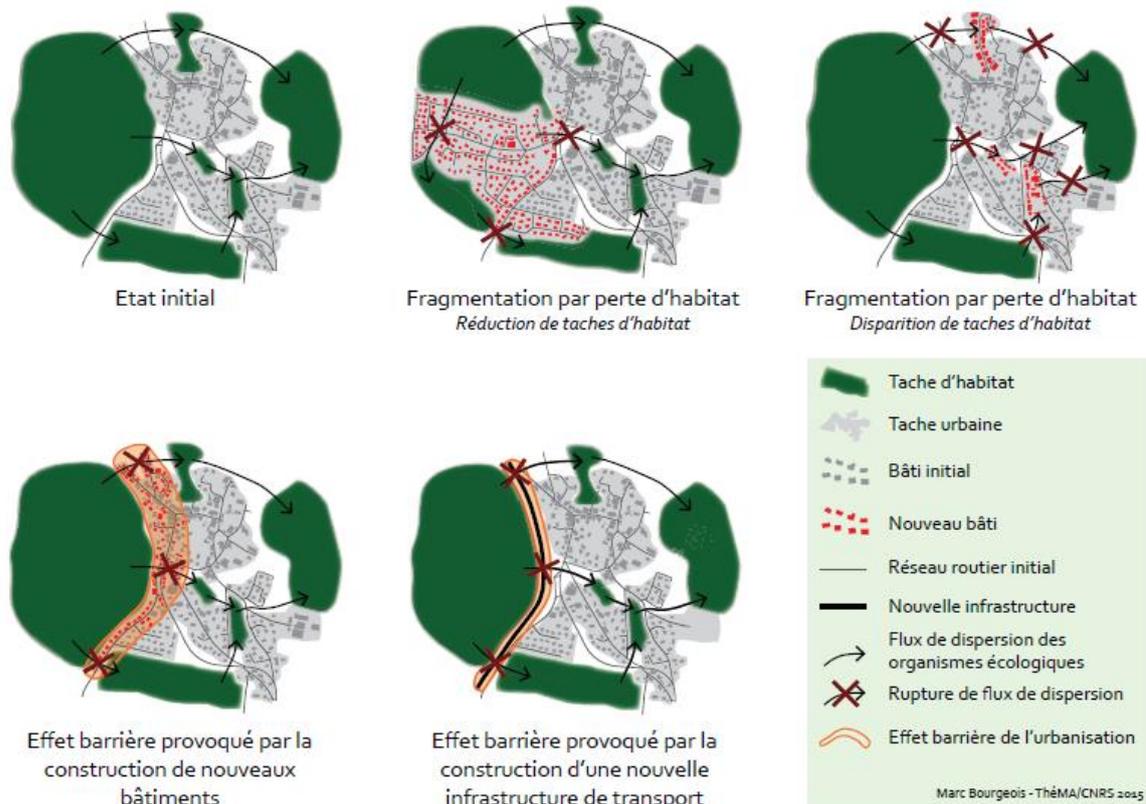


Figure IV-1 : Processus de perte de connectivité écologique causé par l'étalement de la tache urbaine.

Source : (Bourgeois, 2015)

Dans ce contexte, l'attention est portée au suivi et à la compréhension des dynamiques affectant l'occupation du sol à différentes échelles. La localisation de ces changements permet l'identification des processus en cours : « *C'est pourquoi les écologistes et les experts en ressources naturelles se montrent maintenant intéressés par la détection et la compréhension des variations des processus physiques et biologiques qui règlent le système terrestre* » (Mas, 2000). L'information sur le changement d'occupation et d'utilisation des sols est assez importante, compte tenu de son utilité pratique et variée prouvée dans de nombreuses applications comme la déforestation, le contrôle des désastres, l'estimation des pertes et dégâts, l'étalement urbain, aménagement et planification spatiale, etc. (Hussain et al., 2013). La conversion des surfaces terrestres causée par l'urbanisation est considérée comme l'une des modifications anthropiques irréversibles les plus impactées au niveau de notre biosphère (Seto et al., 2011). À ce titre, le recours aux méthodes efficaces paraît nécessaire pour cartographier, contrôler, analyser et évaluer ces changements environnementaux ainsi que leurs impacts d'une manière rapide et fiable (Ban, 2016).

IV.1.2. La télédétection du changement comme outil de suivi de l'étalement des taches urbaines

Le suivi de l'étalement urbain est une tâche importante pour envisager un développement soutenable de la ville contemporaine. La compréhension et l'évaluation de ces impacts nécessitent l'actualisation permanente de l'information sur l'utilisation et l'occupation du sol urbain et périurbain. À ce titre, deux méthodes d'acquisition, et même de production, des données spatiales se présentent : la méthode dite « classique » d'enquête et de relevé sur terrain, et celle d'analyse et d'interprétation de photographie et d'image numérique (Armand, 2016 ; Lhomme, 2005). La première démarche permet une formalisation plus pertinente de données en réponse aux besoins prédéfinis. L'avantage que présente cette démarche est qu'elle peut conduire à une cartographie plus précise des dynamiques urbaines. Toutefois, des inconvénients relatifs aux coûts élevés et aux temps consommés rendent difficile leurs actualisations (Jat et al., 2008), ce qui amène à privilégier le recours à la deuxième approche qui se base sur les sources satellitaires, compte tenu des opportunités qu'elles présentent (Armand, 2016 ; Weber, 1995). D'une part, ces images offrent des vues riches en informations spatiales sur des territoires plus larges avec des coûts moins élevés. D'autre part, la périodicité régulière de ces images permet la mise à jour et, donc, un suivi approprié des phénomènes spatiotemporels : « *La couverture spatiale étendue, l'informatisation des données, favorisent son utilisation par rapport aux moyens traditionnels.* » (Ouerdani, 1993).

La télédétection spatiale est actuellement devenue un outil incontournable pour le suivi de l'étalement urbain à la suite de l'essor technique et méthodologique enregistré dernièrement. Plusieurs opportunités se présentent à cet égard (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016 ; Weber, 1995). Les capteurs satellites fournissent des images riches en informations spatiales, en perpétuelle actualisation et avec des vues plus larges sur les territoires observés. En effet, les étendues couvertes par les scènes satellites sont prétentieusement larges, ce qui permet l'observation de l'étalement urbain sur l'ensemble du territoire avec vision globale et synthétique. De plus, la périodicité des capteurs satellites occasionnant la possibilité de revisiter régulièrement les territoires terrestres permet l'actualisation permanente de l'information sociospatiale sur les territoires suivis. Ainsi, l'accessibilité à ces ressources avec moins de charges financières est l'un des avantages considérables à ne pas dépasser, et qui s'impose par rapport aux méthodes classiques de collecte de l'information sur terrain qui sont généralement plus coûteuses et nécessitent des moyens techniques et financiers moins efficaces et souvent indisponibles dans les pays en voies de développement (Donnay et al., 2003 ; Du et al., 2014 ; Weng, 2012).

L'évolution des systèmes d'information géographique a aussi octroyé plus d'avantages à la télédétection spatiale (Donnay et al., 2003 ; Jensen, 2007). Les SIG permettent l'intégration, le traitement et la production de l'information spatiale acquise depuis les capteurs satellites à la faveur des formats numériques qu'elle présente. En effet, les études portant sur le suivi et l'évaluation des dynamiques spatiotemporelles s'effectuant sur les territoires terrestres, notamment la croissance spatiale des villes, s'appuient principalement sur l'association de la télédétection spatiale et les SIG qui permettent la cartographie des évolutions urbaines, l'identification des zones touchées par ces évolutions et la mesure de l'urbanisation en cours afin de pouvoir l'évaluer dans une démarche quantitative (Andrew et al., 2014 ; Ban, 2016 ; Donnay et al., 2003 ; Du et al., 2014).

IV.2. La détection du changement : les modèles LUCC

La télédétection spatiale est largement utilisée dans l'observation et le suivi des processus terrestres. Grâce à la répétitivité des données spatiales acquises, les images multidates, qui présentent des mêmes scènes prises dans de différents moments, font de la télédétection spatiale un outil puissant pour l'analyse multitemporelle des changements à différentes échelles (locale, régionale et globale) : « Elle permet le suivi du changement de la surface terrestre et l'étude des phénomènes dynamiques qui affectent les écosystèmes » (Mas, 2000). Les recherches dans ce domaine ont abouti à l'émergence d'une nouvelle discipline : la détection du changement (DC). Il s'agit, selon Singh (1989), d'une démarche de comparaison de scènes satellitaires multidates, consistant à mettre en valeur le changement biophysique de la couverture du sol durant une période donnée, à travers le calcul de la variation de radiance entre pixels ayant les mêmes localisations.

Les méthodes de détection du changement s'appuient principalement sur la télédétection spatiale et les SIG pour l'acquisition, le traitement et l'exploration de données spatiotemporelles. Les SIG facilitent ainsi la modélisation, la prédiction de différents scénarii ainsi que leurs évaluations. La détection du changement permet d'appréhender le processus d'étalement des villes, à travers l'identification de différents changements en matière d'utilisation et d'occupation du sol s'opérant sur les territoires urbains et périurbains (Hassan, 2017 ; Weber, 1995 ; Weng, 2012). Cette démarche peut aider les autorités locales à agir efficacement en matière de planification spatiale, dans une optique de développement soutenable des territoires avec moins d'impact sur l'environnement (Thériault et al., 2011 ; Weng, 2007). La finalité de cette approche peut inclure la localisation géographique du changement à travers une cartographie du changement, l'identification du type de changement, ainsi que son évaluation quantitative et qualitative (Hussain et al., 2013 ; Jensen, 2007).

IV.2.1. La démarche LUCC

Globalement, le parcours le plus générique de la détection du changement est constitué des opérations suivantes : définition des caractéristiques (ex : différence ou rapport) ; fonction de décision : c'est-à-dire l'opération qui permettra l'élaboration de la décision (ex : changement ou non-changement). Toutefois, ce parcours n'est pas applicable pour toutes les démarches de DC (Dreschler-Fischer et al., 1993). Une autre procédure de détection du changement synthétisée par D Lu et al. (2004) en trois étapes (figure IV-2) : (i) prétraitement des images ; (ii) choix de la méthode de détection du changement et, au final, (iii) évaluation de la précision (D Lu et al., 2004).

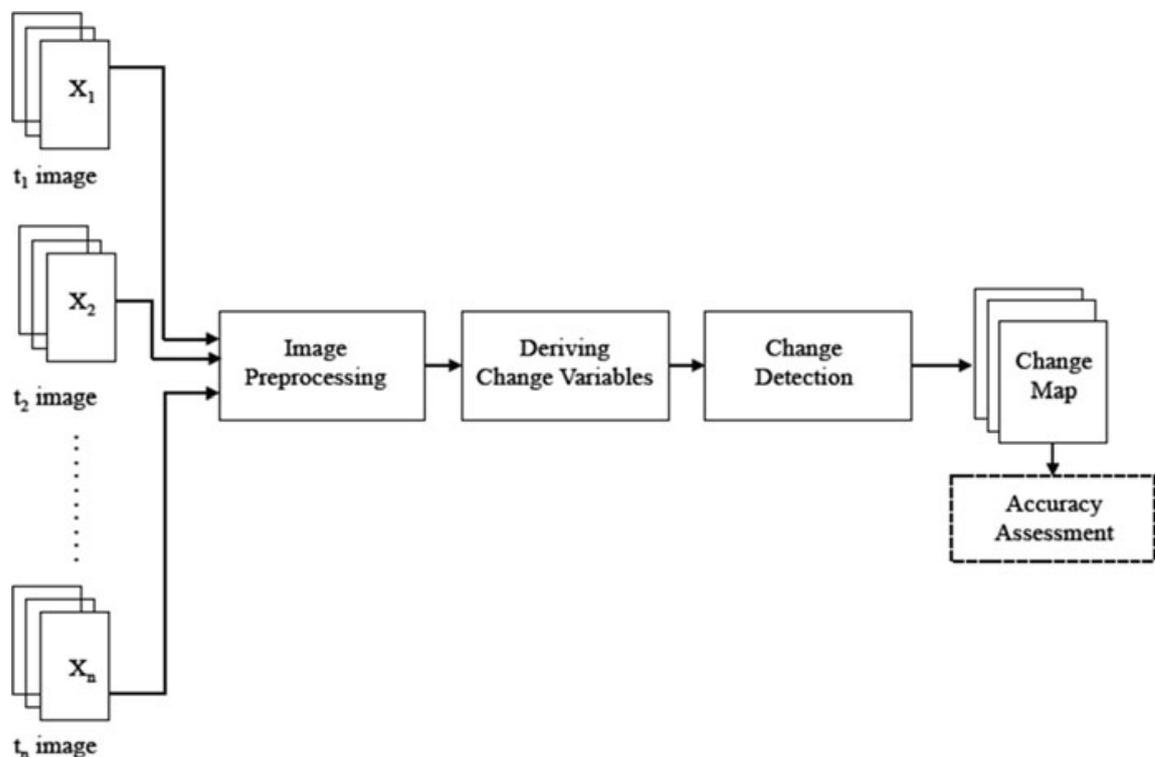


Figure IV-2 : Schème global d'une démarche de détection du changement

Source : (Ban et Yousif, 2016)

IV.2.1.1. Prétraitement des images satellites : correction géométrique et radiométrique

Le prétraitement consiste à effectuer des opérations de correction de la radiométrie et la superposition spatiale des images mobilisées afin de les rendre comparables. Cette opération est indispensable pour réussir le calcul du changement. L'objectif de cette étape est d'homogénéiser les attributs radiométriques des images. À ce titre, il est supposé qu'un objet terrestre ait la même valeur de brillance en cas de non-changement subit. Mais, dans la réalité, les valeurs mesurées sont fortement

sensibles aux conditions géométriques et atmosphériques d'acquisition. Les conditions radiométriques peuvent être influencées par plusieurs facteurs comme la différence des saisons, la différence des angles solaires, changement des conditions météorologiques, etc. Les conditions géométriques relatives aux positionnements orbitaux des capteurs tels que l'angle de vision du capteur, l'angle d'incidence locale et les orientations solaires dans le cas de l'imagerie optique, peuvent aussi avoir un effet significatif sur les données acquises (Mas, 2000).

Il est donc nécessaire d'effectuer la correction radiométrique avant d'entamer la détection du changement (Paolini et al., 2006). La correction atmosphérique consiste ainsi à une « normalisation » d'images multidates par la réduction des anomalies dues à l'atmosphère. Il s'agit d'une conversion des valeurs digitales (Digital Number DN) en réflectance de surface RT (Ban et Yousif, 2016). Une correction géométrique fait ainsi partie importante de la procédure du prétraitement. Elle consiste à assurer une parfaite superposition des images utilisées. Les pixels qui se correspondent doivent se référer aux mêmes localisations géographiques. Deux méthodes sont envisageables : registration « image à image » et orthorectification particulièrement pour les zones à relief accidenté ou les zones urbaines dans le cas des images de très haute résolution spatiale (Boccardo et al., 2004 ; Lagabrielle, 2003).

IV.2.2. Calcul et identification du changement : les modèles LUC

Les modèles LUC (*Land Use and Land Cover Change*) sont les principaux modèles issus de l'imagerie satellitale et appliqués pour le calcul et la cartographie des changements spatiotemporels. Les méthodes de détection du changement s'appuient généralement sur l'hypothèse que : « *les changements de l'occupation du sol se traduisent en variations de la radiance et que ces variations sont importantes en comparaison de celles causées par d'autres facteurs (conditions atmosphériques, inclinaison solaire, humidité du sol ou état phénologique de la végétation)* » (Mas, 2000). Il importe de noter que le choix des scènes satellitales prises dans les mêmes conditions atmosphériques et phénologiques peut réduire ces effets secondaires. En télédétection spatiale, l'objectif global de la détection du changement peut inclure la localisation géographique du changement, l'identification de son type, la quantification du changement et l'évaluation de la pression des résultats (Congalton et Green, 2008 ; Coppin et al., 2004 ; Im et Jensen, 2005).

L'utilisation généralisée de l'imagerie satellitale dans la détection du changement peut se justifier par les couvertures géographiques que présentent les scènes enregistrées de différents capteurs, de leurs accessibilités et de leurs variétés en matière de résolution spatiale, spectrale et temporelle. Il importe de noter que cette procédure est cependant complexe en raison, d'une part, des incertitudes liées au phénomène mesuré et aussi aux limites correspondant aux capacités des capteurs satellites à

mesurer les changements, au bruit inhérent au processus de traitement des images et à la compatibilité des images acquises de différents capteurs ; d'autre part, des incertitudes sont ainsi liées à la procédure de détection du changement opérée, qui correspondent aux conditions atmosphériques, à la phénologie, à l'humidité du sol, et à l'inclinaison solaire. Lors du choix de l'algorithme de détection du changement, il importe ainsi de souligner la nécessité de prendre en considération les propriétés spécifiques des images à utiliser, notamment les qualités des captures (optique ou radar), leurs résolutions (spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle), le bruit et les distorsions engendrés lors de l'acquisition ainsi que les spécificités thématiques de l'objet d'étude. En effet, il n'existe pas une méthode unique à travers laquelle toutes sortes de problèmes de détection de changement peuvent être traités. La diversité des applications fait appel à la diversité des approches et les différentes données satellitaires nécessitent des considérations propres aux capteurs mobilisés (Ban et Yousif, 2016 ; Mas, 2000).

Plusieurs techniques de détection de changement ont été proposées, dont chacune d'elles présente des avantages et des limites. Mais, d'une règle générale, un résultat réussi de détection du changement doit fournir les informations suivantes (Al-doski et al., 2013 ; D Lu et al., 2004) :

- Les surfaces changées et le taux de changement ;
- La distribution spatiale des types de changement ;
- Les tendances des différentes catégories d'occupation des sols ;
- La précision des résultats obtenus.

IV.2.3. La comparaison de scènes multidates : un cadre global

IV.2.3.1. Des considérations préalables avant le calcul DC

La qualité des résultats dépend de plusieurs facteurs à savoir (Ban et Yousif, 2016 ; Mas, 2000) :

- précision de la correction géométrique des images multidates acquises ;
- leurs normalisations radiométriques ;
- disponibilité de données collectées sur terrain ;
- la complexité du milieu étudié ;
- la méthode de détection du changement ou de l'algorithme utilisé ;
- le « schème » de classification et de technique DC suivi ;
- les compétences de l'analyste ;
- la connaissance de la zone d'étude ;
- les restrictions relatives au temps et couts.

La comparaison multitemporelle des images satellites est l'une des étapes essentielles dans la détection du changement. La finalité de cette étape est de générer une image de changement qui visualise le contraste entre les surfaces changées et inchangées. La carte du changement peut être produite par seuillage ou par classification de l'image de changement en appliquant un des algorithmes de classification (Gamba et Dell'Acqua, 2016). En raison de la complexité des facteurs intervenant dans la procédure de détection du changement, il est délicat de distinguer d'une manière généralisée un algorithme spécifique à une détection de changement. Une fois la zone d'étude et les images satellites sont définies, le choix de la technique de détection du changement la plus appropriée devient primordial pour obtenir des résultats de qualité considérable (Ban et Yousif, 2016).

L'étude du changement porte principalement sur les aspects suivants (Macleod et Congalton, 1998) : détecter si un changement s'est opéré, l'identification de la nature de ce changement, la mesure de son étendue surfacique, et l'évaluation du modèle spatiale caractérisant ce changement. Une implémentation réussie d'une application de détection de changement nécessite une minutieuse prise en compte du système de l'imagerie satellitale, des conditions environnementales d'acquisition et des méthodes de traitement des images effectuées. L'effet des résolutions temporelles, spatiales, spectrales et radiométriques est significatif dans la réussite des projets de détection du changement à différents niveaux d'analyse. Les principaux facteurs environnementaux peuvent inclure les conditions atmosphériques, l'humidité des sols et les conditions phénologiques (Ban et Yousif, 2016 ; Jensen et Lulla, 1987).

IV.2.3.2. Les méthodes de détection du changement

Depuis le lancement du premier capteur Landsat MSS en 1972, une large gamme de données satellitales a été successivement fournie par les différentes générations de capteurs. La disponibilité d'une archive très riche en ce genre de données a conduit au développement de plusieurs techniques de détection du changement, puis à leurs évaluations pour aboutir par conséquent au développement de nouvelles approches pour une analyse plus perfectionnées du changement d'occupation et d'utilisation des sols (Dewidar, 2004). Une variété de techniques de détection de changement a été développée dont la plupart ont été exposés et critiqués dans la littérature portant sur ce sujet (Aldoski et al., 2013 ; Ban et Yousif, 2016 ; Coppin et al., 2004 ; Hussain et al., 2013 ; D Lu et al., 2004 ; Mas, 2000 ; Singh, 1989). En fonction de l'approche adoptée, ces méthodes peuvent être, brièvement, répertoriées en trois catégories¹⁷ :

¹⁷ Pour plus de détail, voir (Ban and Yousif, 2016; Hussain et al., 2013; Lu et al., 2004; Mas, 2000).

IV.2.3.2.a. Des méthodes algébriques ou de comparaison directe

Qui s'appuient sur le calcul et la comparaison des valeurs radiométriques attribuées à chaque pixel à différentes dates pour révéler le changement. Le résultat de ce procédé « préclassificateur » est une image de changement. Plusieurs techniques adoptent cette approche à savoir, entre autres, la différence d'image (Quarmby et Cushnie, 1989 ; Ridd et Liu, 1998), la division d'image (Berberoglu et Akin, 2009 ; Howarth et Wickware, 1981 ; Prakash et Gupta, 1998) et l'analyse de la régression (Jha et Unni, 1994 ; Ludeke et al., 1990).

IV.2.3.2.b. Des méthodes de transformation

La démarche de comparaison se fera visuellement (par photointerprétation) ou numériquement à partir d'un calibrage et rehaussement d'images multidates. Parmi les techniques utilisées, on trouve : l'analyse par vecteur de changement CVA (Chen et al., 2003 ; Malila, 1980), différence d'indice de végétation NDVI (Sohl, 1999 ; E. H. Wilson et Sader, 2002), l'analyse en composante principale PCA (Byrne et al., 1980 ; Deng et al., 2008 ; X. Li et Yeh, 1998), machine à vecteur support « *Support Vector Machine SVM* » (Mountrakis et al., 2011 ; Nemmour and Chibani, 2006 ; Volpi et al., 2013) analyse de mixtures spectrales « *Spectral mixture analysis* » (D Lu et Weng, 2004 ; Powell et al., 2007).

IV.2.3.2.c. Des méthodes basées sur la classification

Il s'agit d'une comparaison de cartes classifiées correspondant aux images bitemporelles d'une même scène. Cette méthode, largement répandue (Mas, 2000), permet de mettre en valeur la nature du changement. La précision de la classification et de la superposition des images sont des facteurs déterminants de la qualité des résultats. Parmi les techniques les plus répandues on peut citer : la comparaison directe d'image multidates (Lunetta et al., 2006), le réseau de neurones artificiels « *Artificial Neural Network* » ANN (Dai et Khorram, 1999 ; Liu et Lathrop, 2002 ; Mas et Flores, 2008 ; Tong et al., 2010), la logique floue de changement « *Fuzzy change detection* » (Fisher et Pathirana, 1993 ; Ghosh et al., 2011), et la comparaison post-classification (Ghosh et al., 2011 ; Ji et al., 2006 ; Miller et al., 1998 ; Yuan et al., 2005).

IV.2.3.3. Choix méthodologique

Le choix méthodologique dépend généralement des objectifs recherchés, de l'hétérogénéité du territoire observé, de la résolution spatiale et temporelle des images utilisées et des connaissances de l'analyste (Ban et Yousif, 2016 ; Skupinski et al., 2009). Pour notre étude, la méthode de comparaison post-classification est privilégiée (figure IV-3), en raison des avantages qu'elle présente. En plus de

la possibilité de réduction des effets dus aux anomalies atmosphériques et aux capteurs satellites, une matrice complète peut être générée à l'issue du calcul. Ce qui permet la mise en valeur du changement, sa qualification (from... to), ainsi que la quantification des pixels inchangés et ceux qui sont convertis (Hussain et al., 2013). Une démarche de classification des images est nécessaire pour entamer le calcul de changement. Néanmoins, cette méthode peut présenter certaines limites : la qualité des résultats dépend directement du niveau de précision des cartes d'entrée. Une évaluation de la classification est donc nécessaire avant d'entamer cette procédure (Mas, 2000).

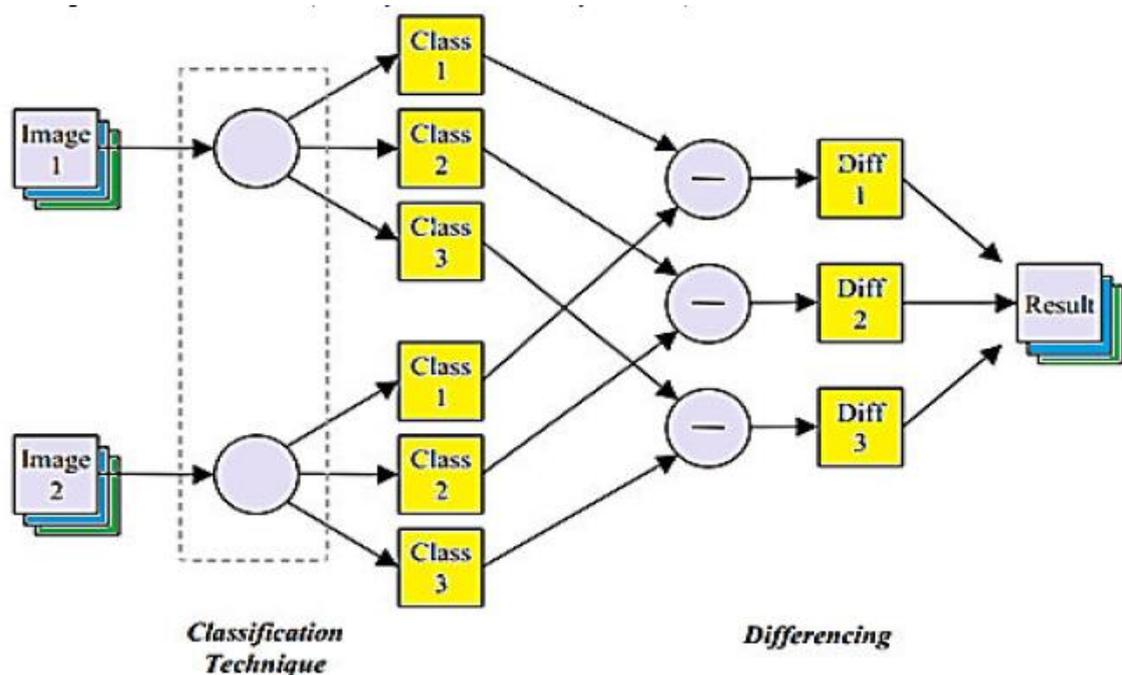


Figure IV-3 : Plan d'une comparaison post-classification de détection du changement

Source : (Al-doski et al., 2013)

Les techniques de détection du changement LUCC, principalement basées sur l'imagerie multitudes et complétée par les données issues du terrain, constituent un moyen efficace pour l'étude de l'étalement urbain. Elles permettent, avec l'intégration des SIG, le suivi et la compréhension de l'évolution des agglomérations urbaines. Les procédures de traitement des images permettent l'extraction des classes artificialisées (bâties) en opposition avec celles du non bâti occupées généralement par la végétation, les espaces naturels et les plans d'eaux (Weber, 1995 ; Weng, 2012). Ces méthodes offrent la possibilité de visualiser l'étalement du périmètre urbain qui est le contenant, en même temps que l'évolution de la compacité à travers le suivi du taux de remplissage qui est le contenu (Skupinski et al., 2009). La croissance des surfaces artificialisées indique donc un processus d'étalement de la tache urbaine. Elle est aussi considérée comme « un paramètre clé pour quantifier

l'étalement urbain » (Aguejdad, 2009). L'identification de ces surfaces peut se faire soit directement par analyse visuelle des images, soit après classification de ces images satellites.

IV.3. Évaluation des formes d'urbanisation à travers les métriques paysagères : apports des indices paysagers

IV.3.1. L'utilité d'une approche quantitative pour évaluer les transformations des structures paysagères

Les paysages sont des entités spatiales de la surface terrestre explicitement désignées par leurs compositions, structures et fonctions. Il est considéré comme résultante de l'association d'éléments de provenances physiques et humaines, mais qui peuvent être aussi en dépendance de la perception (Long et Leveiller, 2016). La mise en avant des aspects objectifs de cette notion fait appel aux approches quantitatives qui permettent l'évaluation des dynamiques d'évolution caractérisant les composantes du paysage (Clifton et al., 2008 ; Rongbo et al., 2015 ; J. Wu, 2013a). Sur ce point, Bailly (1977)¹⁸ propose de se diriger vers la compréhension des formes d'interdépendance définissant les éléments de composition d'un paysage et leurs caractéristiques.

En écologie du paysage, trois principaux aspects sont souvent abordés pour l'étude des paysages. Le premier aspect concerne la structure, d'où la focalisation sur l'organisation spatiale, les modes d'interférences et les rapports établis entre éléments de composition et entre écosystèmes constituant le paysage, les formes caractérisant les différents fragments du paysage, leurs tailles, leurs niveaux de dominance, le modèle d'agencement de ces éléments spatiaux ainsi que leurs dispositions par rapport à l'ensemble du paysage. À ce titre, les taches, les corridors et les matrices sont les principaux éléments de base à mettre en relief pour la caractérisation des paysages. Une variété de techniques et méthodes d'approches se présentent ; le choix méthodologique dépend de l'objet recherché et de son échelle spatiale et temporelle. Le deuxième aspect se rapporte au fonctionnement, en se focalisant sur les interactions qui se déroulent entre les composantes écosystémiques telles que les transferts des matières, d'énergie et même d'information pour les paysages anthropisées. Le dernier aspect correspond à l'étude du changement par le suivi des transformations qui peut affecter les structures et les fonctionnements des paysages dans l'espace comme dans le temps. Il importe de noter que ces trois aspects sont en interdépendance : *« le fonctionnement d'un paysage dépend de sa structure. De plus, un changement dans cette structure provoque directement des changements dans le fonctionnement du système influant ainsi sur la diversité biotique et le flux d'énergie et d'espèces »* (Aguejdad, 2009).

¹⁸ Cité in (Long et Leveiller, 2016)

IV.3.2. Les métriques spatiales pour l'évaluation de l'étalement des surfaces bâties

Les phénomènes complexes peuvent être appréhendés à travers l'analyse quantitative, en les soumettant aux méthodes de quantification. Dans ce sens, les indicateurs, étant des critères mesurables, se manifestent comme moyen très utile permettant la description et l'évaluation des phénomènes et des objets les plus complexes (Furberg, 2014). Les indicateurs environnementaux peuvent fournir des informations sur les problèmes environnementaux et sont de ce fait capables d'aider à identifier les facteurs clés qui exercent des pressions sur l'environnement (Smeets et Weterings, 1999). Ils peuvent également révéler l'état des écosystèmes et amener à la prise de décision en matière de planification et aménagement (Revenga, 2005). Le schéma illustré dans la figure qui suit (figure IV-4), proposé par Smeets et Weterings (1999), synthétise le circuit d'interactions multiples entre les composantes humaines et environnementales (forces motrices, pressions, état, impact et réponse). Ce schéma, abrégé DPSIR¹⁹, permet de rendre compte des interactions réciproques entre l'homme et son environnement naturel. Il aide ainsi dans la classification des indicateurs comme des éléments de mesure et caractérisation de différentes étapes de ces interactions.

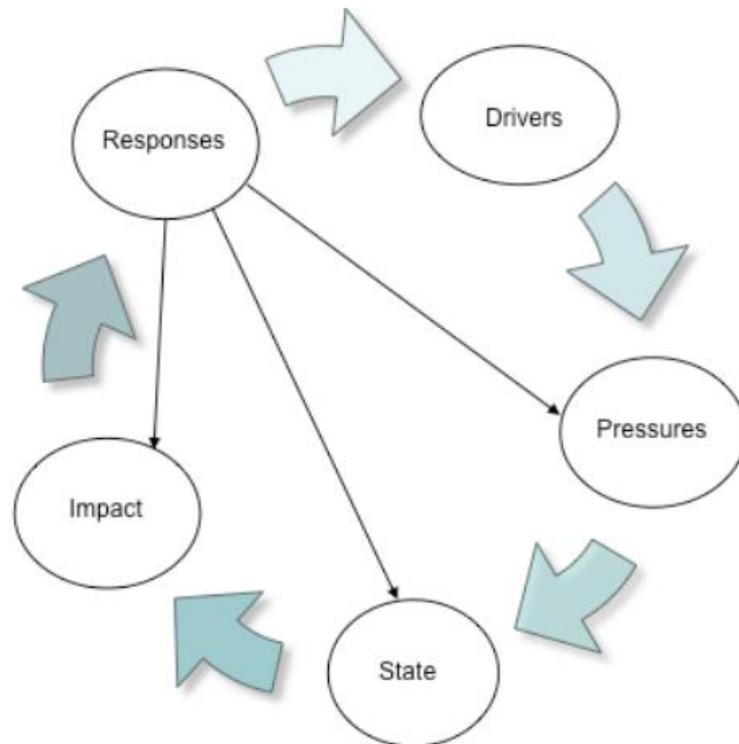


Figure IV-4 : L'interaction homme-environnement selon le cadre DPSIR

Source : (Furberg, 2014, d'après Smeets et Weterings, 1999)

¹⁹ Driving forces, Pressure, State, Impact, and Response.

Ce cadre de logique circulaire montre les rapports entretenus entre les forces motrices qui sont souvent d'ordre anthropique, les pressions environnementales engendrées sur l'état de l'environnement, les impacts dus aux changements de la qualité environnementale ainsi que les réponses sociales vis-à-vis ces changements environnementaux (Smeets et Weterings, 1999).

Plusieurs catégories d'indicateurs ont été formulées pour mesurer la pression naturelle et anthropique et indiquer l'état de l'environnement. Des indicateurs appartenant aux catégories biologiques, chimiques et physiques permettent, entre autres, la mesure de la qualité de l'air et la qualité de l'eau. D'autres indicateurs d'ordre socioéconomique servent comme des mesures de l'impact humain dû aux changements de la qualité environnementale, telles que la mesure des déchets générés par l'activité humaine, la santé publique, etc. (UNEP/RIVM, 1994).

Si un bon nombre d'indicateurs et indices environnementaux a été développé depuis plusieurs dernières, leur dérivation à partir des données satellitales et des SIG demeure un domaine de recherche assez nouveau (Furberg, 2014). Les capteurs satellites permettent le suivi des changements à l'échelle des paysages et fournissent ainsi les données nécessaires pour le calcul des indicateurs qui aident à évaluer ces changements. Cela devient particulièrement important quant à l'élargissement de l'étendue temporelle, spatiale et scalaire, dont le but est d'étudier et comparer le cumul des effets sur la dégradation des écosystèmes sur l'ensemble des paysages et des régions. La recherche portant sur les quantifications et les mesures environnementales est notablement évoluée grâce à l'introduction des procédés informatiques qui permettent l'intégration de l'imagerie satellitale et des méthodes de calcul des SIG (Haines-Young et al., 2003 ; Klemas, 2001²⁰).

IV.3.3. Les métriques paysagères pour mesurer le changement au niveau des paysages

L'analyse des structures et des configurations spatiales occupe une place centrale dans les recherches portant sur l'espace géographique (Herold et al., 2005). Des notions clés se rapportant à l'espace (comme : localisation, distance, direction, orientation, liaison, forme, et modèle) ont été largement évoquées comme des concepts « spatiaux » d'ordre général (Golledge, 1995). Ces concepts ont été mis en valeur d'une manière diversifiée selon la variété d'approches. En écologie du paysage, ces concepts de base liés à l'analyse des structures et des configurations spatiales peuvent être abordés sous la perspective des métriques paysagères (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016 ; Herold et al., 2005 ; Long et Leveiller, 2016).

Les métriques paysagères, connues aussi sous l'appellation « métriques spatiales » (en anglais : *landscape metrics* ou *spatial metrics*, ou simplement *metrics*) sont définies d'après Herold et al.

²⁰ Cité in (Furberg, 2014)

(2005) comme des mesures dérivées de l'analyse digitale des cartes thématiques présentant une hétérogénéité spatiale à échelle et résolution spatiales spécifique. Quant à l'application des données multitemporelle, elles peuvent être utilisées pour la description et l'analyse du changement de l'hétérogénéité spatiale dans l'espace comme dans le temps. Ces métriques constituent un type très spécifique d'indicateurs qui ont pratiquement prouvé leurs utilités pour le contrôle et le suivi des transformations spatiales affectant les paysages (Dunn et al., 1991 ; Herold et al., 2005). Les métriques paysagères, développées à la fin des années 80, ont été initialement appliquées pour la quantification et la description des formes et des modèles de la végétation dans les paysages naturels (Gustafson, 1998 ; McGarigal et al., 2012), pour être par la suite généralisée pour caractériser l'organisation spatiale des paysages (Herold et al., 2002 ; R. V. O'Neill et al., 1988 ; Turner et Gardner, 2015b), en mettant en œuvre des mesures dérivées à la fois de la géométrie fractale et de la théorie de l'information (Mandelbrot, 1983 ; Shannon et Weaver, 1964), avec des représentations de paysage basées sur les catégories d'occupation du sol et sur les taches.

En correspondance avec la quantification des dynamiques paysagères, un ensemble de concept clé a été développé en écologie du paysage se rapportant à la compréhension des transformations paysagères mettant en avant l'influence de la configuration spatiale du paysage sur les processus écologiques ainsi que leurs caractéristiques (R. T. Forman et Forman, 1995 ; Turner, 1990). La fragmentation des paysages et la connectivité écologique sont des principaux concepts clés caractéristiques. La fragmentation des paysages provoque généralement un effet négatif sur le fonctionnement naturel des écosystèmes. Le morcellement de l'habitat qui en résulte est ainsi constaté comme indicateur de dégradation des taches naturelles menaçant la biodiversité. L'action humaine en est le principal responsable du fait qu'elle est la cause des conversions affectant l'utilisation et l'occupation des sols. Les métriques paysagères, bien développées au sein de l'écologie du paysage, se présentent actuellement comme un outil pertinent permettant la mesure des changements affectant les paysages (Haines-Young et al., 2003 ; Neel et al., 2004 ; O'Neill et al., 1988 ; Turner, 1990 ; Uuemaa et al., 2013).

IV.3.4. Les métriques paysagères appliquées aux milieux urbains et périurbains

L'efficacité affirmée des métriques spatiales dans les études portant sur les paysages naturels a conduit à la vulgarisation de ces éléments de mesure notamment pour caractériser les transformations affectant les paysages urbains et périurbains. L'utilisation des métriques paysagères pour l'étude des villes et leurs périphéries a enregistré un intérêt croissant, particulièrement au cours de ces dernières décennies (Aguéjdad et Hubert-Moy, 2016 ; Sun et al., 2013).

Les indicateurs paysagers ont prouvé leurs faisabilités pour la compréhension et l'évaluation des dynamiques spatiales que subissent les villes, notamment les dynamiques de croissance spatiale qui s'opèrent avec des rythmes plus accélérés, au détriment des territoires de potentialités agricoles et naturelles en altérant le fonctionnement équilibré des écosystèmes et menaçant la biodiversité qui y habite, ainsi que la détérioration des ressources naturelles que possèdent ces territoires. Les métriques spatiales offrent l'opportunité d'appréhender les problèmes spatiaux qui font appel aux approches pouvant prendre en compte d'importantes étendues spatiales et temporelles. La perspective spatiotemporelle que porte l'écologie du paysage permet également de suivre l'évolution spatiale de la ville, d'identifier les altérations générées par cette évolution et d'évaluer son impact sur l'environnement. Les approches interscalaires peuvent ainsi amener à estimer l'impact des dynamiques de croissance spatiales sur l'environnement à différentes échelles, de celles des quartiers (micro) jusqu'à celles de l'ensemble de la région (macro) : « *la prise en compte de la notion d'emboîtement d'échelles contribue à mieux comprendre l'impact du processus d'étalement urbain sur un certain nombre de variables environnementales telles que la biodiversité* » (Aguedad, 2009).

IV.3.5. Les indices paysagers

De par l'utilité qu'elles présentent, l'application des métriques paysagères dans les milieux urbains se généralise de plus en plus avec l'avènement des questions écologiques relatives à la protection et à la promotion de l'environnement dans et en dehors des territoires urbains. Elles aident à ressortir les composantes spatiales caractérisant les structures urbaines aussi bien à l'échelle intra-urbaine que régionale (intra-cités). Elles amènent aussi à caractériser les dynamiques d'évolution et les processus de croissances spatiales (Alberti et Waddell, 2000 ; Hassan, 2017 ; Herold et al., 2005, 2002 ; Schwarz, 2010 ; Sun et al., 2015 ; Zipperer et al., 2000). Il importe de noter que l'application combinée de l'imagerie satellitale et la métrique spatiale moyennant les SIG permet l'obtention des informations plus détaillées avec plus de consistance sur les paysages urbains. L'association de ces deux approches offre la possibilité d'améliorer les niveaux de précision de la production satellitale ainsi que les qualités cartographiques générées, ce qui facilite bien leurs explorations pour de spécifiques applications urbaines (Herold et al., 2005).

Basée principalement sur les travaux d'O'Neill et al. (1988), une grande variété d'indicateurs a été développée, testée et reformulée dans des situations différentes (McGarigal and Marks, 1995 ; Riitters et al, 1995 ; Hargis et al, 1998). Mais, tenant compte de la complexité des paysages étudiés, ces indicateurs sont souvent corrélés entre eux, en raison de leurs méthodes d'élaboration qui sont à la base calculées à partir des formules simples relatives à la quantification des taches à savoir : la

nature de tache, ses mesures géométriques (périmètre, surface), la nature de son voisinage. La formulation de ces indicateurs métriques se fera par la suite à partir de ces mesures basiques.

IV.3.6. Classification des indices : composition, configuration et structure

Plusieurs ensembles de métriques ont été formulés pour la vocation d'examiner les différents aspects du paysage. Selon leurs méthodes de formulation, ces métriques se distinguent en trois grandes catégories : des indices de forme, des indices de composition et des indices de configuration (Neel et al., 2004 ; O'Neill et al., 1988).

IV.3.6.1. Les indices de composition

Qui fournissent des informations sur la constitution de la mosaïque paysagère à savoir : le nombre de taches, leurs densités, leurs tailles (moyennes et la taille de plus grand fragment), le nombre de classes d'occupation du sol constituant le paysage, leurs proportions par rapport à l'ensemble du paysage.

IV.3.6.2. Les indices de forme

Qui consistent en la description morphologique du paysage, notamment la complexité des formes des fragments. Parmi ces indicateurs, on trouve : l'indice de forme du paysage, le ratio périmètre-surface, la dimension fractale, etc. Les formes des taches et leurs complexités ont une grande influence sur les processus écologiques d'où l'utilité de ce type d'indicateurs.

IV.3.6.3. Les indices de configuration

Ces indices peuvent rendre compte de l'organisation spatiale des paysages, la fragmentation ou la compacité du paysage, l'agencement et la disposition des différents éléments de constitution. Les mesures obtenues peuvent inclure : le niveau de fragmentation, la connectivité ou l'isolement caractérisant les différentes taches. Parmi les indices appartenant à cette catégorie on peut citer : l'indice de proximité, la distance moyenne entre deux taches voisines, la connectivité, la cohésion, la contagion, l'agrégation ainsi que l'indice de fragmentation. Il convient de mentionner que les indicateurs de configuration se distinguent eux-mêmes en deux sous-ensembles : des indices indiquant la texture, dont le calcul est principalement élaboré à partir des propriétés géométriques des taches, et d'autres relatifs à l'espacement entre taches, où les mesures sont basées sur les pixels (Agujejad et Hubert-Moy, 2016 ; Gustafson, 1998).

Une autre classification, davantage fonctionnelle, des indicateurs métriques proposés par Franklin (1988) et Noss (1990), basée sur la composition et le fonctionnement des systèmes écologiques,

positionne les métriques spatiales autour de trois aspects d'un écosystème : sa composition, sa structure et sa fonction, comme c'est illustré dans la figure qui suit (Figure IV-5).

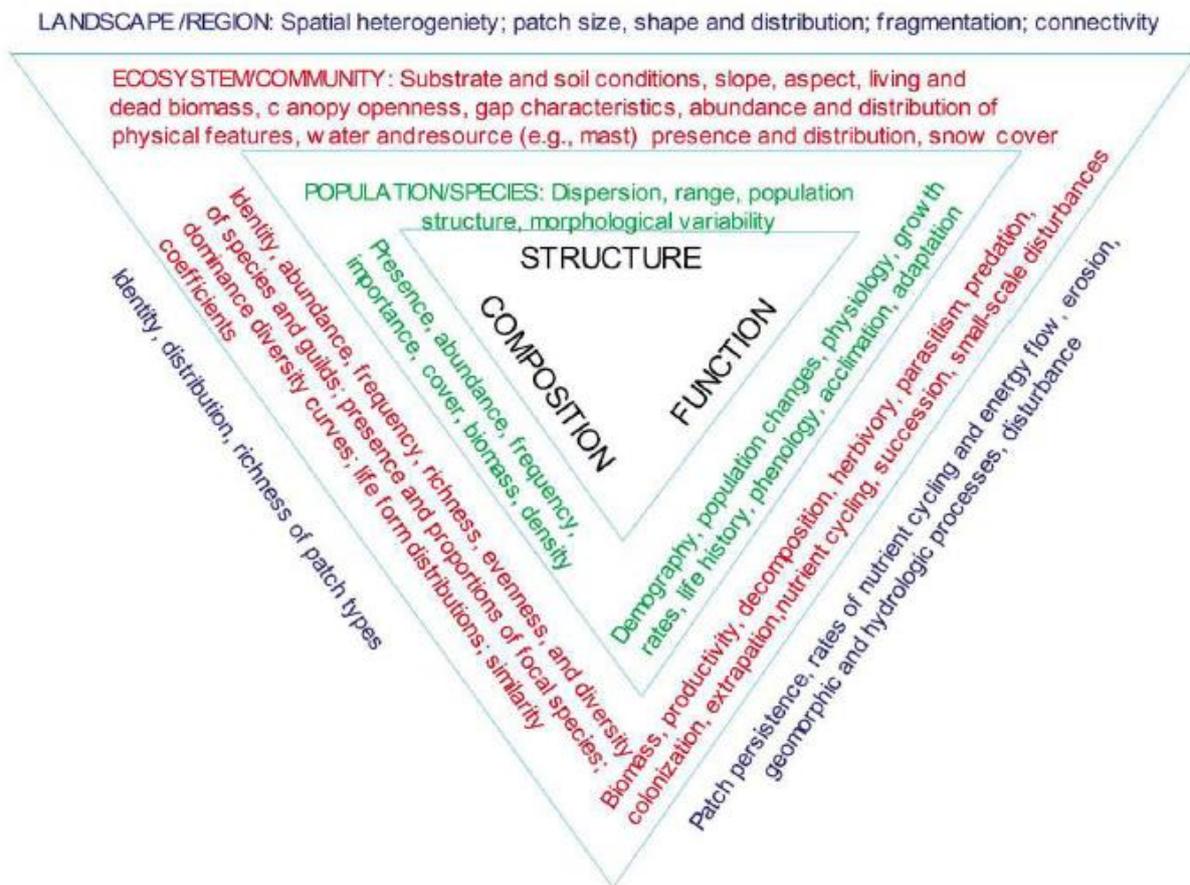


Figure IV-5 : Répartition des métriques spatiales selon les trois aspects : composition, structure et fonction.

Source : (Franklin, 1988 ; Noss, 1990)

IV.3.7. Caractérisation des tendances urbaines : actualisation et prospective de l'urbanisation

Dans une approche de soutenabilité urbaine, la description et la caractérisation des dynamiques sollicitant les paysages urbains et périurbains, notamment l'étalement spatial des agglomérations urbaines, peuvent être effectuées en les confrontant aux métriques paysagères. L'intégration de l'imagerie satellitale et les méthodes d'analyse implantées dans les SIG ont contribué à l'amélioration des méthodes de calcul et la visualisation des résultats, en aidant ainsi à leurs interprétations. À travers ces approches numériques et dans une perspective englobant l'ensemble du territoire, les métriques spatiales permettent d'aboutir à une description des tendances spatiotemporelles caractérisant l'évolution urbaine, de les modéliser et d'établir des prédictions à travers la simulation de scénarii de croissance spatiale et aussi d'en évaluer ses impacts (Herold et al., 2003 ; Parker et al., 2001).

Plusieurs études ont montré l'importance des métriques paysagères pour l'étude des milieux urbains. Ces métriques ont été utilisées pour montrer les rapports existants entre processus économiques et dynamiques d'utilisation du sol (Parker et al., 2001). L'importance des métriques paysagères dans la modélisation urbaine a aussi été prouvée dans plusieurs études. Ces études ont proposé des métriques spécifiques pour modéliser les effets des modèles spatiaux complexes d'occupation et d'utilisation du sol sur les processus sociaux et écologiques (Alberti et Waddell, 2000). Ces métriques permettent, d'une part, une représentation améliorée de l'hétérogénéité des zones urbaines et, d'autre part, l'évaluation de l'impact du développement urbain sur l'environnement immédiat. J. Geoghegan, L.A. Wainger et N.E. Bockstael, (1997) ont utilisé les métriques spatiales pour la modélisation des dynamiques foncières, notamment les valeurs du foncier résidentiel. Leur recommandation consiste à privilégier l'utilisation de ces indices pour décrire ce type de rapports spatiaux.

Les indices métriques ont été utilisés pour la description des structures urbaines et des formes de villes tant dans des approches diachroniques que synchroniques.

IV.3.7.1. À une échelle mondiale

Ce type d'indices a été exploré par Schneider et Woodcock (2008) pour la description et la comparaison des formes de l'étalement urbain sur un corpus de 25 « mégacités », représentant différentes situations géographiques. À travers les métriques paysagères, l'étude a révélé quatre tendances de croissance spatiale : villes à faible croissance spatiale avec densification moins importante (remplissage) ; ville à forte croissance avec un rythme rapide de développement fragmenté ; villes à forte croissance avec forme diffusée (dispersée) et moins dense ; villes à croissance effrénée avec mitage assez important de terres et densité de peuplement aussi élevée. Une autre étude établie par Huang, Lu et Sellers (2007), basées sur les métriques spatiales pour la comparaison des formes de 77 métropoles à l'échelle mondiale. Les indices spatiaux ont amené à conclure que les métropoles des pays en voie de développement sont plus compactes que celles des villes européennes et nord-américaines. Les métriques paysagères ont été ainsi utilisées dans des études comparatives de l'étalement urbain à des échelles nationales (Hamidi et Ewing, 2014 ; Kaza, 2013 ; Michishita et al., 2012 ; Seto et Fragkias, 2005 ; Sun et al., 2015 ; Yeh et Huang, 2009).

IV.3.7.2. À une échelle locale

Celle incluant la ville et sa périphérie, les études mobilisant les indices paysagers sont ainsi nombreuses. Ils ont été utilisés pour décrire l'évolution des structures urbaines et leurs interactions avec l'environnement avoisinant. Une variété d'indices a été appliquée pour :

- mesurer la fragmentation (ou la compacité) des zones urbaines ainsi que leurs impacts sur la biodiversité urbaine (Fan et Myint, 2014 ; Gong et al., 2013 ; Kane et al., 2014 ; Schneider et Woodcock, 2008 ; Shrestha et al., 2012 ; Yeh et Huang, 2009) ;
- mesurer la diversité paysagère et l'effet de l'évolution du bâti sur la richesse écologique au sein des territoires urbanisés (Buyantuyev et Wu, 2012 ; Kong et al., 2007 ; Malkinson et al., 2018 ; McKinney, 2008 ; Sattler et al., 2010 ; Wania et al., 2006 ; Yeh et Huang, 2009) ;
- suivre et comprendre le changement spatiotemporel affectant les paysages urbains et périurbains ainsi que l'évaluation de leurs impacts sur le fonctionnement des écosystèmes avoisinants (Aguilera et al., 2011 ; Hegazy et Kaloop, 2015 ; Herold et al., 2005 ; Ji et al., 2006 ; Kong et al., 2012 ; Liu et Yang, 2015 ; Mosammam et al., 2017 ; Seto et Fragkias, 2005 ; Sudhira et al., 2004 ; Sudhira et Ramachandra, 2007 ; Sun et al., 2013 ; Theobald, 2005 ; Wilson et al., 2003 ; Zhang et al., 2013) ;
- le suivi de l'artificialisation des surfaces naturelles et semi-naturelles et leurs effets dans le recul du potentiel agricole et naturel des territoires anthropisés ainsi que leurs influences dans l'évolution du phénomène de l'îlot de chaleur urbain (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016 ; Connors et al., 2013 ; Estoque et al., 2017 ; Guo et al., 2015 ; Li et al., 2011 ; Long et Leveiller, 2016 ; Skupinski et al., 2009 ; Weng et al., 2007) ;
- l'évaluation des modes de développement urbain dans une optique d'aide à la décision en matière de gestion et planification spatiales (Inkoom et al., 2018 ; Pham et al., 2011 ; Zeng et al., 2015) pour ne citer que ceux-ci.

IV.3.8. Des considérations méthodologiques

Les métriques paysagères ont prouvé leur faisabilité pour l'étude des paysages urbains et périurbains. Néanmoins, la qualité des résultats dépend directement de la qualité des données utilisées et des méthodes de classification effectuées. En effet, les données cartographiques à partir desquelles se base le calcul des métriques paysagères proviennent principalement de l'imagerie satellitale. Leurs qualités et leurs méthodes de production ont une grande influence sur le niveau de précision des résultats. Les problèmes liés aux questions de la qualité et la nature de données cartographiques occupent une place importante dans la littérature portant sur la quantification des paysages et en particulier les paysages urbains, en raison de leurs complexités spatiales. Il est donc important de prendre en considération les questions théoriques et méthodologiques quant à l'élaboration d'un cadre d'analyse concernant l'application de la métrique spatiale sur des données issues de la télédétection spatiale. Ces questions sont généralement en rapport avec les problèmes d'échelle, d'une part, dans le choix et l'analyse des données satellitales correspondantes ainsi que dans

l'application de ces métriques, et d'autre part, quand il s'agit d'une sélection appropriée des métriques elles-mêmes (Herold et al., 2005).

IV.3.8.1. La qualité spatiale des images

La qualité spatiale des images constitue un préalable important dans le calcul des indices métriques dont l'imagerie satellitale en est la source de données. La résolution spatiale des images satellitales influence directement l'hétérogénéité spatiale du paysage, ainsi représenté sur les cartes utilisées. Plus la résolution spatiale est modeste, plus les cartes sont moins détaillées et la distinction des objets, notamment urbains, devient moins nette. L'hétérogénéité spatiale dans ce cas-là tend à être faible aussi bien dans les images que dans les indices métriques (Herold et al., 2005 ; Turner et al., 1989). Le calcul des indices spatiaux est plutôt déterminé par la forme carrée des pixels que par les formes des objets eux-mêmes (Krummel et al., 1987). Dans les milieux urbains, certains détails relatifs à la structure urbaine, comme les rues, peuvent ne pas être distingués ; ce qui peut générer une confusion thématique pouvant conduire à une surestimation de l'homogénéité du paysage étudié. Le recours aux documents complémentaires, notamment relatifs aux éléments linéaires tels que les réseaux, devient nécessaire pour améliorer la qualité cartographique des données d'entrée, qui permet également l'augmentation de la précision des métriques spatiales (Lausch et Menz, 1999). Il importe de noter que le choix de la résolution spatiale des données satellitales dépend de l'information recherchée qui, elle-même, dépend de l'échelle adoptée. Quant à notre étude, le suivi de l'étalement des surfaces urbaines peut se limiter à une échelle globale comme celle de la tache urbaine (entre 1/50000 et 1/20000), dont les zones urbanisées peuvent être visualisées comme taches homogènes. Ainsi, les images satellites à haute résolution spatiale (30 – 10 m) peuvent être maintenues pour ce niveau d'analyse (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016).

IV.3.8.2. La qualité spectrale des images : aspect thématique

Le niveau sémantique de la cartographie d'entrée est défini par les classes d'occupation et d'utilisation des sols, et aussi par le niveau de précision de la classification. La définition des classes thématiques a une influence directe sur la lecture des cartes après confrontation aux métriques spatiales (Barnsley et Barr, 2000). La qualité thématique des données acquises de l'imagerie satellitale est fondamentalement en fonction du contraste spectral entre classes prédéfinies, et aussi de l'aptitude spectrale du capteur satellite. Plus la distance séparant les classes spectrales est faible, plus la précision de distinction des objets spatiaux constituant les classes thématiques est faible. À ce titre, une classification ayant un niveau de précision dépassant 85 % est considérée comme

acceptable pour des documents cartographiques dérivés de l'imagerie satellitale (Anderson, 1976 ; Congalton, 1991).

Une attention particulière doit porter sur la définition des classes thématiques. Elles doivent représenter tous les objets thématiques et les structures existantes dans le paysage ainsi que les autres éléments pouvant présenter un intérêt pour une investigation particulière. Une définition plus globale des classes thématiques peut aboutir à une représentation plus homogène du paysage étudié, ce qui peut induire une négligence d'importantes structures et éléments paysagers dans le calcul des indices métriques. Une surestimation de l'homogénéité du paysage risque donc d'être générée par une cartographie moins précise. Par ailleurs, une classification trop détaillée peut générer un surcroît au niveau de l'hétérogénéité du paysage, d'où la possibilité de perdre les formes et les propriétés spatiales des structures et des objets existants. D'ailleurs, la précision de la classification des données satellitales diminue parfois avec l'augmentation du nombre de classes thématiques (Aguejda et Hubert-Moy, 2016). Par conséquent, pour une définition adéquate des classes thématiques, il est nécessaire de prendre en considération à la fois les aptitudes spectrales du capteur et les exigences de l'étude concernant la précision thématique des cartes employées pour l'exploration des métriques spatiales (Herold et al., 2005).

Quant aux milieux urbains, l'analyse de l'occupation et l'utilisation du sol doit tenir compte au moins les deux majeures catégories d'occupation du sol : les surfaces urbanisées incluant le bâti et le réseau du transport, et les surfaces non urbanisées telles que la végétation, les sols nus, les plans d'eau, etc. Un perfectionnement de la classification, d'où la nette discrimination des surfaces urbanisée et les autres types d'occupation du sol, peut être avantageux pour une analyse de la configuration spatiale, mais avec la prise en compte de la séparabilité spectrale des catégories d'occupation du sol des cartes ainsi que les caractéristiques définissant leurs qualités thématiques (Herold et al., 2005, 2002). D'une façon générale, le niveau de détail définissant la qualité thématique de la cartographie d'entrée doit se rapporter aux finalités recherchées par l'utilisateur avec une nomenclature assez propre. À ce propos, Aguejda (2009) a mentionné qu'« *une nomenclature simplifiée a tendance à négliger certains éléments du paysage et conduit à sous-estimer son niveau de diversité et son degré de fragmentation, tandis qu'un processus de généralisation impliquant une simplification de la nomenclature provoque une perte d'information thématique. ... C'est pour cette raison qu'il ne suffit pas de simplifier les données de départ mais il est nécessaire de mettre en valeur les détails importants et d'éliminer les détails non significatifs, en fonction de l'utilisation finale de la carte* ».

IV.3.9. Sélection des métriques

Plusieurs approches traitant la quantification spatiale des paysages ont abouti au développement d'une variété d'indices paysagers, comme étant des mesures statistiques descriptives des structures et des configurations spatiales (Herold et al., 2005). D'une règle générale, les indices les plus couramment employés peuvent inclure ceux qui se rapportent aux formes et aux tailles des taches, à leurs nombres et à leurs densités, à leur dominance, à la longueur et à la densité des bordures, à la distance qui sépare les taches (particulièrement le plus proche voisin), à la dimension fractale, à la contagion, à la lacunaire, etc. (McGarigal et al., 2012).

Avant de passer à toute sorte d'application, ces métriques doivent être interprétées, analysées et évaluées par rapport à leurs capacités de révéler l'information thématique recherchée (Gustafson, 1998). En ce qui concerne les milieux urbains, plusieurs études ont employé et suggéré diverses typologies de métriques paysagères. Une grande variété d'indices spatiaux a été examinée, mise en comparaison et aussi recommandée dans les études de Geoghegan et al. (1997), Alberti et Waddell (2000), Parker et al. (2001), et Herold et al. (2003). Leurs résultats ont montré le rôle que peut jouer chacun de ces indices pour la représentation de la composition et de la configuration, ainsi que la qualification du voisinage que présente le paysage urbain. Il est admis qu'il n'existe pas, jusqu'à nos jours, de jeu standard parfaitement adapté aux territoires urbains, compte tenu de la complexité des paysages urbains ainsi que la grande diversité des contextes des études. La signification de métriques spécifiques varie en fonction des objectifs recherchés et des caractéristiques des paysages étudiés (McGarigal et al., 2012 ; Parker et al., 2001).

IV.3.9.1. Définition de l'échelle spatiale et du domaine d'étude

La définition du domaine spatial d'étude est un problème fondamental souvent posé dans l'application des métriques spatiales. Il s'agit d'une question de discrimination des entités spatiales quant au calcul des indices. De façon générale, les métriques permettent de caractériser les formes et les structures d'une tache individuelle en tant que zone spatialement et thématiquement consistante, représentant une composante élémentaire du paysage. À un autre niveau d'analyse, les métriques peuvent également décrire les propriétés spatiales des classes d'occupation des sols à travers, entre autres, des calculs de sommation ou des moyennes des valeurs des taches individuelles appartenant à la même classe d'occupation du sol. À un niveau global, d'autres indices permettent d'illustrer les propriétés de l'ensemble du paysage ou du domaine spatial de l'étude comme le degré de contagion, l'agrégation, la diversité, etc. (McGarigal et al., 2012). La définition du domaine spatial d'étude est donc primordiale en raison de son influence directe sur le comportement et la pertinence des métriques spatiales (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016 ; Herold et al., 2005). Dans certaines études, le

domaine spatial se trouve déterminé par l'étendue géographique de la zone d'étude. Dans d'autres études, particulièrement les analyses comparatives des configurations interurbaines, il est nécessaire de décomposer le territoire urbain en unités relativement homogènes qui surviveront par la suite comme des domaines spatiaux d'investigation à examiner par les métriques spatiales.

Compte tenu du caractère digital du support cartographique, la définition spatiale et thématique du niveau de discrimination des entités spatiales doit prendre en considération des caractéristiques du paysage étudié, des objectifs de l'investigation et des exigences des métriques à utiliser qui peuvent nécessiter des subdivisions spatiales spécifiques de la zone urbaine. Il existe différentes manières pour la définition des territoires urbains, soit à partir des limites administratives, soit de l'imagerie satellitale ou de l'analyse cartographique. Une autre méthode aussi courante, utilisant les subdivisions basées sur les gris réguliers, comme celles utilisées dans plusieurs modèles urbains (Landis et Zhang, 1998 ; Pinjanowski et al., 1997). Un autre concept similaire employé dans la télédétection spatiale est celui de la fenêtre quadratique qui est couramment utilisé pour l'étude des formes dans le voisinage des pixels. Ce voisinage est déterminé par la taille du grain (*Kernel*) mobile avec dérivation statistique de ses caractéristiques spectrales et thématiques (Herold et al., 2005).

La question de la délimitation spatiale des aires d'études a été évoquée par plusieurs auteurs. Barnsley et Barr (2000) ont discuté plusieurs problèmes relatifs à la délimitation à travers l'identification des grains (*Kernel*) dans les milieux urbains. Les deux principales approches, celle basée sur les gris quadratiques et celle basée sur les régions géographiques, sont notamment mises en évidence. La première approche est davantage orientée vers le lissage des lisières discrètes entre parcelles d'occupation et d'utilisation du sol, ce qui peut affecter la forme réelle des parcelles. Il est donc délicat d'avoir *à priori* une définition optimale de la taille du fragment ou de la fenêtre rectangulaire représentant un secteur artificialisé qui ne se confonde pas avec la forme réelle de la parcelle ou de l'unité spatiale utilisée, qui, elle-même, tend à avoir des formes et des bordures irrégulières. Par contre, la deuxième approche, basée sur les régions géographiques, permet la caractérisation thématique et fonctionnelle définissant les aires d'études, dont les formes tendent beaucoup plus vers l'irrégularité (Barnsley et Barr, 2000 ; Barr et Barnsley, 1997 ; Gong et al., 1992).

IV.3.9.2. Les niveaux d'analyse

Le niveau de l'analyse se rapporte à l'échelle et/ou la cible de l'investigation. De façon générale, l'analyse du paysage, particulièrement basé sur les supports cartographiques, peut s'effectuer sur trois niveaux d'analyse représentant essentiellement les différentes perspectives dans lesquelles se sont inscrites les différentes analyses des modèles spatiaux des paysages, et qui ont des implications

importantes sur le choix et l'interprétation des métriques individuelles ainsi que la qualité des résultats : « *It is incumbent upon the investigator or manager to choose the appropriate scope of analysis for the question under consideration and then choose appropriate landscape metrics that reflect this scope of analysis* » (McGarigal et al., 2012).

IV.3.9.2.a. Au niveau de la tache individuelle

Les taches constituant la mosaïque du paysage seront analysées individuellement sans tenir compte de l'ensemble de l'unité paysagère. L'investigation se limite spécifiquement à la description des caractéristiques spatiales de la tache ciblée. À ce niveau, chaque tache concernée sera caractérisée à travers des métriques propres à ce niveau d'analyse (*patch-level metrics*).

IV.3.9.2.b. La structure locale du voisinage

Dans plusieurs applications, les processus écologiques sont appréhendés à travers les rapports de voisinages établis entre taches et entre classes d'occupation et d'utilisation du sol, et qui caractérisent en même temps la répartition spatiale de différents types d'habitat dans un paysage donné.

IV.3.9.2.c. La structure globale du paysage

L'analyse à ce niveau portera sur l'ensemble de l'unité paysagère. L'organisation des différents fragments ou classes d'occupation et d'utilisation du sol sera examinée à travers des indices globaux décrivant la structure et la configuration globale du paysage. Les indices d'agrégation, de diversité et de richesse sont parmi les mesures les plus courantes à ce niveau de description.

L'application traditionnelle des métriques paysagères implique la prise en compte de l'ensemble du paysage avec un ou plusieurs indicateurs.

IV.3.9.3. Les niveaux d'hétérogénéité

Le paysage dans sa représentation cartographique est fondamentalement constitué d'unités élémentaires qui sont les taches. Selon la méthode suivie pour l'extraction des taches, celles-ci peuvent être spatialement caractérisées en termes de variables dérivées des données extraites. Ces mesures peuvent inclure des moyennes ou des maximums de valeurs et d'intervalles d'hétérogénéité interne comme la variance et l'étendue. Mais, dans la plupart des applications, une fois les taches sont définies, leur hétérogénéité interne sera négligée. À ce stade, une valeur numérique de classe nominale sera attribuée pour pouvoir être représentée dans la composition de la mosaïque paysagère. Les descripteurs métriques du paysage se focalisent sur le caractère spatial des taches ainsi que leurs distributions dans le voisinage de chaque cellule ou sur l'ensemble de l'entité paysagère. Tandis que les taches possèdent individuellement quelques propriétés spatiales fondamentales (taille, périmètre,

et forme), les ensembles de taches peuvent avoir différentes formes et niveaux d'agrégation. Le niveau d'agrégation des taches peut se rapporter soit à une ou plusieurs classes, soit à une partie bien délimitée du paysage (sous-région) ou à la totalité du paysage. Quatre niveaux de métriques spatiales peuvent être donc définis, en rapport avec la logique hiérarchique d'organisation et d'hétérogénéité spatiale de la mosaïque des taches (McGarigal et al., 2012).

IV.3.9.3.a. Le niveau des taches

Les métriques de taches (*patch metrics*) sont conçues spécifiquement pour les taches individuelles. Leurs finalités est de décrire la forme et le contexte spatial des taches. Dans la majorité des applications, les métriques de taches servent comme base de calcul pour plusieurs indicateurs spatiaux, par exemple pour établir des moyennes des attributs de l'ensemble des taches appartenant à une classe définie ou à l'ensemble du paysage. Les indices de taches peuvent être importants et instructifs dans les investigations couvrant l'ensemble du paysage (à un niveau global). À ce niveau d'analyse, il est utile de caractériser les différentes taches constituant un paysage : leurs tailles, leurs formes, leurs bordures et leurs densités, le voisinage et le degré de contraste entre la tache et son voisinage, ainsi que les propriétés surfaciques des noyaux (Kareiva, 1990 ; Robbins et al., 1989 ; Temple, 1986). Ses propriétés spatiales sont assez déterminantes pour l'épanouissement de la biodiversité ; leur connaissance est essentielle pour la préservation des conditions d'équilibre des écosystèmes urbains. L'utilité de cette sorte d'information dépend des objectifs de l'investigation (McGarigal et al., 2012).

IV.3.9.3.b. Le niveau des classes

Les descripteurs métriques de classes (*class metrics*) intègrent la totalité de taches appartenant à la même catégorie d'occupation du sol. Il s'agit d'une caractérisation spatiale d'une classe ou d'un ensemble de classes d'occupation du sol constituant le paysage. Les indices relatifs aux classes reflètent des valeurs moyennes ou des pondérations calculées selon un système approprié, qui permet ainsi la mise en valeur des apports des plus grandes taches dans le comportement de ces métriques globales. En général, l'utilité principale des métriques de ce niveau est la quantification et la répartition d'un type particulier de fragments. Au ce niveau aussi, des propriétés additionnelles d'agrégat peuvent être examinées, et qui dépendent directement de l'unique configuration des taches à travers le paysage. Un exemple expressif est celui de l'étude de la fragmentation de l'habitat qui correspond à un processus s'opérant au niveau du paysage d'où chaque habitat contigu est soumis à un morcellement progressif ; le résultat, sous l'effet de facteurs naturels et humains, est plusieurs habitats avec tailles plus petites, plus isolées et ayant des formes plus complexes (McGarigal et

McComb, 1995). Les métriques de classes quantifient séparément la quantité et la configuration spatiale de chaque type de taches pour exécuter par la suite des calculs de moyennes. En effet, ces indices présentent un moyen permettant la mesure du degré de fragmentation caractérisant chaque classe d'occupation et d'utilisation du sol.

IV.3.9.3.c. Le niveau du paysage

Les métriques spatiales du paysage (*landscape metrics*) concernent toutes les taches ou les classes constituant le paysage. Le calcul intègre la totalité de l'étendue de la zone étudiée. À l'image des métriques de classes, les indices du paysage peuvent être dérivés par le calcul des moyennes ou des intervalles de valeurs. Elles peuvent renseigner sur les propriétés agrégées de la mosaïque des taches. L'intérêt s'attache principalement au modèle spatial incluant la composition et la configuration. Étant donné que l'écologie du paysage est essentiellement focalisée sur la quantification des relations entre processus écologiques et structure du paysage, l'accent est davantage mis sur le développement de méthodes de quantification des structures et des formes des paysages (Li et Reynolds, 1995 ; O'Neill et al., 1988 ; Turner, 1990 ; Turner et Gardner, 1991). Un large éventail de métriques se rapportant à l'ensemble du paysage a été formulé pour cette finalité.

Il importe de noter que malgré que de nombreuses métriques puissent avoir des équivalences à plusieurs niveaux, leurs interprétations peuvent être différentes : les métriques des cellules représentent le contexte spatial caractérisant le voisinage local de chaque cellule (pixel), les métriques des taches reflètent le caractère et le contexte spatial de chaque tache individuelle, les métriques de classes indiquent la quantité et la distribution des taches d'une classe donnée, et au final, les indices du paysage concernent la forme de l'ensemble du paysage, et qui sont généralement interprétés comme des indices d'hétérogénéité (McGarigal et al., 2012).

Conclusion

L'acquisition de l'information sur l'évolution des surfaces bâties ainsi que et l'analyse des transformations spatiotemporelles accompagnantes constituent une étape essentielle pour mettre en œuvre une planification spatiale stratégique plus équilibrée, notamment en matière de préservation de l'environnement. L'avancée enregistrée dans la télédétection urbaine et des SIG a conduit au développement des outils méthodologiques permettant l'actualisation et l'évaluation de la croissance rapide des surfaces urbanisées.

La détection du changement (DC) est l'une des principales approches découlant de la combinaison de la télédétection spatiale et des SIG. Cette démarche permet de mettre en valeur le changement spatiotemporel affectant les paysages, à travers la comparaison d'une série de scènes multidates. La comparaison post-classification est l'une des méthodes les plus répandues dans la détection du changement. Elle consiste à localiser et visualiser les surfaces converties par les dynamiques de croissance spatiale. Cette méthode a comme finalité l'élaboration d'une cartographie de changement avec rapport descriptif. La qualité des résultats dépend directement du choix des images satellites et des méthodes de traitement et de classification de ces images. La prise en compte des conditions phénologiques et atmosphériques est primordiale dans le choix des scènes satellitaires, ce qui implique une opération de prétraitement et de normalisation afin de les rendre plus homogènes et aptes à l'analyse comparative. Une opération d'évaluation de la précision de la classification est ainsi nécessaire pour pouvoir passer à la comparaison post-classification.

La vision écologique de développement urbain implique la quantification et l'évaluation des formes d'urbanisation. Les métriques spatiales se manifestent comme un moyen efficace permettant la mesure et la caractérisation spatiales des paysages. Les modifications induites par les extensions urbaines en altérant les structures paysagères peuvent être mises en valeur en les confrontant aux métriques spatiales. Différents niveaux d'analyse peuvent être abordés à travers les métriques spatiales. Les métriques de taches se focalisent sur la description morphologiquement des taches prises individuellement. Les métriques de classe consistent à caractériser l'organisation des taches appartenant à la même classe UOS. Les métriques de paysage sont des indices synthétiques servant à décrire et à caractériser la composition et la structure de l'ensemble de la mosaïque paysagère. En effet, l'application des métriques spatiales dans l'aménagement et la planification spatiale aide à l'analyse et à l'évaluation des différentes solutions d'aménagement urbain, et aide aussi à l'élaboration de meilleures décisions en matière de gestion de l'espace.

PARTIE ANALYTIQUE

Chapitre V. Le Sahara algérien : un environnement désertique, mais support de potentialité stratégique

Introduction

Étudier les dynamiques de croissance spatiale des oasis du Bas-Sahara ainsi que les transformations accompagnantes nécessite la prise en compte des particularités territoriales caractérisant notre contexte non seulement à l'échelle du Bas-Sahara, mais elle doit mettre en articulation l'approche nationale du Sud algérien et l'approche la plus globale incluant l'ensemble du Grand Sahara. La mise en avant des spécificités territoriales permet de contextualiser l'urbanisation accélérée qui s'opère sur ces régions contraignantes et d'appréhender les défis et les enjeux que confrontent les villes sahariennes : « *Comprendre l'espace saharien, et les territoires qui le composent, s'est tout d'abord s'interroger sur les spécificités marquantes du support physique qui ont déterminé historiquement la structuration du peuplement et les pratiques sociospatiales des populations* » (Kouzmine, 2012). Ces préalables considérations sont dues au caractère paradoxal que présentent le Sahara, et plus globalement les territoires désertiques dans le monde (Côte, 2005). Si le Sahara est perçu comme l'un des milieux les plus hostiles à la vie humaine dans le monde, il a néanmoins été génialement habité et approprié par les populations pendant longtemps (Capot-Rey, 1953 ; Fontaine, 2005).

Ce chapitre sera consacré à la présentation du contexte physique et environnemental caractérisant notre corpus d'étude qui est le Bas-Sahara algérien. Dans une logique interscalaire, nous essayerons de commencer avec une lecture globale du Sahara algérien. Les structures urbaines et oasiennes, leurs particularités environnementales, historiques et socioéconomiques seront par la suite recherchées dans la perspective de pouvoir cerner les spécificités à prendre en considération dans l'analyse des formes d'urbanisation caractérisant les grandes villes du Bas-Sahara algérien ainsi que leurs impacts sur les écosystèmes oasiens.

V.1. Le grand Sahara : cadre physique et structurel

Avec la confusion qui survient souvent entre Sahara et désert, l'image du Sahara réputée dans les imaginaires à travers des notes et des photographies transcrites par les touristes est celle d'un désert vide et extraordinairement vaste, plein de dunes de sable, difficile à franchir, un terrain mythique, laissé qu'aux voyageurs aventuriers. Un désert habité et parcouru n'est apprécié qu'après sa colonisation par les militaires européens. Le Sahara a été décrit la première fois par les géographes et voyageurs arabes comme El-Bekri au XI^e siècle, El-Idrissi au XII^e siècle et Ibn Khaldoun au XIV^e (Bisson, 2003).

V.1.1. Entre Sahara et désert : précision étymologique

Le terme « Sahara » qui, sur le plan étymologique, correspond à la couleur fauve ou rougeâtre est un qualificatif qui renvoie à une terre vaste, non cultivée et dépourvue des sources d'eau. Pour Daumas (1845), plusieurs termes peuvent correspondre aux espaces désertiques et qui n'ont pas forcément le caractère d'immensité : « *Quoi qu'il en soit, le mot Sahara n'entraîne point nécessairement l'idée d'une immensité déserte. Habité sur certains points, il s'appelle Fiafi habitable sur certaines autres, il prend le nom de Kifar, mot dont la signification est la même que celle du mot vulgaire Khela, abandonné ; inhabité et inhabitable sur d'autres encore, on le nomme Falat* » (Daumas, 1845).

Plus tard, le « territoire aride et peu habité » a pris le qualificatif « désert » (Kouzmine, 2012). Actuellement, l'appellation « Sahara » correspond à la bande méridionale infertile qui, en traversant le continent africain, s'étend du Nil à l'océan (Bernard, 1937)²¹. La dénomination « Blad es Sahra » qui correspond à ces lieux dans les anciennes cartes ne porte pas des délimitations précises (Bisson, 2003).

V.2. Le Grand Sahara : une approche géographique

Le Sahara se rapporte donc au territoire désertique qui s'étend de l'Atlantique à la mer Rouge et de la Méditerranée aux Savanes et forêts claires des régions tropicales (figure V-1). Un milieu distingué par rapport aux autres milieux désertiques du monde par son hyperaridité climatique, et constitué principalement de vastes étendues de plaines et de plateaux (Côte, 2005 ; Lacoste, 2011). Il occupe la moitié occidentale de la grande écharpe aride s'étalant sur les deux continents de l'Ancien Monde, du Sahara occidental au grand Murail de la Chine (Lacoste, 1986). Avec cette acception, ce territoire recouvre près de 8,5 millions km² de superficie, plus du quart du continent africain, et près de 15 millions d'habitants sahariens sans compter la population de la vallée du Nil (Côte, 2014 ; Kouzmine, 2012).

²¹ Cité in (Kouzmine, 2012)



Figure V-1 : Le Sahara vu du ciel à travers le satellite.

Source : TerraIncognita Imagerie

V.2.1. Un « bouclier » désertique à enjeux géopolitiques

L'indépendance des pays partageant le Grand Sahara a fait de ceci un territoire compartimenté, il n'est plus considéré comme entité autonome et uniforme. Cette nouvelle situation politique est néanmoins marquée par l'intégration des secteurs libres réservés exclusivement aux populations nomades censées généralement libres et disjointes des autorités centrales (Vernochet, 1985). Une dizaine d'états riverains partagent actuellement le Sahara à la suite du découpage colonial hérité. Les pays constituant la frange nord sont : Le Maroc, l'Algérie, la Tunisie, la Lybie et l'Égypte ; sur la frange sud, on trouve le territoire contesté du Sahara occidental, La Mauritanie, Le Niger, le Mali, Le Tchad et le Soudan.

V.2.2. Une variété paysagère et ethnique

Si le Grand Sahara est considéré dans sa globalité, notamment à l'époque coloniale, comme « bouclier » homogène, une variété paysagère et ethnique existe dans sa vision régionale. La classification géographique, basée principalement sur des considérations climatiques, débouche sur des régions distinguées principalement par les systèmes d'élevage, les systèmes d'irrigation, ou la dominance ethnique de l'espace. Cette diversité des milieux est à l'origine de la variété des modes d'appropriation de l'espace. Les communautés habitantes se comportent différemment, chacune d'elles marque son identité et son génie pour faire face aux contraintes imposées par la terre et le

climat (Grivot et al., 1978). L'aridité du milieu naturel conditionne la présence de l'homme sur un espace difficilement maîtrisable et donc « appropriable » (Pons, 1997).

De par sa position géographique, sa spécificité climatique et des ressources qu'il enferme, le Grand Sahara est considéré d'une part, comme parcours d'élevage, zone d'exploitation minière et d'hydrocarbures, parcours de transition commerciale, donc zone de contact et d'échange ; d'autre part, un terrain de conflit et tension politico-ethnique, tantôt locale ou tribale, tantôt régionale ou internationales : « *De nos jours, cette bande méridionale présente de véritables dynamiques dépassant la fonction de liaison Sud-Nord, elle est un territoire de conflits* » (Côte, 2014).

V.2.3. Aspects géomorphologiques

Le Sahara est le plus grand et le plus aride désert du monde. Il s'étend de l'ouest à l'est sur 4500 km depuis l'Atlantique jusqu'à l'Afrique du Nil et le Soudan égyptien, soit un intervalle de 50° de longitude. Le Tropique du Cancer le coupe en son milieu au 23° 27' de latitude Nord, et il s'étend aussi à environ 10 degrés de part et d'autre du Tropique. Il s'agit de déserts, jalonnés d'oasis, parcourus depuis des siècles par des pasteurs nomades caravaniers (Lacoste, 1986).

Le Grand Sahara est une très vaste dépression constituée principalement de larges « Hamadas » : domaines sédimentaires en alluvion caillouteuse, des « Ergs » : étendues ondulées remplies de dunes de sable, ainsi que de rudes massifs montagneux qui jaillissent au travers et en éparpillement : l'Adrar mauritanien, l'Aïr, le Hoggar et le Tibesti. Ces vastes espaces sont quasiment vides et donnent l'impression que la vie n'est qu'exceptionnelle grâce à la présence de quelques unités vertes, les oasis, qui jalonnent ce paysage désertique et furent le berceau historique du peuplement saharien (Chevalier, 1953 ; Côte, 2012).

D'un point de vue géologique, Dresch (1939) qualifie le Sahara comme un « bouclier » relativement stable depuis très longtemps. Structurellement, la plateforme saharienne est caractérisée par une tectonique moins prononcée, à l'opposé de l'Alpine du Nord algérien. Elle comporte un socle de formation précambrienne recouvert par un substratum antécambrien constitué en discordance par des séries successives de couches sédimentaires, primitivement structurée en plusieurs Bassins discriminés par zones plus au moins surélevées (Askri et al., 1995 ; Chehema, 2011). Cet aspect sédimentaire particulier a offert la possibilité à la formation d'immenses nappes riches en réserves hydriques et hydrocarbures : « *Cette organisation simple reflète la structure d'une plateforme précambrienne rigide, surmontée de couches sédimentaires souvent gréseuses, détritiques, parfois calcaires. Dans les dépressions, les épaisses séries sédimentaires n'ont guère été dérangées, ce sont elles qui contiennent les impressionnantes réserves d'hydrocarbures et les puissants aquifères souvent artésiens qui font la richesse du Sahara* » (J.-C. Brûlé et Fontaine, 1988).

V.2.4. Une immense platitude privée d'écoulement

Le Sahara est ainsi un vieux bouclier très stable par le fait que les plissements postérieurs des plissements antécambriens ont été doux, et qu'ils se sont moulés les uns sur les autres. Ils ont depuis lors individualisé dès le Primaire des massifs centraux isolés par des cuvettes. Ces massifs pénéplanés ont des altitudes moyennement peu élevées à l'exception des appareils éruptifs tertiaires qui constituent de hautes montagnes, au demeurant peu étendues (Ahaggar-Tibesti : 3 000 à 3 400 mètres). Le bouclier se continue vers le sud, et n'est bordé par aucune chaîne récente élevée sauf au nord-ouest, celle de l'Atlas marocain. Il s'agit donc d'un pays plat dont les altitudes sont généralement inférieures à 1000 mètres (figure V-2). Au sein de ces conditions, l'hydrographie ne peut être qu'endoréique, même pour les grands oueds qui descendent cependant des hauts massifs notamment de l'Ahaggar et du Haut Atlas marocain. Ces oueds n'ont nullement atteint la mer à l'exception du Dra, à la suite de captures, comme le Niger. La rivière du Nil, qui vient des régions équatoriales, est l'unique oued qui parvient à atteindre la méditerranéenne en traversant le désert (Dresch, 1939).



Figure V-2 : La topographie du Sahara.

Source : (Dresch, 1939)

Il est évident que le processus morphogénique des paysages sahariens est nettement influencé par les agents atmosphériques qu'a particulièrement subis le désert, ainsi que l'extrême aridité qui le

distingue. Le vannage éolien, l'érosion, l'ensablement ainsi bien que d'autres agents en demeurent depuis longtemps responsables : « *Si l'aridité définit le désert, on imaginera aisément que les formes porteront témoignage des agents ayant provoqué leur genèses* » (Monod, 1992).

V.2.5. Relief

D'une règle générale, le relief saharien se caractérise pratiquement par une clarté des formes et une nette visibilité de ses limites (Chehema, 2011). La platitude et l'uniformité topographique sont relativement une caractéristique générale différenciant le Sahara à l'encontre de la complexité et la fragmentation géomorphologique marquant les régions du Nord algérien (Troin et al., 2006). Les altitudes moyennes sont de l'ordre de 300 m, exceptant les deux remarquables et opposantes extrémités : en aval, la dépression du Bas Sahara qui descend jusqu'au -40 m d'altitude (dans le chott Melrhir) ; en amont, le massif du Hoggar qui atteint monts du Tahat des altitudes dépassant les 2918m (Kouzmine, 2012).

À l'exception du massif du Hoggar, le paysage saharien est globalement dominé par une organisation simple en vastes domaines dunaires, d'immenses plateaux bornant entre eux de larges cuvettes. D'une manière synthétique, les principales entités composant le Sahara sont (Chehema, 2011 ; Dresch, 1939) :

V.2.5.1. Les Hamadas

Plateaux rocaillieux, souvent en calcaires continentaux, en croutes (le cas du Hamada de Tindouf et de Tanezrouft), ou en calcaires lacustres crétaqués. La topographie est pratiquement monotone dominé par l'horizontalité (figure V-3).



Figure V-3 : Hamada (Sahara algérien).

Source : www.futura-sciences.com

V.2.5.2. Les Regs

Vastes plaines sédimentaires en alluvion caillouteuse, balayées par vannages éoliens²². Les surfaces sont généralement couvertes d'agrégats rocheux et de gravier roulé, avec tailles et formes diversifiées, mêlées de limons ou d'argiles²³. Les Ergs occupent la grande partie du Sahara avec plus de 70 % de couverture.



Figure V-4 : Reg (Sahara algérien)

Source : www.futura-sciences.com

V.2.5.3. Les Ergs

Domaines ondulés pleins de dunes de sable (Monod, 1992). Les formes de ces immenses entités, mouvantes et spécifiques aux paysages sahariens, sont principalement déterminées en fonction des directions des vents dominants. Trois principaux Ergs occupent de considérables superficies au Sahara algérien : le Grand Erg occidental, le Grand Erg oriental et le massif dunaire composé de l'*Erg* Iguidi et de l'*Erg* Chech (Kouzmine, 2012).

La surface occupée par les *Ergs* est en effet moins de 20 % de la surface totale du Sahara, à l'encontre de la représentation généralisée depuis longtemps dans les imaginaires qui fait de l'*Erg* le paysage emblématique dominant le Sahara (Bisson, 2003).

²² www.futura-sciences.com

²³ www.naturevivante.org (« Le reg », s. d.)



(1) Grand *Erg* oriental



(2) Grand *Erg* occidental

Figure V-5 : Les Ergs du Sahara algérien

Source : (1) Wikipédia.org, (2) d'après (Roux, 1991)

V.2.5.4. Les Bassins fermés

Avec une hydrographie endoréique, les dorsales et les pédiments débauchent vers le bas-fond sur des cuvettes plus au moins étendues. Ces dépressions sont topographiquement bornées pour former des bassins isolés dont le centre est souvent étincelé du sel. Ces « bas-pays » (Monod, 1992) contiennent des régions alluviales relativement humides au sein desquelles la vie végétale et humaine est étroitement liée à la qualité de l'eau qui y circule. Dans le cas d'une eau douce, ces régions se trouvent viables et favorables à l'épanouissement d'une biodiversité locale : c'est le cas des *Mâdar*, *Grara* et des *Daya* au nord du Sahara. En revanche, ce sont les *Sebkh*a et les *Chott* revêtus d'efflorescences salines qui se manifestent dans le cas contraire (Chehema, 2011).

V.2.5.5. Les lits d'oued

Les oueds, auparavant des rivières en permanents écoulements, concentrent depuis notre ère l'essentiel de la biodiversité saharienne. De par la présence de ressources en eau, des îlots de verdure jalonnent paradoxalement au sein de ces dépressions hyperarides. Il s'agit des oasis, les lieux restreints de vie où l'homme a pu maintenir sa subsistance pendant longtemps, et a su s'adapter parfaitement avec le milieu contraignant en le rendant vital et assez franchi.

Le long des lits de ces oueds se sont développées des dynamiques territoriales, donnant essor aux pays-oasis comme berceaux de civilisations ancestrales structurées par des oasis dont chacune d'elles constitue à la fois une entité spatiale autonome et un nœud de contact et d'échange caravanier. À travers ces relais, le grand désert a eu la faveur d'être parcouru pendant longtemps, reliant ses lointaines rives en y intertransportant des biens et des richesses (Côte, 2012).

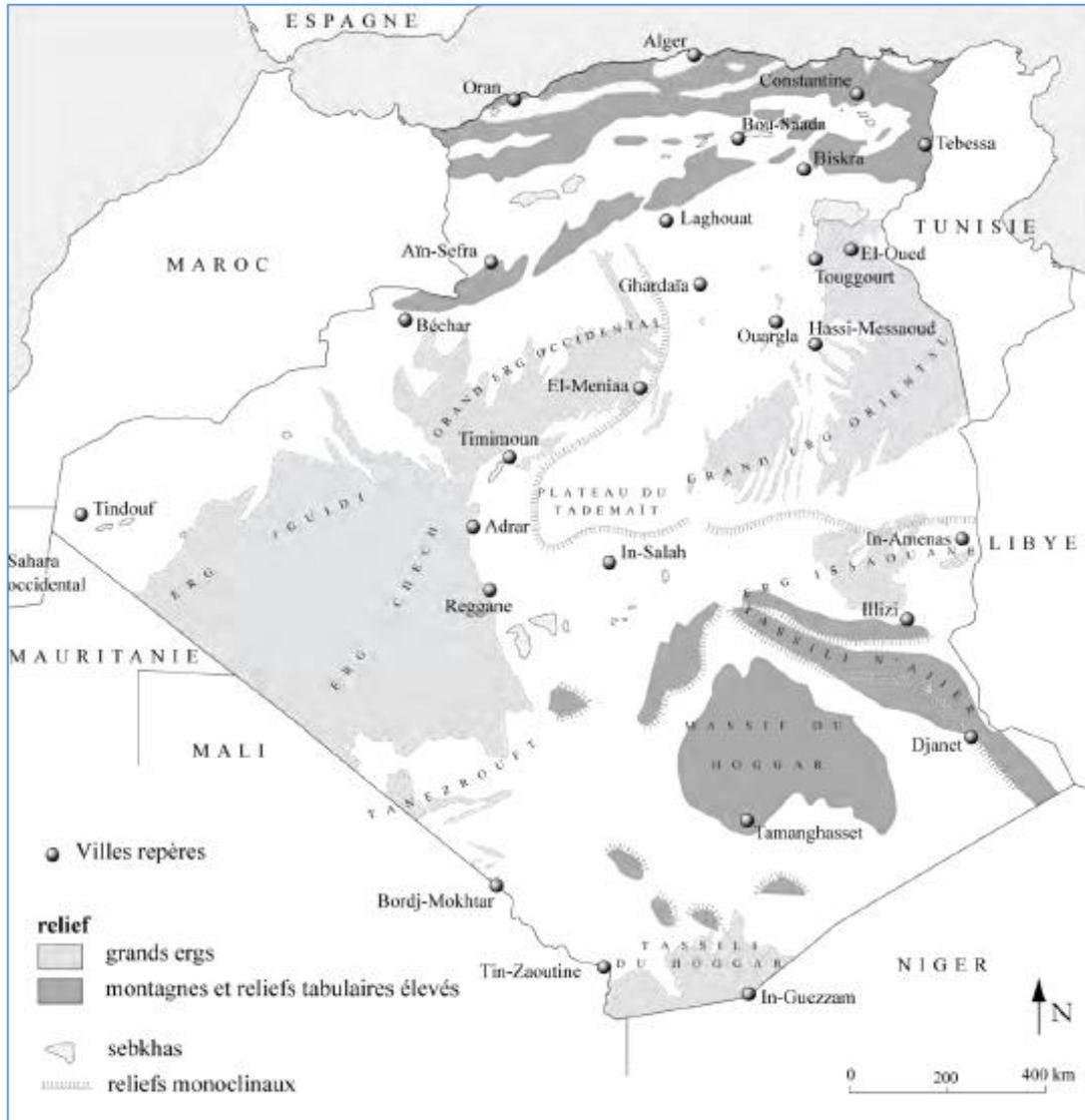


Figure V-6 : Les grandes entités paysagères du Sahara algérien

Source : d'après (Kouzmine, 2012)

Les terres arides, qui reçoivent moins de 100 à 150 mm de précipitations annuelles, occupent près de 95 % du territoire algérien, dont 80 % constituant le grand Sud. Le climat et la géomorphologie rendent ces régions fragiles avec des écosystèmes sensibles et vulnérables aux effets de dégradation (Halitim, 2011). Dans ce contexte de sécheresse et d'immensité d'étendues des territoires, les populations sahariennes, faisant preuve du génie oasien et des efforts dispensés pour se subsister dans ces régions assez contraignantes, ont su développer des systèmes d'irrigation parfaitement adaptés aux conditions hydrographiques bien particulières (Kassah, 1998). Une diversité de modèles originaux, présentant des techniques propres à chaque pays selon la nature hydrologique et paysagère, a été recensée : les foggaras, les puits artésiens et peu profonds, les rivières, les sources aux pieds des montagnes, nappes phréatiques, etc. (Dubost, 1992 ; Toutain, 1979).

V.3. Le Sahara algérien : d'un territoire mis à l'écart à un territoire stratégique

Si le Sahara algérien a été pendant longtemps censé être défavorable au développement humain de par ses contraintes géographiques et climatiques, il n'en est plus depuis la découverte des gisements pétroliers aux cours des années cinquante : « *Il faut rappeler la structure générale de l'Afrique septentrionale, en vaste synéclises reposant sur le bouclier africain. Chacune d'entre elles constitue un piège possible pour l'accumulation de pétrole, de gaz ou d'eau.* » (Côte, 1998a). Ces découvertes ont complètement balancé le statut du Sahara. En effet, le potentiel hydraulique et fossile a rendu le Sud algérien un territoire stratégique riche en ressources naturelles sur lesquelles s'appuie l'économie nationale en constituant sa principale force motrice.

V.3.1. Les capacités hydrauliques

Contrairement aux couches superficielles dépourvues des ruissellements, le sous-sol du Sahara algérien renferme d'immenses réserves d'eau. La chaîne de prospection géophysique entamée depuis le début du XXe siècle au Sahara algérien à la quête des gisements pétroliers a accidentellement abouti à la découverte de grandes « mères » souterraines, estimées parmi les plus importantes dans le monde. La logique morphogénétique de l'évolution lithologique au-dessus de la plateforme saharienne, interpénétrant couches perméables et imperméables, a permis la formation d'importants aquifères.

Deux grandes nappes phréatiques emmagasinent principalement le potentiel hydraulique du Sahara algérien. La première, la moins profonde, est localisée au niveau du continental terminal (CT) à une profondeur variant entre 300 et 400 m, recouvrant pratiquement tout le Sahara septentrional y compris les bassins limitrophes du sud tunisien et nord-est Libyen, avec une surface de 350 000 km² de près et un volume théoriquement estimé à $11\,000 \times 10^9$ m³. Historiquement, cet aquifère constitue la principale ressource hydraulique alimentant les oasis du Bas-Sahara (Côte, 1998 ; Dubost, 1991).

La deuxième nappe est celle du continental intercalaire (CI), appelée aussi l'albienne, repérée à une profondeur variant de 650 à 1000 m. Cet énorme acquière compte plus de $20\,000 \times 10^9$ m³ de capacité théorique, recouvrant la totalité du Sahara septentrional avec une superficie estimée à 1 100 000 km² (figure V-7), en partage avec la Tunisie et la Libye (Kouzmine, 2012). Bien qu'elle n'est reconnue et repérée que récemment, pendant la période 1940 – 1960, les affleurements de cette ressource ont été exploités depuis longtemps notamment au moyen des foggaras traditionnelles dans les pays du Gourara et du Touat (Dubost, 1991).

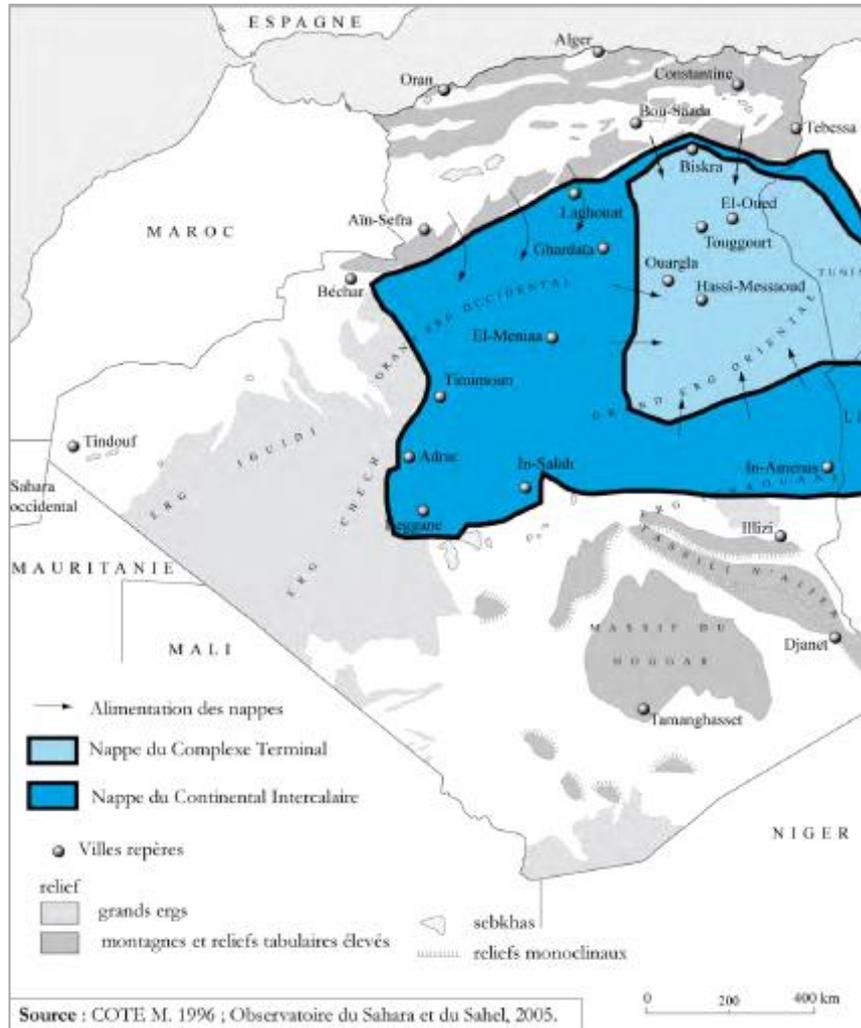


Figure V-7 : Les principaux aquifères du Sahara algérien

Source : (Kouzmine, 2012, d'après Côte, 1996)

Ces capacités hydrauliques, constituant « *un second trésor qui a été inventorié là au cours des dernières décennies* » (Côte, 1998a), ont suscité l'état, colonial et par la suite indépendant, à engager des projets de développement hydroagricoles. Durant les années cinquante, l'administration coloniale a réalisé des forages profonds pour irriguer les nouvelles palmeraies plantées dans la région d'Oued Righ. Quant à l'Algérie indépendante et à l'instar des pays voisins, des programmes considérés comme stratégiques ont été lancés. De grandes mises en valeur ont vu le jour avec l'introduction de nouvelles technologies et la mobilisation d'importants dispositifs administratifs et financiers dans la quête d'un « Eldorado » algérien (Bisson, 2003). Un autre aspect de mobilisation des ressources fossiles du Sud algérien, il s'agit de transferts massifs inter-régions des eaux du Sahara, pour compenser le déficit en matière d'alimentation en eau potable et agricole que connaît actuellement le pays en général. À une échelle locale (Sud-Sud), on peut citer la réalisation de la grande addiction hydraulique entre In-Salah et Tamanghasset. À l'échelle nationale (Sud-Nord), de

grands projets de transfert des eaux du sud vers le Nord ont été lancés pour compléter la satisfaction des villes du nord en cette matière.

Toutefois, il importe de mentionner le caractère non renouvelable de ces ressources naturelles, ainsi que les phénomènes problématiques nouvellement émergés et qui sont dus à la gestion non raisonnée de ces capacités (Côte, 1998a). L'impact environnemental et socioéconomique récemment constaté fait appel à la nécessité de mettre en œuvre des approches et des démarches plus soutenables (Idder et al., 2013 ; Kouzmine, 2012).

V.3.2. Les énergies fossiles

Le Sahara algérien enferme les ressources principales de l'économie nationale : les hydrocarbures. L'année 1956 constitue un tournant historique pour la prospection pétrolière, pendant laquelle les travaux de reconnaissance sont parvenus à avoir le premier jaillissement du pétrole à Edjeleh, et à la découverte du géant bassin de Hassi Messaoud.

Deux grands champs renferment l'essentiel de la production en hydrocarbure. Le premier, celui de Hassi Messaoud au Bas-Sahara qui accumule près d'un milliard de tonnes de pétrole récupérable ; le second, celui de Hassi R'mel au nord-centre du Sahara, avec une réserve dépassant les 1500 milliards m³ de gaz. Un troisième grand gisement est celui d'Illizi, qui englobe au sein de ses différents champs près de 400 millions tonnes de pétrole et 250 millions tonnes de gaz (Bisson, 2003).

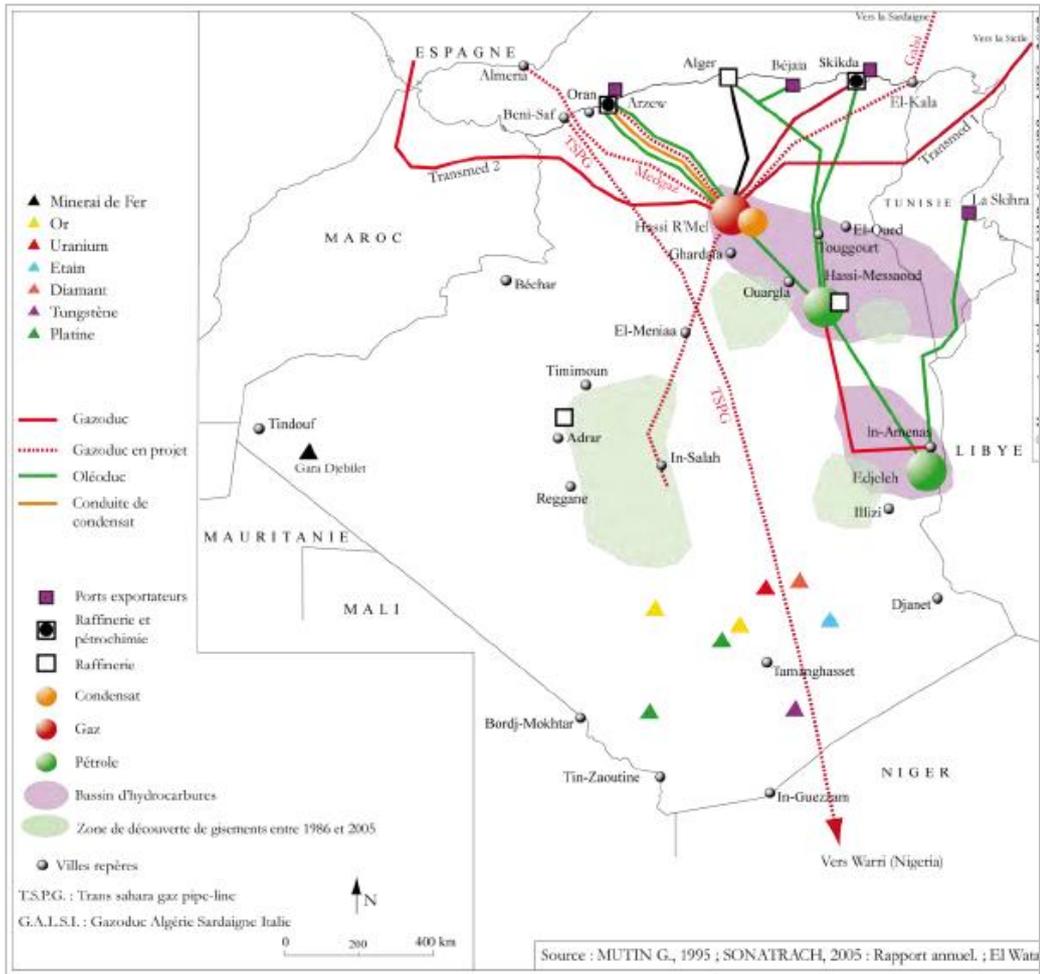


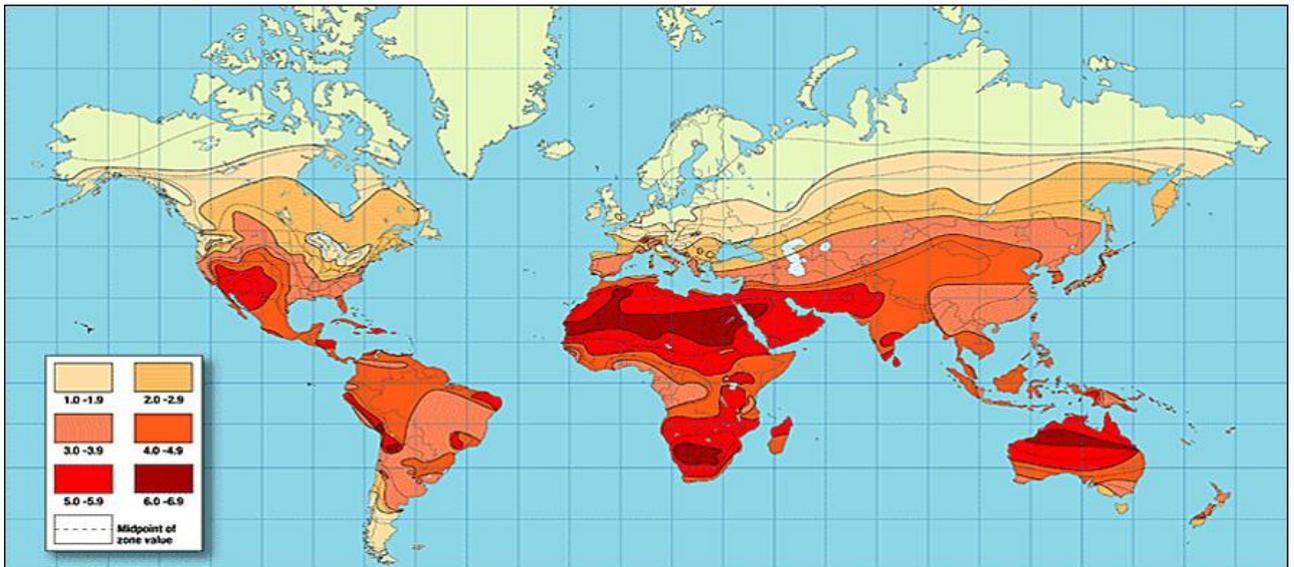
Figure V-8 : Les gisements fossiles du Sahara algérien

Source : (Kouzmine, 2012, d’après Mutin, 1995)

Outre que les capacités en hydrocarbures s’ajoutent les ressources minières, notamment le fer qui se localise principalement dans les gisements de Gara Djebilet et de Mechri Abdelaziz dans la région de Tindouf, avec des capacités considérables estimées par le ministère de l’Énergie et des Mines à près de 3 milliards de tonnes, constituant ainsi une autre ressource économique de valeur non négligeable.

V.3.3. Les gisements solaires : une richesse renouvelable et prometteuse

Un autre atout incontournable pour l’avenir de l’Algérie s’est attesté durant ces dernières décennies. Il s’agit des « méga » gisements solaires, qui sont identifiés récemment, que possède le Sahara algérien de par sa position latitudinale (figure V-9).



**Figure V-9 : Moyens annuels d'insolation à l'échelle mondiale
(prise de vue le 30/05/2012 à 10h13)**

Source : Solar Cell Central (www.solarcellcentral.com²⁴)

Quantitativement, le Sahara algérien enregistre des temps d'insolation pouvant atteindre 3900 heures par an (tableau V-1), avec un volume évalué à environ de 37 milliards de m³, soit un équivalent de 10 grands gisements qui auraient été découverts dans le bassin de Hassi R'mel (Cherigui, 2012 ; Harouadi et al., 2007).

| Région | Littoral | Hauts plateaux | Sahara |
|--|----------|----------------|--------|
| Superficie (%) | 4 | 10 | 86 |
| Ensoleillement (h/an) | 2650 | 3000 | 3500 |
| Énergie moyenne reçue (kWh/m ² /an) | 1700 | 1900 | 2650 |

Tableau V-1 : Ensoleillement annuel reçu en Algérie

Source : d'après (Cherigui, 2012 ; Harouadi et al., 2007)

Étant donné que cette source énergétique est fortement demandée au niveau mondial et plus particulièrement les pays européen, et dans une perspective de développement durable et de préservation des ressources fossiles, ces gisements solaires se manifestent actuellement comme alternative écologique d'intérêt croissant pouvant répondre aux besoins énergétiques ainsi croissants. À ce titre, Dessus (2002) a indiqué que : « *Le Sahara peut alimenter l'Europe en électricité ou en hydrogène* ». Dans cette optique, un projet Euromaghrébin de grande envergure a été proposé dans

²⁴ Consulté le 21/10/2018.

la déclaration d'Alger en 2005²⁵ pour l'exploitation de l'hydrogène d'origine renouvelable, et adopté lors de la 16^{ème} Conférence Mondiale de « L'Hydrogène Énergie », tenue à Lion en 2006 pour la production et l'exportation de l'hydrogène solaire vers les pays européens (Harouadi et al., 2007).

V.4. Des extrêmes contraintes climatiques

Bien que Sahara soit le plus grand des déserts du monde, il est aussi le plus significatif et typique par les extrêmes conditions climatiques qui sont lui associées. L'aridité distingue les climats secs, qui présentent une faiblesse de précipitations annuelles contre une forte perte d'humidité par évaporation et transpiration durant les périodes chaudes. De ce fait, elle est sans doute un déterminant principal discriminant les déserts du monde qui sont *a fortiori* largement médiatisés par leurs sècheresses (Dresch, 1982).

Le Sahara algérien occupe plus 80 % de la surface du pays. La position méridienne sur des altitudes tropicales est en effet à l'origine de la rugosité du climat. Ce qui explique la persistance des hautes températures et la dominance des vents chauds et secs et qui sont souvent porteurs du sable. Le climat est principalement caractérisé par la rareté et l'irrégularité des précipitations, une forte évaporation, une luminosité intense et des écarts importants de températures (Chehma, 2011 ; Ozenda, 1991). Les précipitations qui sont pratiquement sous forme de pluies sont occasionnelles et quantitativement de moindre d'importance. Les pluies torrentielles sont généralement très rares, mais souvent catastrophiques. Elles sont occasionnées par les perturbations soudano-sahariennes ou sahariennes (Jean Dubief, 1963)²⁶. Les températures sont moyennement élevées avec des moyennes maximales pouvant dépasser les 50 °C et des moyennes minimales variant entre 2 et 9 °C (Le Houérou, 1990). Au sol, la température peut enregistrer une valeur de 70 °C, néanmoins cette haute valeur s'abaisse en profondeur pour être rapidement équilibrée. Seules les régions du nord du Sahara, particulièrement les régions hautes, qui sont censées voir le gel (Monod, 1992). Les jours sont fréquemment assez clairs avec de faibles nébulosités, ce qui augmente l'intensité du rayonnement solaire et les périodes d'insolation ; ceci contribue en effet aux surchauffes climatiques et au dessèchement en augmentant l'évaporation ainsi que l'évapotranspiration (Ozenda, 1991). L'ensoleillement est un caractère remarquable ainsi associé au Sahara algérien avec une importante durée d'insolation qui moyennement peut variée entre 9 et 10 h par jour (Chehma, 2011).

²⁵ Premier Workshop International sur l'Hydrogène : Vecteur Énergétique d'Origine Renouvelable, organisé par le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDRE) à Alger entre le 21 et 23 Juin 2005.

²⁶ Cité in (Chehma, 2011)

V.4.1. Effet des anticyclones permanents

Le Sahara, d'un point de vue typologique, est un désert subtropical en permanente obéissance aux effets des anticyclones tropicaux qui se produisent au-dessus des zones situées dans les latitudes incluses entre 25° et 35° (Kouzmine, 2012 ; Monod, 1992), constituant une zone bouclée de haute pression. Cette boucle, par le fait des vents chauds et secs engendrés au sein de laquelle, constitue un obstacle atmosphérique permanent, repoussant les vents humides et les nuages empêchant toute possibilité des pluies (Troin et al., 2006). Le climat du Sahara algérien est logiquement lié à sa situation en latitude, dont le positionnement tropical lui permet l'introduction de fortes températures, des vents dominants chauds, secs et porteurs de sables, d'extrêmes irradiations solaires et d'intenses luminosités. Ainsi, les précipitations sont remarquablement de faibles apports avec un régime irrégulier et une rareté de pluies qui sont souvent torrentielles. Ces apports pluviométriques sont considérablement inférieurs aux quantités annuelles perdues par l'évapotranspiration qui peuvent atteindre dix à vingt fois plus les quantités des pluies tombées (Ould Baba Sy, 2005).

V.4.2. Indices climatiques et délimitation du domaine désertique

Quoique l'aridité soit le caractère global le plus déterminant de toutes les régions désertiques, ces régions ne sont pas climatiquement tout à fait uniformes, et se distinguent en fonction de leurs niveaux d'aridité qui lui-même est en rapport avec l'apport des précipitations : « *le degré d'aridité dépend de l'importance relative des apports d'eau par les précipitations et des pertes d'eau par évaporation et transpiration* » (Le Houérou, 1990). À ce titre, les biogéographes définissent trois domaines bioclimatiques de désert, à partir des niveaux pluviométriques et des isohyètes. Cette classification distingue : le semi-aride, quand la pluviométrie varie entre 100 et 300 mm ; l'aride, lorsqu'on compte entre 50 et 100 mm ; l'hyperaride qui ne dépasse pas les 50 mm de précipitations moyennes annuelles (Monod, 1992). D'autres paramètres traduisant cette classification comme les modes de peuplement, la flore, la végétation et la couverture des sols contribuent ainsi à la discrimination de chaque domaine désertique.

Quant au Sahara algérien (figure V-10), il est admis que, en se basant sur les mêmes critères de définition des domaines désertiques, la frontière nord peut être fixée à l'isohyète de (100 ± 50) mm (Kouzmine, 2012 ; Le Houérou, 1990).

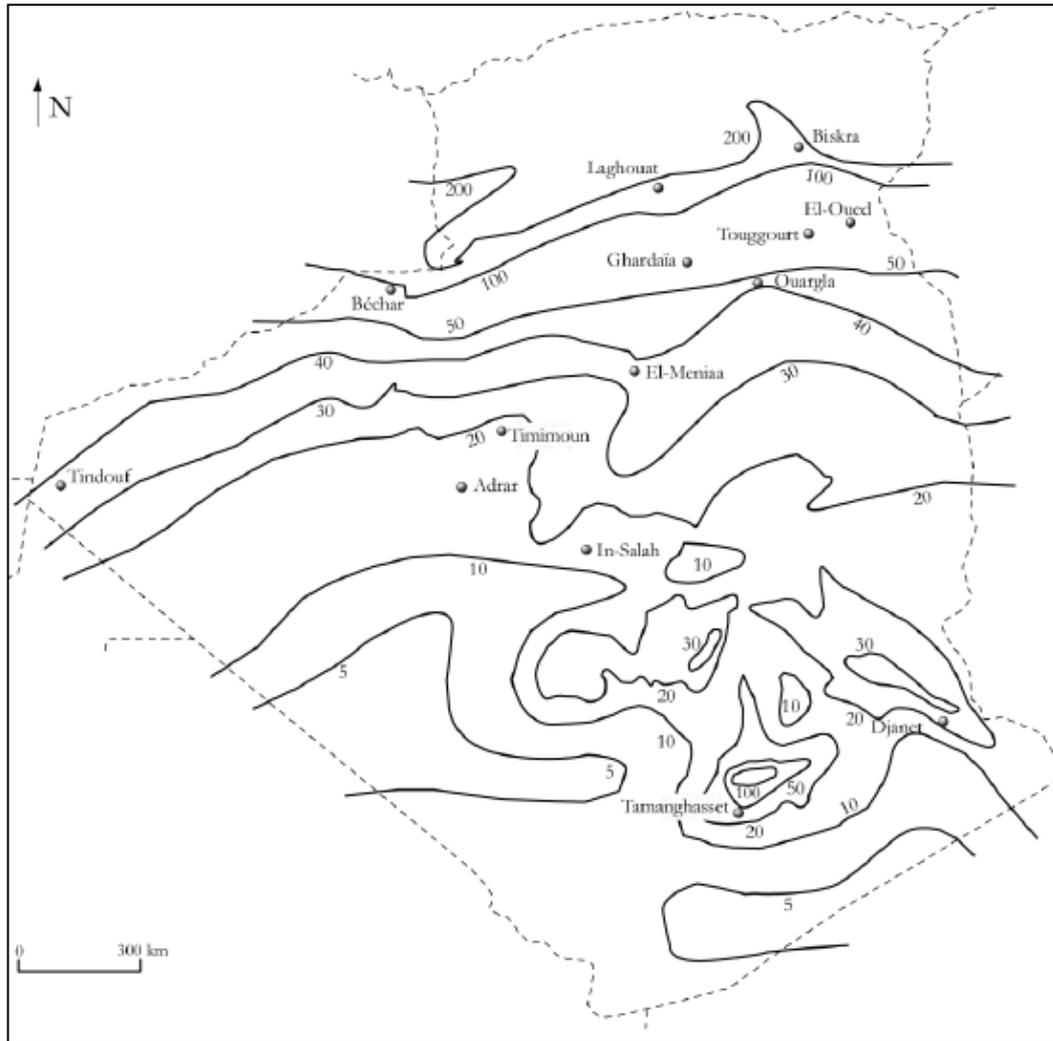


Figure V-10 : Carte des isohyètes du Sahara algérien

Source d'après (Kouzmine, 2012)

D'autres indices liés à la précipitation confirment cette délimitation. Parmi ceux-ci, on peut se référer à la nature du couvert végétal. De ce fait, la frontière nord du Sahara est associée à la limite septentrionale des oasis et du palmier dattier, ainsi qu'à la limite sud de l'Alfa. Au-delà de cette limite, le domaine aride prévaut avec la présence de quelques secteurs d'hyperaridité, notamment dans les cuvettes de Tanezrouft et du Ténéré, où la pluviométrie ne dépasse pas 30 mm : de longues périodes quasiment sèches y traversent (Senoussi, 1999). Néanmoins, l'irrégularité interannuelle se traduit parfois par de violentes tempêtes provoquant des crues et des inondations souvent désastreuses, dont la pauvreté des couches superficielles des sols en matière de couvert végétal en est un facteur aggravant (Dubost, 1991).

À l'autre rive, la frontière sud du Sahara, comme pour la limite septentrionale, peut se placer à l'isohyète (100 ± 50) mm, avec une claire modification en matière de flore et de végétation différenciant le Sahara du monde sahélien d'où la disparition du « had », une végétation typiquement

saharienne, et l'apparition de « Cram-cram » marquant le début de l'autre territoire (Le Houérou, 1990).

V.4.3. Températures

Si le Sahara est principalement défini par l'aridité, il l'est aussi sur le plan hygrométrique. Les températures maximales de l'air dépassent 45°, elles peuvent même atteindre 50°. Sur la surface du sol, on peut compter 70°. Les températures minimales varient en mois du janvier entre 2° et 9°. Ces valeurs s'abaissent avec l'altitude, le gel n'est probable qu'au nord du Sahara et bien particulièrement sur les monts (Monod, 1992). En termes de moyens annuels, les températures moyennes sont comprises entre 20 et 25 °C. Pour les oasis septentrionales, les moyennes varient entre 20 et 22 °C, elles sont de l'ordre de 25 °C pour les oasis à *foggara*. Ces pays, notamment le Gourara, le Tidikelt et le Touat, subissent des saisons chaudes s'étalant jusqu'à quatre mois pendant lesquelles les maxima de températures peuvent dépasser les moyennes de 45 °C en moi de juillet, avec de notables variations au niveau local.

Durant la saison froide, les températures descendent rarement en deçà de 10 °C, à l'exception des régions hautes où les minima varient de 2 à 9 °C en mois de janvier et février (tableau V-2). L'hiver saharien est relativement froid, et qui dure généralement environ de trois mois pour la plupart des oasis, de décembre à février. À Laghouat, cette saison peut s'étaler sur cinq mois à partir du novembre, quatre mois dans les régions de Bechar et Ouled Djellal, voire deux mois à Adrar, In Salah et Djanet (Dubost, 1991).

| | Latitude ° | Altitude (m) | T _{moy} Minima (°C) | T _{moy} Maxima (°C) |
|-------------|------------|--------------|------------------------------|------------------------------|
| Biskra | 34.5 | 121 | 10.9 | 33.6 |
| Laghouat | 33.5 | 767 | 7.8 | 28.9 |
| Béchar | 31.37 | 788 | 8.7 | 32.6 |
| Ouargla | 31.59 | 140 | 10.7 | 34.3 |
| Ghardaïa | 32.49 | 497 | 10.1 | 33.4 |
| Adrar | 27.54 | 258 | 12.3 | 36.9 |
| Tamanrasset | 22.56 | 1371 | 11.7 | 28.5 |
| In-Salah | 27.19 | 292 | 13.2 | 36.5 |
| Djanet | 24.55 | 1046 | 12.4 | 31.6 |

Tableau V-2 : Les moyennes annuelles de température des grandes villes du Sahara algérien

Source : Climate-data.org

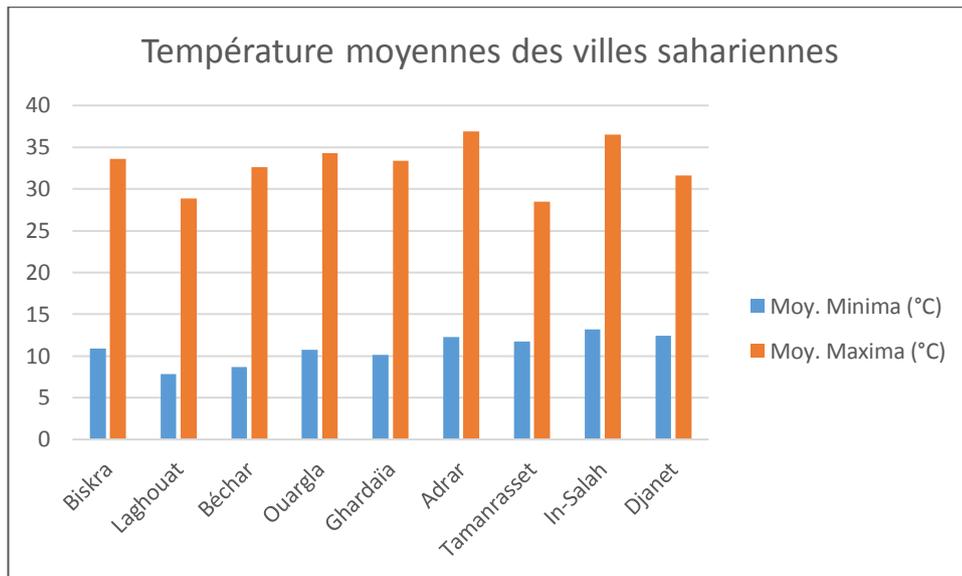


Figure V-11: Écarts de températures moyennes annuelles des grandes villes du Sahara algérien

Source : Auteur, d'après les données acquises depuis Climate-data.org

V.4.4. Des sous-ensembles bioclimatiques

Il est vrai qu'une similarité climatique caractérise globalement le Sahara algérien. Mais, et à une échelle plus restreinte, il existe une variété bioclimatique selon la localisation géographique. Plusieurs sous-ensembles bioclimatiques sont à nuancer en fonction des attributs d'altitude, de latitude et de longitude. En s'appuyant sur les degrés d'aridité proposés par Capot-Rey (1953), une répartition en trois zones est à déterminer, selon Roux (1993) :

- Une bande mésoaride couvrant la partie septentrionale du Sahara qui s'étale, d'ouest en est, de la wilaya de Béchar à celle d'El Oued, englobant les oasis du Nord ;
- Une zone plioaride qui s'étale sur le Sahara central, incluant les hamadas et les massifs du Sud algérien, l'Ahaggar et le Tassili, ainsi que les massifs de l'Air et de l'Adrar ;
- Une troisième zone hyperaride, qui inclut les territoires les plus arides du désert. Au Sahara central, on trouve les cuvettes de Tanezrouft et du Ténéré, qui sont individualisées par leurs extrêmes aridités.

V.5. Les oasis : l'œuvre d'un génie saharien

L'oasis est de manière générale considérée comme un « *lieu habité isolé dans un environnement aride ou plus généralement hostile dont la localisation est liée à la possibilité d'exploiter une ressource, notamment l'eau, pour la pratique de l'agriculture irriguée* » (Lussault et Lévy, 2013). Étymologiquement, le mot « oasis » est d'origine égyptienne, transcrit sans grande déformation dans

le lexique grec (Capot-Rey, 1953). Les arabes utilisent le mot *ouaha*²⁷ (dont le pluriel est *ouahate*), qui signifie « un îlot vert dans une région désertique »²⁸. C'est grâce à la présence, même rare, de l'eau dans ces lieux restreints, et qu'on ne le retrouve plus en dehors duquel, que la vie y était possible pendant des milliers d'années. C'est aussi au sein de ces lieux ponctuels, strictement délimités par les conditions hydrographiques, que se sont développés les établissements humains qui ont pu habiter et approprié des portions du désert, faisant de ce vaste territoire désertique un espace franchi et parcouru pendant des milliers d'années (Côte, 2012).

Il convient de rappeler qu'il existe souvent une confusion entre les deux termes « oasis » et « palmeraie ». La palmeraie, étant « *une succession de jardins aussi différents les uns des autres ... qui forment un ensemble assez vaste qui nous rappelle l'aspect d'une forêt* » (Idder et al., 2011), constitue une des composantes de l'oasis. Celle-ci, étant un agrosystème complexe pouvant contenir une ou plusieurs palmeraies, elle intègre aussi d'autres milieux de vie : « *un lieu habité où la vie se concentre autour de ressources d'eau. C'est un espace agricole irrigué, cultivé intensivement. Situé dans le domaine aride et semi-aride, doté d'un système de production hautement productif* » (Kassah, 1994). D'une manière générale, le terme « oasis » est moins utilisé dans le langage local, il est davantage employé par les géographes européens, avant qu'il soit conceptualisé pour devenir « *une catégorie de pensée emblématique des espaces désertiques* » (Kouzmine, 2012).

D'un point de vue historique, ces lieux exceptionnels de vie ont suscité les premières réflexions géographiques portant sur la description des plus anciennes oasis de l'Égypte, notamment initiées par le pionnier grec Hérodote. Ainsi, dans l'Ancien Monde, et dans un contexte de connaissance et de maîtrise des territoires désertiques traversés pendant des siècles, d'où les oasis en constituèrent les étapes, les géographes, notamment grecs et arabes, furent réquisitionnés souvent pour le doit des rois et des princes pour le repérage et l'exploration de ces entités géographiques (Lacoste, 1990).

V.5.1. L'écosystème oasien : éléments de composition et de fonctionnement

À travers les oasis, le Sahara fut peuplé pendant longtemps à la différence de la plupart des autres déserts au monde, malgré qu'il est le plus vaste et le plus rigoureux (Côte, 2012). Il est sans doute que la présence de l'eau, sous ces différentes configurations hydrographiques, constitue un élément déterminant dans la fondation de ces établissements humains, mais qu'il ne soit pas le seul. À rappeler que même cette ressource existe dans les autres déserts, parfois avec plus d'abondance, les oasis ne se manifestent pas : « *Tout point d'eau, même abondant, ne donne pas naissance à une oasis* » (Bravard et Garcier, 2014). En effet, la genèse et l'évolution des oasis sahariennes sont

²⁷ Dans le copte égyptien, on trouve le mot *ouah* qui signifie « lieu habité » d'après Bernard (1937) .

²⁸ Le dictionnaire arabe *Al-Maany* : www.almaany.com

étroitement influencées par un autre facteur ainsi explicatif : les dynamiques transsahariennes (Côte, 2012).

L'apparition des premières oasis sahariennes remonte aux époques du moyen âge, entre le VIII^e et IX^e siècle. Avant ces moments, le Sahara fut pendant trois millénaires un territoire vide et répulsif isolant complètement le monde méditerranéen du monde africain, chacun de ces deux mondes ne tient pas compte de l'autre. Le long de cette ère d'aridification, le bouclier saharien a constitué une barrière géographique séparant le Nord du Sud. L'essor des empires islamiques, notamment des Omeyades et des Abbassides, a véhiculé de nouvelles mutations géopolitiques. La découverte de l'Afrique noire par les raids militaires aurait suscité le mouvement caravanier entre les deux rives du Sahara motivés, d'une part, par les opportunités offertes par les royaumes africains en matière d'or et de main-d'œuvre trop demandés au nord, et d'autre part, la généralisation du dromadaire, antérieurement connu, qui a permis la traversée du grand désert. C'est le déclic du commerce transsaharien (Côte, 2014).

Pour assurer la logistique à ce trafic traversant le désert sur de très longues distances, des milliers de kilomètres à parcourir, il a fallu créer des puits et des lieux de vie repérés le long des axes pour se servir en eau et en nourriture. Dans cette même logique historique, Côte (2012) a indiqué que : « *Souverains, chefs de tribus, ou grands commerçants, s'y employés, en créant le long des grands axes, repères, puits, lieux de vie, oasis. Une partie de la main-d'œuvre amenée du Sud a été gardée sur place pour creuser puits ou foggaras, planter des palmiers, construire des villages* » (Côte, 2012).

Depuis lors, la création des oasis se fut poursuivie le long de la période du XIII^e au XVII^e siècle, des plus anciennes oasis comme celles du Touat et de Fezzan jusqu'aux plus récentes telles que celles de la Mauritanie. Pendant presque une dizaine de siècles, ces oasis jalonnent les routes d'or, une multitude d'axes méridiens reliant rive nord et sud du Grand Sahara. Les oasis les plus importantes étaient plus attractives, au sein desquelles commerçants, artisans, et banquiers y sont installés : c'était l'émergence des villes-oasis. En somme, les implantations humaines qu'a connues le Sahara ne peuvent être appréhendées qu'en référence au contexte des mouvements transsahariens le long de cette période : « *Les oasis ne sont pas nées "spontanément", se sont des créations humaines, conçues comme relais. Elles n'ont pas été créées par l'eau, mais là où l'eau existait.* » (Côte, 2012).

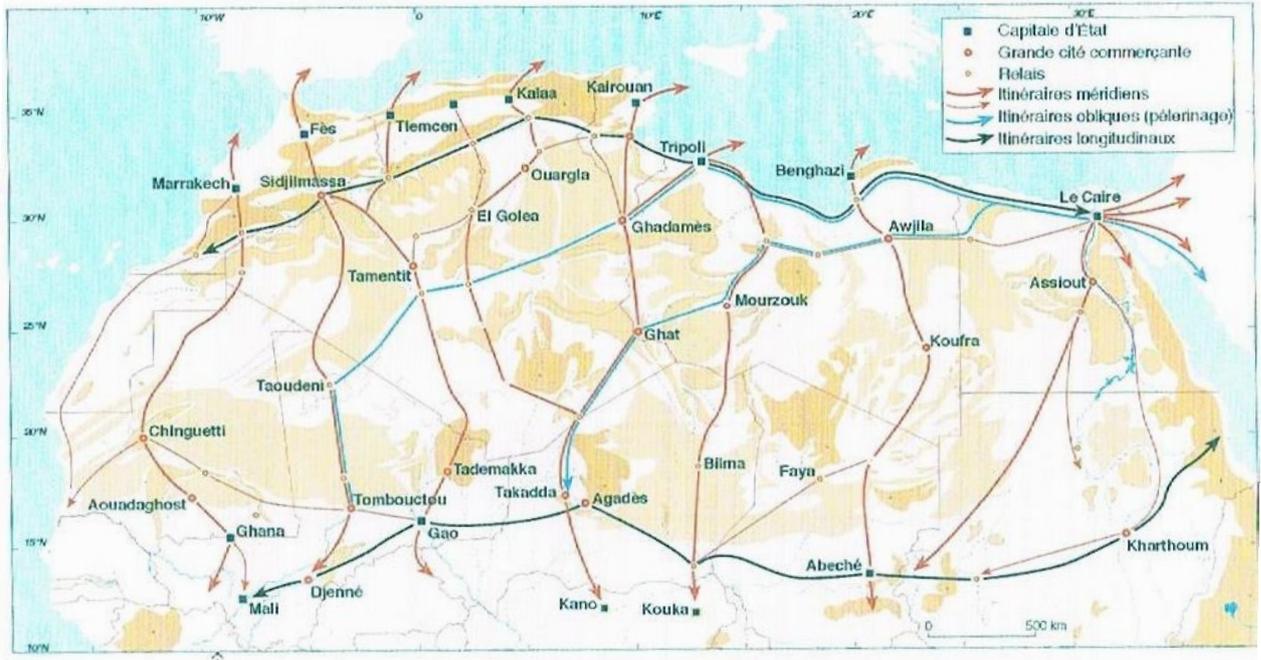


Figure V-12 : Les itinéraires sahariens et leurs étapes

Source : d'après (Côte, 2014)

V.5.2. Dynamiques de prospérité et déclin

Les oasis ont jalonné le Sahara pendant plus d'un millénaire, une époque d'essor soutenue par des dynamiques caravanières de transport et d'échanges commerciaux ainsi que des mouvements d'hommes et d'idées (pèlerinage, pénétration de l'islam et circulation des manuscrits). Cette époque brillante aurait atteint ses limites avec l'ouverture des routes transocéaniques durant la période du XVII^e au XIX^e siècle, pour remplacer celles du transsaharien en déclenchant le processus de leur déclin ainsi que le déclin des oasis (figure V-13).

Puisque devenues isolées, les oasis demeuraient en situation délicate, voire médiocre jusqu'au début du XX^e siècle. L'image transmise par les analystes est celle d'oasis moribondes comme l'indique, à titre d'exemple, Martel (1968) qui a mentionné que : « *les sociétés sahariennes, en même temps que leur principale source de revenus, avaient perdu leurs raisons d'être* ». Côte (2012), quant à lui, a mentionné qu'« *elles auraient pu être disparues* ». Mais l'arrivée de la colonisation européenne a apporté un nouveau statut aux villes oasiennes, un rétablissement au profit de ces villes a été occasionné pour être de nouveau sauvées. Les facteurs exogènes influencent directement l'évolution des établissements oasiens, aussi bien dans leurs croissances que dans leurs régressions.

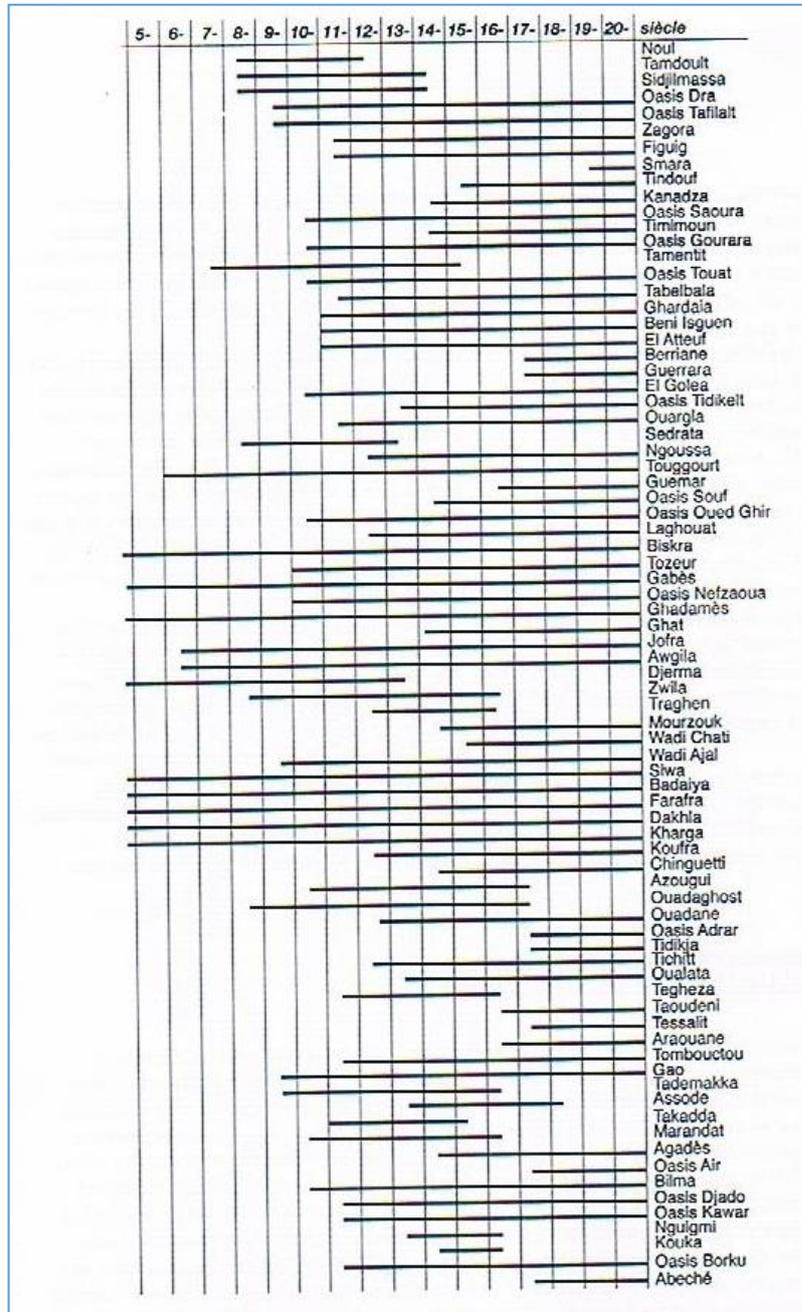


Figure V-13 : Durée de vie des établissements oasiens du Sahara

Source : d'après (Côte, 2014)

De nos jours, une nouvelle réalité est à l'œuvre, beaucoup plus complexe que jamais. Les oasis sont considérées actuellement comme un héritage du passé, parfois mythifié (Bisson, 2003). Mais, dans un contexte de mondialisation et d'urbanisation galopante, ce legs se trouve en situation problématique (Dubost, 1989). Le peuplement actuel du Sahara ne peut s'expliquer donc qu'à travers les oasis dont elles sont à son origine (Côte, 2012).

V.5.3. La trilogie de base de l'écosystème oasien

Trois éléments de base constituent ensemble et d'une manière indissociable le soubassement fondamental sur lequel s'appuient tous les écosystèmes oasiens. Il s'agit d'une trilogie de base : eau, habitat et culture irriguée. Une diversité de configurations peut être répertoriée, néanmoins la logique de base est toujours présente, comme l'indique Marc Côte (2012) : « *l'eau peut être revêtir de formes diverses, l'habitat peut être un ou pluriel, le couvert végétal peut être assuré par des arbres autres que le palmier ; mais la trilogie est toujours là* ». Ces éléments sont précieusement façonnés pour qu'ils forment une installation humaine en véritable symbiose, ainsi œuvrée par le génie humain. À cette trilogie, intervient l'acteur principal : l'homme saharien. Celui-ci, de par son ingéniosité, a su développer des modèles aussi appropriés, prouvant des capacités d'adaptation et de persistance dans des conditions extrêmes d'hostilités et de rudesse comme celles du plus grand désert au monde, le Sahara.

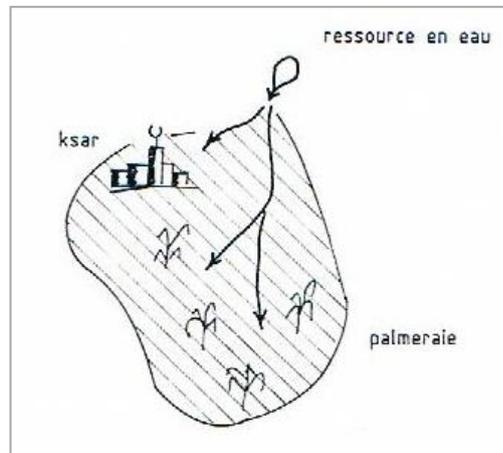


Figure V-14 : La trilogie basique de l'oasis

Source : (Côte, 2014)

V.5.3.1. L'eau

L'eau est l'élément duquel dépendent les deux autres composantes, tout est conditionné par son existence. En effet, l'histoire des civilisations est en étroite liaison avec l'abondance de l'eau, on parle souvent de civilisations hydrauliques. En conséquence d'une pénurie de celle-ci, des civilisations n'ont pu persister (Bisson, 2003). En revanche, les communautés oasiennes ont su présenter des modèles typiquement rationnels en matière de gestion de cette ressource rare et précieuse à laquelle elles étaient toujours en étroite liaison. Selon leurs provenances, ces ressources peuvent être superficielles (source, oued) ou subsuperficielles, celles des nappes phréatiques notamment artésiennes (Côte, 1998a).

V.5.3.2. La palmeraie : source névralgique de revenu et de régulation microclimatique

La palmeraie, étant « un écosystème très particulier à trois strates » (Toutain, 1979), constitue le lieu vital de l'oasis. Elle assure deux fonctions majeures : revenu et bioclimat. En effet, les oasiens ne se limitent pas aux seules fonctions d'étapes et de relais que jouent les oasis sur les axes caravaniers, la production agricole occupe aussi une place importante dans leurs vies, c'est une source de richesse et d'approvisionnement (Belguidoum, 2002). Ainsi, de par son mode d'organisation particulier, notamment en trois strates : la strate arborescente du palmier dattier (*phoëniciculture*), la strate arborée et la strate herbacée, les conditions microclimatiques nécessaires à la vie oasienne sont convenablement offertes. L'évapotranspiration est moindre, projection d'ombre, protection contre l'ensablement et brise-vent (Bouzaher, 2015 ; Riou, 1990).

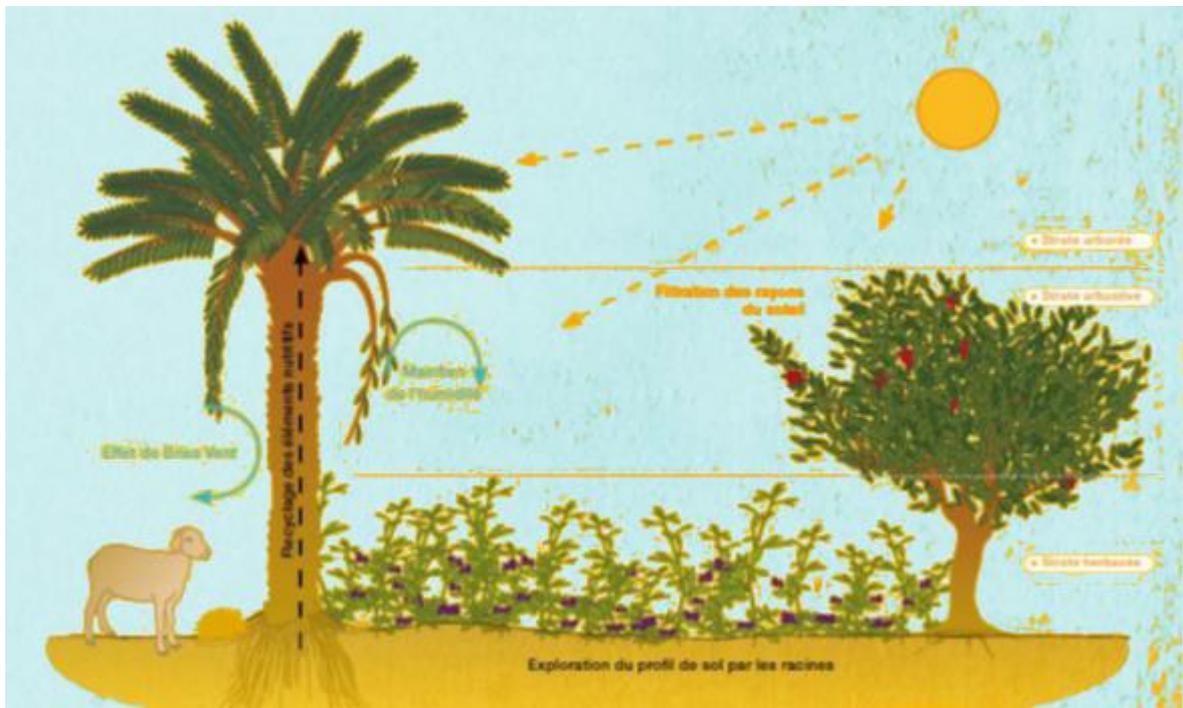


Figure V-15 : Stratification et régulation microclimatique au sein d'une palmeraie : l'effet « oasis »

Source : d'après (RADDI, 2001)

V.5.3.3. L'habitat : le Ksar

La fonction « habiter » dans l'écosystème oasien est assurée par le Ksar ou la Médina dans les oasis urbaines. Ces unités de vie sociale montrent différents aspects de durabilité que ce soit dans leurs logiques d'implantation, leurs constructions ou dans leurs organisations spatiales. À un niveau global, les Ksour sont généralement implantés sur des sites relativement surélevés par rapport à l'ensemble de l'oasis. Ce choix d'implantation est en réponse aux exigences défensives et de protection contre la remontée des eaux et même contre les inondations qui surviennent souvent

brusquement. Les différentes dispositions spatiales par rapport à la palmeraie, que ce soit en juxtaposition ou intégrée à l'intérieur de celle-ci, reflètent la forte relation spatiale reliant l'unité de vie à l'unité de production. À un niveau intermédiaire, celui de l'agglomération, les tissus bâtis sont de morphologie compacte, avec un tracé irrégulier structuré hiérarchiquement en rues et ruelles étroites, parfois couvertes. Cette configuration est mieux adaptée avec les rudes conditions climatiques caractérisant les milieux désertiques. La sinuosité et l'étroitesse des ruelles permettent la création des surfaces ombrées ainsi que la protection contre les vents de sable. La compacité des constructions augmente l'isolation thermique des habitations et contribue à l'amélioration des conditions microclimatiques. À un niveau architectural, deux points forts se manifestent : d'un côté l'organisation spatiale en introvertie offre de meilleures possibilités d'aération, d'éclairage et même d'ensoleillement sur les terrasses accessibles ; d'un autre côté, les matériaux de construction locaux et les techniques ancestrales reflètent un fort ancrage au site et une forte appartenance identitaire (Bouzaher, 2015).

V.5.4. L'oasis : un agrosystème en interactions internes et externes

Les quatre éléments de composition de l'oasis cités précédemment ainsi que les interactions se déroulant tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de celle-ci font de l'oasis un système spatial en perpétuelle évolution (figure V-16). Les dynamiques d'interaction entre ces différentes composantes découlent d'une organisation sociopolitique autostructurée et hiérarchisée, dont les rapports sont explicitement en correspondance avec l'organisation de l'espace. Au-delà du fonctionnement interne, cette entité organisée fait partie d'un système oasien plus large, dont le mode d'organisation et de fonctionnement se diffère d'un pays oasien à un autre. Sur ce point, Kouzmine (2012) a souligné que : *« Des interactions entre ces quatre éléments découle une organisation socio-politique hiérarchisée dont les rapports s'inscrivent de manière prégnante dans l'espace. Cet ensemble structuré, au-delà de sa dynamique interne, fonctionne comme un système ouvert aux fluctuations du système spatial plus large dans lequel il s'imbrique géographiquement et économiquement »* (Kouzmine, 2012).

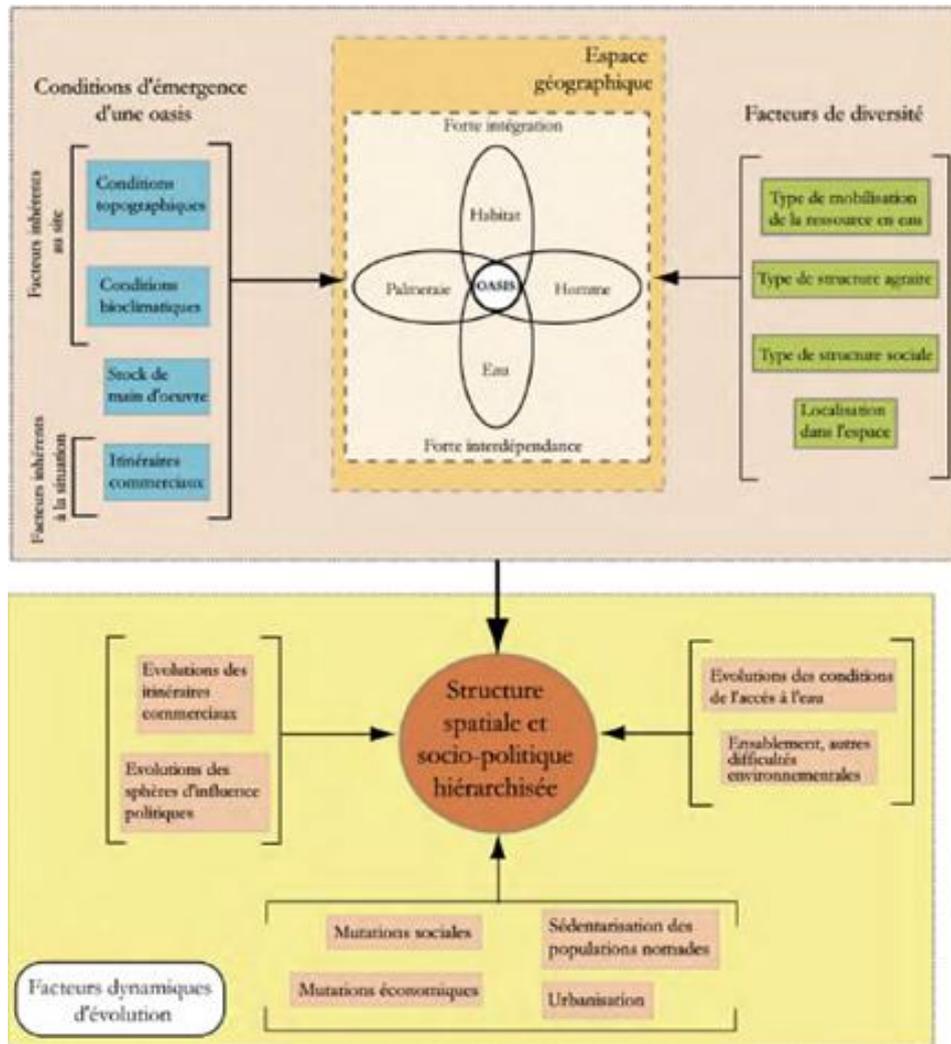


Figure V-16 : Fonctionnement du système oasien

Source : (Kouzmine, 2012, d'après Dubost, 1989)

V.5.5. La morphologie oasienne : typologie et configurations

Sur l'immense surface du désert, les oasis jalonnent depuis un millénaire. Elles se manifestent comme des « bulles » (Côte, 2012), présentant des formes d'harmonie et d'intégration particulièrement remarquables : « à la surface du Sahara, les oasis sont des signatures fortes, et durables. Elles sont en place depuis des siècles, et ont traversés des périodes troublées. Par leurs verdure et leurs beautés, elles sont un peu « les icônes du Sahara » (Bisson, 2003).

Les conditions topographiques du site et la configuration du système hydraulique déterminent d'une manière évidente la forme spatiale de l'oasis. À ce titre, une diversité de formes et de configurations spatiales peut être répertoriée. Selon Côte (2012), des centaines d'exemples oasiens peuvent être recensés. Néanmoins, différentes classifications des oasis ont été proposées par les géographes en fonction de la nature de la ressource en eau, le mode d'accès et d'approvisionnement hydraulique, ainsi que la configuration géomorphologique qui en résulte. À ce titre, le tableau qui suit illustre une

typologie synthétique et non exhaustive qu'on a essayé de proposer toute en se basant sur les travaux de (Bernard, 1937 ; Bisson, 2003 ; Côte, 2012).

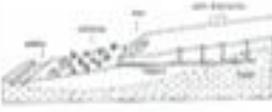
| Typologie | Principe d'organisation | Exemple | Répartition |
|-------------------|---|--|---|
| Oasis de source |  |  Oasis de Chetma |  |
| Oasis gorges |  |  Oasis d'El-Kantra | |
| Oasis vallées |  |  Oasis de Metlili |  |
| Oasis artésiennes |  |  Oasis de Zaouila, Oued Righ |  |
| Oasis fluviales |  |  Oasis de Ziz, Maroc |  |
| Oasis alvéolaires |  |  Ghel & El-Oued |  |
| Oasis à foggaras |  |  Oasis de Noum Nesa |  |

Figure V-17 : Typologie des oasis selon la configuration topographique et la nature de la source hydraulique.

Source : Auteur d'après (Bernard, 1937 ; Bisson, 2003 ; Côte, 2012)

Conclusion

Le Sahara algérien présente presque le quart de la surface du Grand Sahara. Il tire des éléments de commun de cet immense espace désertique dont l'aridité est la plus expressive dans le mode des déserts. Mais, malgré ces contraintes géographiques et climatiques faisant du Sahara un espace défavorable à la vie en général, le Sahara a été en partie habité et franchi grâce à l'existence des oasis dont la genèse et l'évolution sont étroitement liées à la maîtrise de l'eau et aussi à la maîtrise de l'espace. L'émergence et l'essor des réseaux oasiens dépendent ainsi des facteurs exogènes relatifs à l'activité caravanière qui dynamisait le Sahara pendant longtemps.

L'oasis est écosystème dont les éléments de composition sont en parfaite symbiose. Cet écosystème est essentiellement fondé sur la trilogie eau, palmeraie et habitat. Le quatrième élément est bien l'homme saharien qui, de par son génie ancestral, a su bien s'adapter aux contraintes extrêmes du milieu en mettant en œuvre un modèle d'organisation social et agrospatial original et typiquement approprié permettant aux communautés oasiennes de persister pendant des siècles jusqu'à l'interruption de l'activité caravanière au début du XIX^e siècle, moment à partir duquel les réseaux oasiens ont traversé une période de recul et même de déclin pour certaines oasis. Il a fallu attendre la colonisation pour que certaines oasis voient leurs rétablissements avec l'attribution de nouveaux statuts administratifs et de contrôle du territoire. De nos jours, et dans un contexte de globalisation et d'urbanisation effrénée, les oasis sont en situation critique face aux processus inédits d'étalement.

Chapitre VI. Une urbanisation qui pèse sur un environnement fragile : analyse socioéconomique et environnementale

Introduction

L'explosion démographique inédite qu'a connue le Sahara algérien au cours de ces cinq dernières décennies constitue un des traits majeurs des mutations caractérisant ce vaste territoire particulier. La croissance démographique est plus marquée au sud qu'au nord du pays. De nos jours, la population saharienne présente le 1/10^e de la population nationale, contre une part de 1/15^e en 1962.

La particularité que porte cette explosion démographique est qu'elle est urbaine dans sa majorité. La population saharienne est devenue de plus en plus citadine, et les grandes villes sont ainsi devenues nombreuses : dans un demi-siècle, le taux d'urbanisation s'est multiplié par plus de 3 fois. Si cette urbanisation effrénée est une caractéristique générale de l'ensemble du Sahara algérien, elle est plus accentuée au Bas-Sahara algérien. Les villes du Bas-Sahara abritent actuellement plus de la moitié de la population urbaine habitant le Sahara algérien. En effet, l'urbanisation au Sahara constitue actuellement une entrée importante pour la compréhension des dynamiques spatiales complexes.

Compte tenu de la fragilité environnementale des régions du Bas-Sahara, à l'image des autres milieux sahariens, cette urbanisation non maîtrisée est constatée principale génératrice de nuisances environnementales. En plus des problèmes globaux que connaissent les villes contemporaines, les villes du Bas-Sahara se trouvent confrontées aux problèmes particuliers liés à la spécificité environnementale dictée par le contexte géomorphologique et climatique. D'immenses problèmes environnementaux se manifestent et constituent en même temps des défis majeurs en matière d'aménagement et gestion spatiale : la remontée des eaux souterraines et les risques accompagnants, le risque des inondations que ce soit celles dues aux crues des oueds ou celles dues à la submersion des bassins fermés, ainsi que les autres risques liés à la pollution et à la santé publique.

Ce chapitre sera consacré à l'étude des dynamiques d'urbanisation caractérisant le Sahara algérien et plus particulièrement les régions du Bas-Sahara depuis l'indépendance, ainsi que les problèmes environnementaux accompagnants, en essayant de mettre en évidence la vulnérabilité que présentent les villes sahariennes face aux risques naturels. L'étude démographique sera principalement basée sur les statistiques officielles ainsi que les études portant sur ce sujet notamment (Bendjelid et al., 2018 ; Côte, 1998b, 2005 ; Fontaine et Flitti, 2010 ; Kouzmine, 2012 ; Kouzmine et Fontaine, 2018).

VI.1. Urbanisation et croissance démographique au Sahara Algérien au XXI^e siècle

VI.1.1. À partir de 1954

En 1954, la population du Sahara algérien ne comptait que 660 000 habitants (J Fontaine et Flitti, 2010). Sur un intervalle de cinq décennies, cette population qui occupe 90 % du territoire national s'est multipliée par plus de 5 fois pour enregistrer un total de 3 600 000 habitants en 2008, soit une part de 10.8 % de la population nationale (Kouzmine et Fontaine, 2018).

| Année du recensement | Pop. nationale | Pop. Sahara | Part (%) de la pop. saharienne | TCAM (%) national | TCAM (%) au Sahara |
|----------------------|----------------|-------------|--------------------------------|-------------------|--------------------|
| 1954 | 9 529 726 | 659 878 | 6,92 | +1,95 | +2,68 |
| 1966 | 12 022 000 | 906 440 | 7,54 | +3,17 | +3,89 |
| 1977 | 16 948 000 | 1 379 300 | 8,14 | +3,12 | +3,73 |
| 1987 | 23 038 942 | 1 998 886 | 8,68 | +2,15 | +3,12 |
| 1998 | 29 100 868 | 2 802 250 | 9,63 | +1,59 | +2,45 |
| 2008 | 34 074 911 | 3 569 981 | 10,48 | +2,34 | +3,12 |

*TCAM : Taux de croissance annuel moyen.

Tableau VI-1 : Évolution de la population saharienne entre 1954 et 2008 par rapport à la population nationale.

Source : (Kouzmine et Fontaine, 2018 d'après RP 1954 et RGPH, 2008)

Globalement, sur toutes les périodes de recensement de la population entre 1954 et 2008, le Sahara algérien a enregistré une croissance démographique plus importante que celle du niveau national, avec des taux d'accroissement annuels dépassant les moyennes nationales. Ce rythme remarquable d'accroissement est poussé par un taux élevé de natalité avec un gain positif apporté en progression par la migration intérieure, particulièrement dans les régions de production d'hydrocarbures, ajoutant à cela les politiques volontaristes de renforcement économique octroyées à ces régions (Kouzmine et Fontaine, 2018). Ainsi, l'évolution des taux de croissance annuelle mesurés dans la même période confirme le même constat. La croissance démographique au Sud algérien avait toujours une moyenne annuelle de croissance supérieure à la moyenne nationale avec des taux dépassant 3.12 % pour les périodes de l'après indépendance, exceptée la période (1987-1998) d'où l'enregistrement d'une valeur de 2.45 % de croissance annuelle (figure VI-1).

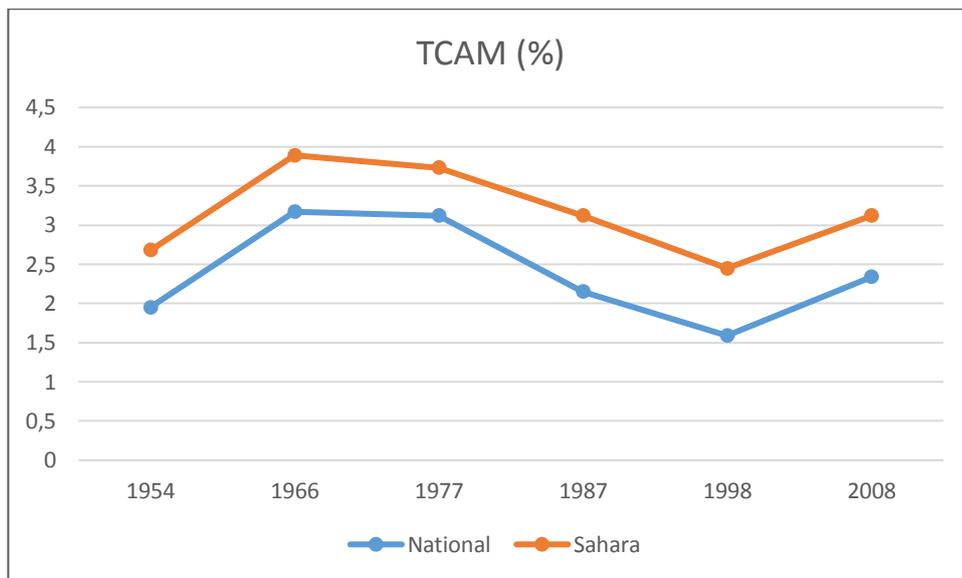


Figure VI-1 : Évolution des taux de croissance annuelle du Sahara par rapport aux moyennes nationales.

Source : Auteur d'après (Kouzmine et Fontaine, 2018)

Une lecture comparative de cette évolution démographique entamée par Kouzmine et Fontaine (2018)²⁹ a révélé des disparités évidentes entre les différentes régions composant le Sahara algérien (tableau VI-2).

| | 1954 | | | | 2008 | | |
|---------------------|-------------------------------|---------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|
| | Superficie (km ²) | Pop. | Part pop. (%) | Densité | Pop. | Part pop. (%) | Densité |
| Sahara nord-central | 716 464 | 286 102 | 43,3 | 0,40 | 1 476 117 | 41,3 | 100,0 |
| Bas-Sahara | 337 343 | 334 758 | 50,7 | 0,99 | 1 857 548 | 52,0 | 5,51 |
| Sahara occidentale | 219 766 | 23 410 | 3,5 | 0,11 | 54 271 | 1,5 | 0,25 |
| Sahara touareg | 764 197 | 15 788 | 2,4 | 0,02 | 182 045 | 5,1 | 0,24 |
| Totaux/moyennes | 2 037 770 | 660 058 | 100,0 | 0,32 | 3 569 981 | 100,0 | 1,75 |

Tableau VI-2 : Évolution des populations des densités humaines au Sahara algérien (1954 – 2008)

Source : d'après (Kouzmine et Fontaine, 2018)

Les statistiques illustrées dans le tableaux précédant montrent une grande disparité de répartition de la population au sein même du Sahara. Le Bas-Sahara abrite la grande partie avec un total de 1 857 548 habitants, soit un pourcentage dépassant la moitié (52 %). Le pays des Ziban présente la région

²⁹ Cette étude est basée sur un découpage spatial proposé par Brûlé (2004) subdivisant le territoire national en 19 sous-régions, dont 4 appartiennent au Sud algérien.

la plus peuplée, avec une population dépassant les 600 000 habitants, suivi par le pays du Souf avec plus de 500 000 habitants, puis l'Oued Righ qui rassemble environ 350 000 habitants et l'Oued Mya avec un total environnant 250 000 habitants (figure VI-2).

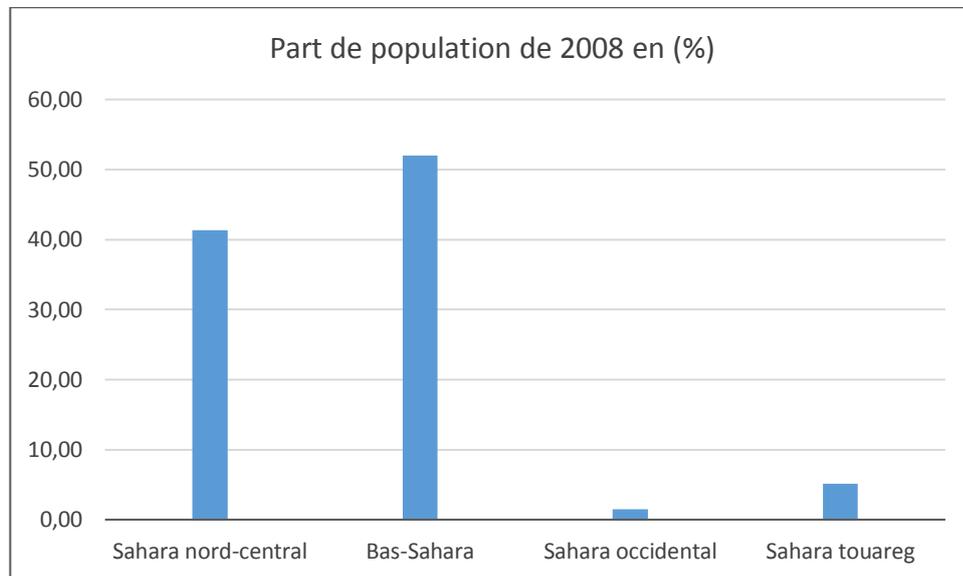


Figure VI-2 : La population du Bas-Sahara par rapport l'ensemble du Sahara

Auteur d'après (Kouzmine et Fontaine, 2018 ; ONS, 2011)

Entre 1954 et 2008, la population totale du Bas-Sahara est passée de 334 758 à 1 857 548 habitants, et une densité passée de 0.99 hab/km² en 1954 pour atteindre 5.52 hab/km² en 2008, soit une multiplication par plus de cinq fois. Avec cette densité, le Bas-Sahara demeure la région la plus concentrée au niveau du Sahara algérien.

VI.1.2. Une urbanisation assez considérable

La notable croissance démographique qui a marqué le Sahara algérien durant ces dernières décennies est opérée principalement dans les agglomérations urbaines. L'urbanisation démesurée, notamment de l'après-indépendance, est considérée comme l'une des principales mutations marquant l'organisation spatiale des territoires sahariens (Côte, 2005 ; Kouzmine et Fontaine, 2018).

Il importe de mentionner que la définition de l'« urbain » a connu une évolution, notamment entre 1954 et 1977, avec variation des critères de définition adoptés par les organismes statistiques, qui changent d'un recensement à un autre. La définition coloniale de l'urbain adoptée en 1954 est basée seulement sur le critère administratif. À cette époque, il n'y avait qu'une seule commune considérée comme urbaine au niveau du Sahara algérien, celle de Biskra, compte tenu de son statut de commune de plein exercice. Lors du recensement de 1966, une nouvelle définition a été adoptée par l'ONS, basée sur une combinaison de critères administratifs (chef-lieu de commune), statistique (seuil de 4000 habitants), et des critères relatifs à l'activité économique, notamment la part des actifs non

agricoles par rapport à l'ensemble des actifs. À partir de 1977, les critères retenus pour la définition des agglomérations urbaines sont d'ordre statistique et spatial. Un seuil de 5000 habitants, l'existence d'au moins d'une centaine de constructions avec une distance minimale séparant de constructions voisines ne dépassant les 100 mètres, avec dotation de services et d'infrastructures qui varie d'un recensement à l'autre.

Il convient de mentionner aussi que l'analyse de l'urbanisation devient plus difficile quand il s'agit de critères variables d'une époque à une autre. Comme c'est le cas de notre étude.

| | Taux d'urb. Sahara | Taux d'urb. Nord | Taux d'urb. National |
|------|--------------------|------------------|----------------------|
| 1954 | 22,2 | 23,7 | 25,05 |
| 1966 | 33,1 | 32,0 | 31,43 |
| 1977 | 45,5 | 38,9 | 39,45 |
| 1987 | 56,0 | 49,1 | 49,54 |
| 1998 | 63,3 | 57,8 | 58,27 |
| 2008 | 70,3 | 65,4 | 65,94 |

Tableau VI-3 : Taux d'urbanisation entre 1954 et 2008

Source : (Kouzmine et Fontaine, 2018 ; ONS, 2011)

Le tableau ci-dessus (tableau VI-3) montre que l'urbanisation au Sahara est plus accentuée par rapport à la moyenne nationale et même à celle du nord du pays. Elle n'était que de l'ordre de 22.2 % en 1954, contre 25.05 % à l'échelle nationale et 23.7 % enregistrée au Nord. Mais à partir de 1966, l'urbanisation commence à être plus importante dans les régions du Sud, avec un taux d'urbanisation estimé à 33.1 % : un taux supérieur à celui de la moyenne nationale (31.43 %) et à celui du Nord (32 %). Les quatre derniers recensements révèlent que l'urbanisation au Sud demeure la plus intense. En 2008, le taux d'urbanisation au Sahara a atteint 70.3 %, contre 65.94 % de moyenne nationale et 65.4 % enregistré au Nord. Cette évolution montre que les dynamiques d'urbanisation sont plus accentuées au Sud algérien avec un rythme plus accéléré par rapport au reste du pays.

| | 1954 | 1966 | 1977 | 1987 | 1998 | 2008 |
|---------------------------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| Population urbaine (hab) | 146 258 | 299 733 | 627 678 | 1 123 534 | 1 780 691 | 2 507 932 |

Tableau VI-4 : Évolution de la population urbaine au Sahara entre 1954 et 2008

Source : (Kouzmine et Fontaine, 2018 d'après les recensements RP 54, RGPH de 1966 à 2008)

Le tableau précédent montre une importante croissance de la population urbaine saharienne. En 1954, la population habitant les villes était de l'ordre de 146 258 habitants, répartie principalement sur les centres urbains du Bas-Sahara ainsi que Béchar et El Menia. En 1966, cette population s'est

multipliée pour enregistrer un nombre de 299 733 habitants. La population citadine continue de se multiplier pour se rapprocher à la moitié de la population saharienne avec un total de 627 678 habitants et un taux d'urbanisation avoisinant 46 %. Cette croissance est liée aux investissements des hydrocarbures et aux promotions administratives découlant du découpage territorial de 1974 qui a donné lieu à de nouveaux chefs-lieux de wilaya, de daïra et de commune, suscitant de plus en plus l'attractivité des villes sahariennes. Les centres du Sud n'ont pas échappé de ces dynamiques d'urbanisation. Durant cette période, des villes comme Adrar, Tamanrasset et Djanet ont bénéficié de plus de statut pour se manifester comme des pôles polarisant leurs territoires fonctionnels. Au cours de la période 1977 – 1987, la population urbaine continue en augmentation, mais avec un rythme moins accéléré. Elle a atteint 1 123 534 habitants avec une part dépassant la moitié de la population totale (56 %). Cette augmentation est liée à la montée du phénomène de la micro-urbanisation qui s'est principalement manifestée au niveau des petites et moyennes agglomérations du Bas-Sahara (Alkama, 2005a ; Kouzmine et Fontaine, 2018). Entre 1998 et 2008, l'urbanisation continue en augmentation, malgré le ralentissement du taux d'accroissement annuel. La population habitant les agglomérations urbaines est passée de 1 780 691 habitants en 1998 pour atteindre 2 507 932 habitants en 2008, soit un niveau d'urbanisation dépassant 70 %.

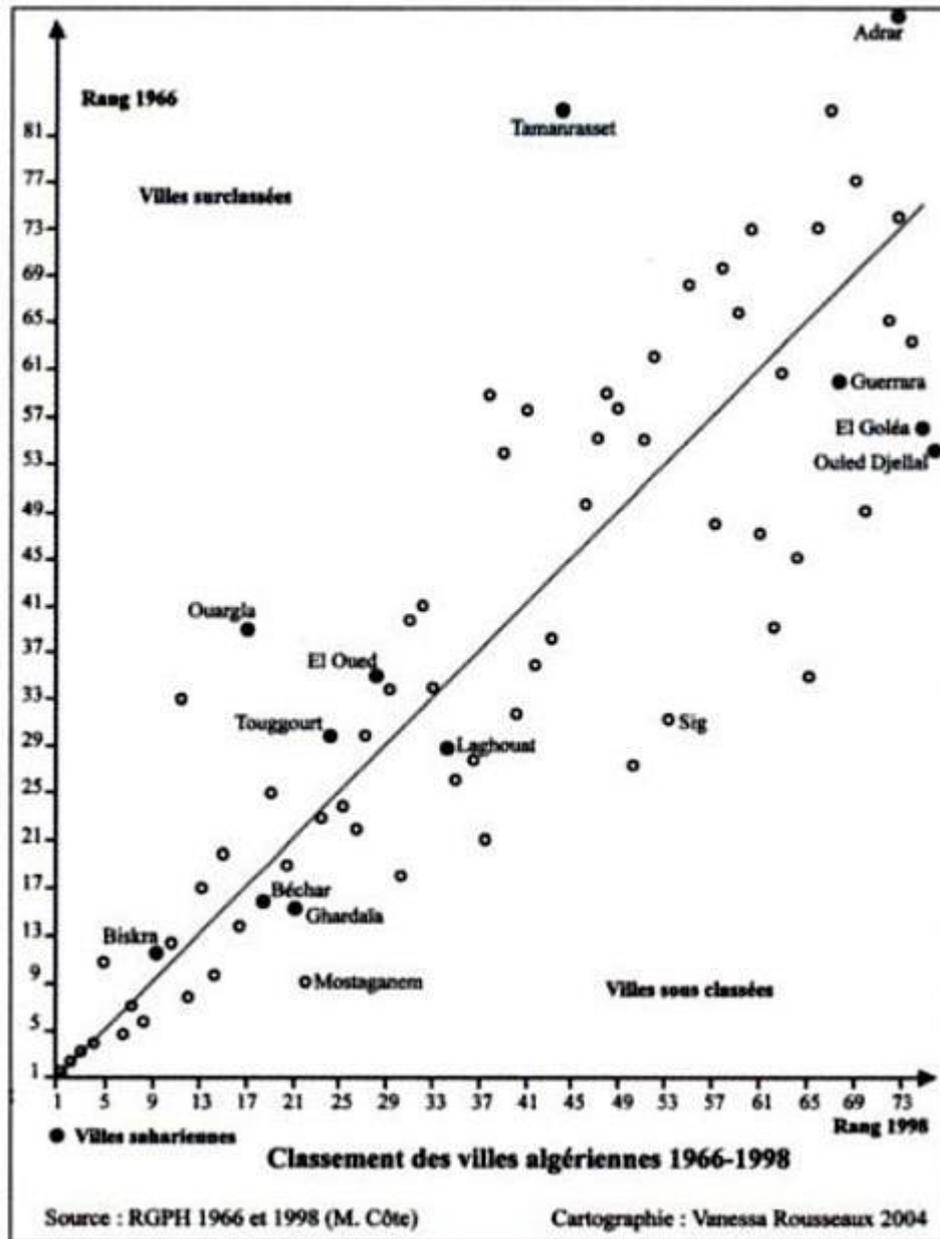


Figure VI-3 : Évolution du classement des grandes villes sahariennes entre 1966 et 1998

Source : (Rousseaux, 2004, d'après Côte, 2005)

En somme, la population urbaine s'est multipliée par 16 fois au cours des cinq dernières décennies, avec un taux d'urbanisation passé de 22 % en 1954 pour atteindre 70 % en 2008. 73 agglomérations urbaines abritent un total de 2 500 000 habitants, dont 8 agglomérations classées dans la strate de l'« urbain supérieur ». Ces villes sont : Biskra, El-Oued, Ouargla, Béchar, Touggourt, Ghardaïa et Laghouat (figure VI-3).

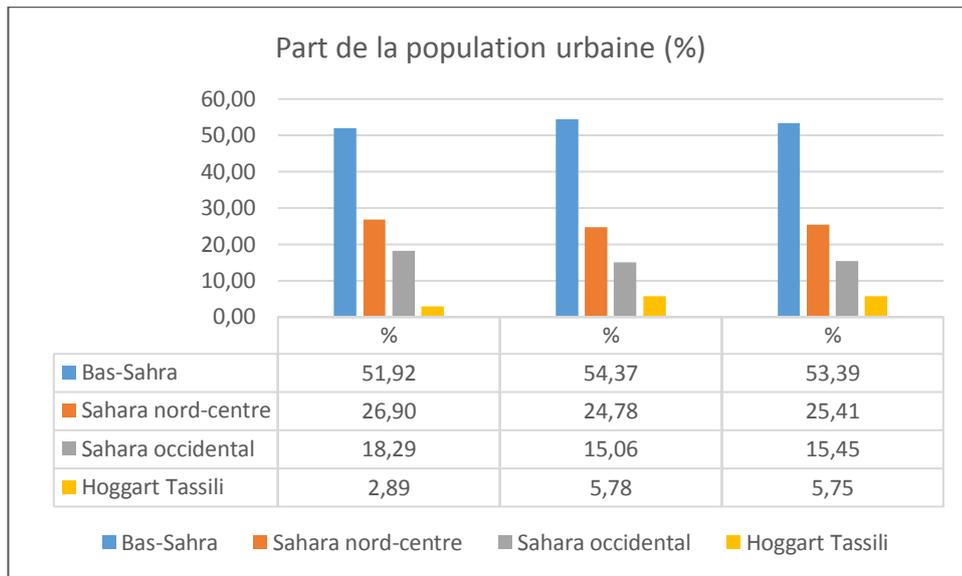


Figure VI-4 : Part de la population urbaine par sous-ensemble (1987-1998-2008)

Auteur d'après (ONS, 2011)

Le Bas-Sahara algérien concentre depuis longtemps la grande partie des citadins sahariens. Les centres urbains de cette partie « nord-saharienne » ont gardé leurs poids démographiques de par leurs historiques, mais aussi par leur positions dans l'organisation territoriale comme étant des pôles de commandement et polarisation spatiales. La figure précédente illustre la répartition spatiale de la population urbaine saharienne sur les quatre sous-ensembles composant le Sahara algérien entre 1987 et 2008. La population urbaine a pratiquement gardé la même répartition le long de ces dernières décennies avec faible variation. La grande part est attribuée au Bas-Sahara avec des pourcentages variant de 52 % à 54 %, les villes du Nord-centre du Sahara viennent en second rang avec des parts de population urbaine variant entre 25 % et 27 %, en troisième rang on trouve le Sahara oriental avec des pourcentages variant de 15 % à 18 %, les centres urbains du grand domaine du Hoggart et Tassili abritent une part minime de population citadine qui s'est évoluée de 3 % à 6 % : une notable augmentation est à souligner pour cet immense domaine désertique (figure VI-4).

Cette urbanisation concentrée est la résultante de plusieurs facteurs, parmi lesquels on peut citer :

- L'exode rural traduit, comme d'ailleurs, par la migration des populations habitant les petits centres oasiens pour s'installer en villes, en conséquence de l'attractivité de celles-ci contre la dégradation des conditions de vie qu'ont connue les petites oasis au cours du XX^e siècle. À cet exode s'ajoute le phénomène de sédentarisation des nomades qui est une forme particulière d'exode rural en périphérie des grandes villes. La population nomade a enregistré une diminution assez brutale de son effectif depuis la deuxième moitié du XX^e siècle. Par rapport aux autres régions du Grand Sahara, ce phénomène est quasiment achevé au Sahara algérien ;

- la migration des populations du nord du pays, à titre de cadres, fonctionnaires, commerçant ou professions libérales, notamment vers les grands centres suite aux programmes d'investissement et d'intégration du Grand Sud dans les politiques du développement national ;
- le croit naturel a ainsi joué un rôle important, compte tenu de l'importance du taux de fécondité qui d'une manière globale, demeure plus élevé par rapport au nord du pays. La même constatation est soulevée quant aux tendances récentes de ralentissement enregistrées au niveau national (Côte, 2005).

VI.2. Une structuration en mini réseaux

Un réseau urbain se rapporte globalement à un ensemble cohérent de centres urbains qui sont fonctionnellement organisés et hiérarchisés : « *par réseau urbain, l'on entend un ensemble cohérent de villes ayant des étroits entre elles, liens de complémentarité, de dépendance ou de commandement, et coiffées par une ville mère* » (Côte, 2005). Il est vrai que les dynamiques urbaines sahariennes sont inscrites dans une logique nationale, mais avec des spécificités géographiques, climatiques et socioéconomiques. En effet, le Sahara algérien est maillé en sous-réseaux nettement définis et délimités. Il s'agit d'un ensemble de réseaux oasiens dont la configuration et l'organisation spatiale sont la résultante de la combinaison de facteurs géomorphologiques, historiques et aussi hydrographiques. L'organisation sociale est ainsi un élément déterminant de l'identité de ces « petits pays » : le M'Zab, la Saoura, le Gourara, le Touat, etc. À l'intérieur de ces sous-systèmes, le réseau urbain est plus dense et les établissements humains sont très proches. Par contre, à l'extérieur de ces territoires, les distances entre ces « grappes » sont plus grandes. L'hydrographie qui a permis le développement de systèmes hydriques appropriés avec des modes d'organisation sociale ainsi appropriés a permis ces structures agrégées dont les dynamiques socioéconomiques sont animées par une ville mère. Ces villes constituent en effet les sommets des réseaux actuels.

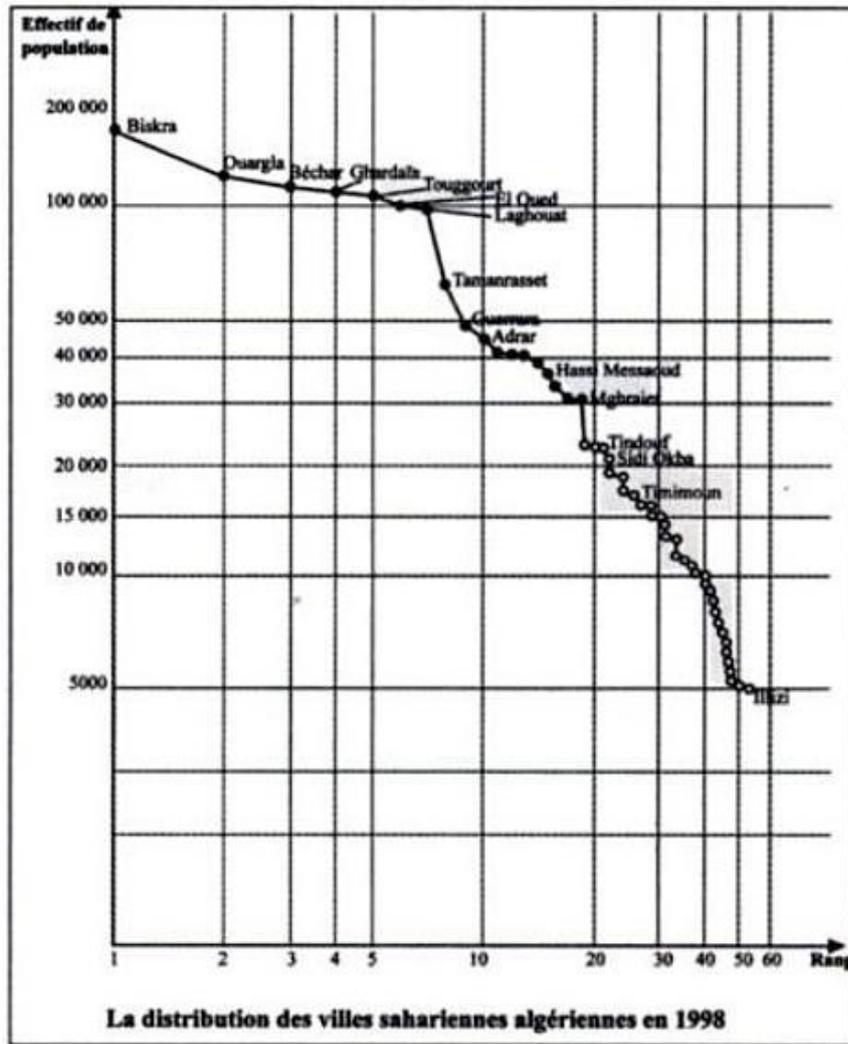


Figure VI-5 : Classification (classement) des villes du Sud algérien en 1998

Source : (Côte, 2005)

Quant au Bas-Sahara algérien, trois réseaux se présentent occupant des dépressions bien délimitées et organisées avec des structures spatiales parfaitement intégrées : « *réseau de petite taille, aux capitales modestes à l'échelle nationales, mais réseaux véritables, denses, maillés, hiérarchisés* » (Côte, 2005).

Le premier réseau est celui des « Ziban » dont la capitale est Biskra, et qui se conforme pratiquement avec l'actuelle wilaya de Biskra aux piémonts des Aurès et des monts du Zab. Un territoire d'une cinquantaine de localités, typiquement organisées autour d'une capitale localisée dans une position centrale entre le Zab Gharbi et le Zab Chergui, avec la présence de part et d'autre de deux grands centres d'appui : Tolga et Ouled Djellal à l'ouest, Sidi Okba et Zeribet à l'est. Le second réseau correspond à la vallée d'Oued Rirh, une vallée longitudinale renfermant une trentaine de centres, chapeautés par Touggourt qui est localisée au sud dans une situation relativement excentrée par rapport à la vallée, mais dotée au nord par Djemaa et El Mghaier. Néanmoins, cet ensemble spatial

ne se conforme pas avec le partage administratif de l'année 1984. Ce dernier découpage administratif a divisé cette entité homogène entre deux territoires administratifs : la partie nord de la vallée est annexée à la wilaya d'El-oued, tandis que la partie sud est restée intégrée à la wilaya de Ouargla. Le troisième réseau correspond au pays du Souf, un réseau plus ramassé et plus dense englobant une soixantaine de centres. El Oued en est la capitale, elle est positionnée à la croisée des deux axes routiers structurant l'ensemble du territoire soufi (RN° 16 et RN° 48). Ce réseau dense intègre aussi d'autres localités positionnées sur les marges comme Taleb El-Arbi sur les frontières est, Still sur la route nationale n° 03, et d'autres localités agricoles comme Mrara et El Hamraïa (Côte, 2005).

VI.3. Une urbanisation à deux strates

Un autre aspect caractéristique de l'urbanisation au Sahara peut être révélé en analysant l'évolution de l'armature urbaine à partir des derniers recensements de la population. L'analyse de la répartition hiérarchique des agglomérations urbaines, basée sur la lecture de la courbe de *Zipf* qui est relative à la loi « rang/taille » et illustrée dans la figure (figure VI-5), distingue trois catégories d'agglomérations avec un remarquable écart entre ces catégories :

- la première catégorie correspond aux grandes villes dépassant le seuil de 100 000 habitants. Cette catégorie regroupe un ensemble homogène de villes, compte tenu de leurs tailles et leurs fonctions au niveau du Sahara algérien. Selon le RGPH (2008), ces villes sont classées dans la strate de l'« Urbain Supérieure (US) ». Parmi ces villes, on peut citer Biskra, Ouargla, El Oued, Ghardaïa, Béchar, Touggourt et Laghouat ;
- une deuxième catégorie se rapportant aux villes moyennes, dont les populations varient entre 30 000 et 100 000 habitants. Cette catégorie est pratiquement moins marquée sur la courbe par rapport aux grandes villes en raison du faible nombre qu'elles présentent. Les villes d'Arar, El Goléa, Tolga, Ouled Djellal en font partie ;
- la dernière catégorie est celle des petits centres qui comptent moins de 30 000 habitants. Il s'agit d'un important continuum englobant petites villes, villages et bourgs. Cette catégorie constitue un niveau assez représenté à l'échelle du Sahara compte tenu du nombre important de centres qu'elle présente.

La courbe de *Zipf* montre ainsi une nette représentativité des deux catégories des extrêmes : celles des grandes villes et celles des petits centres. Il s'agit là donc d'une structuration à deux niveaux urbains, qui est d'ailleurs caractéristique générale de l'ensemble du Sahara algérien.

La même logique de structuration peut être reproduite au Bas-Sahara. La répartition des agglomérations urbaines selon leurs poids démographiques, pour chacun des sous-ensembles du Bas-Sahara, montre la même réalité (figure VI-6).

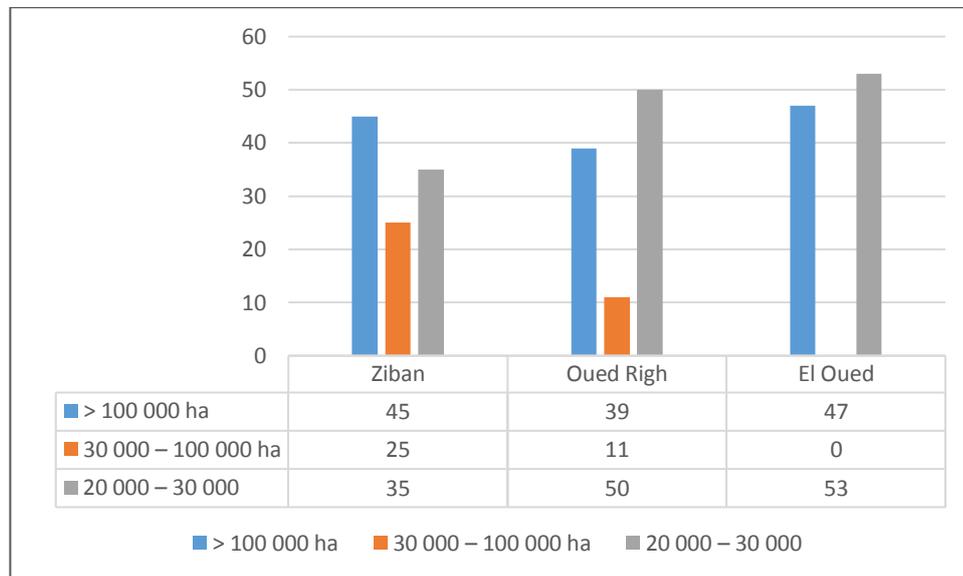


Figure VI-6 : Répartition des agglomérations urbaines selon leurs poids démographiques.

Source : Auteurs d’après (Côte, 2005 ; RGPH, 1998)

Les données illustrées dans la figure précédente montrent que les deux catégories d’extrêmes, celle des grandes villes et celle des petits centres, représentent la part la plus importante avec un total de 75 % enregistré au Ziban, 89 % à Oued Righ et 100 % à El Oued, contre une faible présence de la catégorie médiane qui regroupe les villes moyennes.

Cette urbanisation d’extrêmes peut s’expliquer, d’une part, qu’elle vienne d’une logique historique définissant globalement deux sortes de fonctions : des pôles de commandement et des petites localités servant comme centres d’appui. Historiquement, les actuelles grandes villes correspondent aux anciennes villes-oasis qui polarisèrent et commandèrent le commerce transsaharien, des villes où se localisent les marchés et où se sont hébergés les commanditaires et les élites socioéconomiques. Les petites localités, quant à elles, correspondent aux villages-oasis qui assurent la fourniture aux villes mères et jouent aussi un rôle de dotation et d’appui des caravanes en matière de ravitaillement, eau, main-d’œuvre, etc. D’autre part, l’organisation spatiale caractérisant généralement les pays oasiens ne permet pas le développement de villes moyennes ou intermédiaires, en raison des tailles réduites de ces réseaux oasiens. La ville mère commande directement l’ensemble des petits centres. Une exception concernant la ville de Tolga est à noter à ce titre. Cette ville qui jouit d’une position avantageuse au Zab Gherbi tend à s’imposer comme ville moyenne chapeautant son propre territoire (Côte, 2005).

VI.4. Le Bas-Sahara algérien : des traits de représentativité et de particularité saharienne

Tous les traits caractéristiques vus précédemment, notamment la situation septentrionale, l'hyperaridité climatique, l'urbanisation enracinée et les dynamiques historiques d'échange et de transaction attribuent au Bas-Sahara algérien une certaine représentativité : « *Pour tous ces traits, le Bas-Sahara est très représentatif de l'ensemble du Sahara, algérien ou global... Climatiquement, le Bas-Sahara et ses villes sont pleinement sahariennes. Rationnellement, ils constituent "une porte" du Sahara, suivant le vieux terme des caravaniers* » (Côte, 2005).

VI.4.1. La situation en marges septentrionales

Les pays du Zab, Oued Righ, Oued Mya et Oued Souf appartiennent au bassin du Bas-Sahara. Une grande dépression qui marque ses limites nord aux pieds des chaînes montagneuses des Aurès, du Zab et des Nemamchas et s'étend sur une vaste surface allant jusqu'au Sud tunisien. De par cette position, le Bas-Sahara constitue donc la zone frontalière nord du Sahara : « *ce sont, lorsque l'on vient du tell algérien, les 300 premiers kilomètres d'un désert qui a 2000 km de profondeur* » (Côte, 2005). Cette position de voisinage avec le Tell lui a donné, depuis longtemps, l'opportunité de tirer part des dynamiques socioéconomiques et de s'intégrer dans un espace de relations étroites avec les régions du nord.



Figure VI-7 : Le Bas-Sahara algérien

Source : (Côte, 2005)

Le Bas-Sahara a donc bénéficié non seulement de ses potentialités hydriques, mais aussi de sa proximité au Tell pour demeurer pendant plus de deux millénaires le territoire le plus peuplé et le plus urbanisé du Sahara. La région des Ziban, grâce à cette situation de voisinage, a pu avoir un grand essor dans le domaine de maraîchage. Par la même, Biskra demeure la ville la plus grande dans le Sahara algérien : *« si l'agriculture des Ziban a connu un tel boom dans le domaine du maraîchage, elle le doit à ses possibilités d'écoulement vers les marchés de grandes consommation du Nord proche. Si Biskra est aujourd'hui la ville la plus grande du Sahara algérien, elle le doit largement à sa position de contact Tell/Sahara, qui a vu affluer populations montagnards comme populations sahariennes »* (Côte, 2005).

VI.4.2. La relative concentration de population et d'activités

Le caractère le plus global que peut porter le Sahara est sa faible densité démographique. Néanmoins, la cartographie de la répartition spatiale des populations permet de révéler que le Bas-Sahara concentre d'une manière relative plus de densité et de centres humains par rapport au reste des pays sahariens. Les villes du Bas-Sahara concentrent environ de 54 % de la population urbaine habitant le Sahara algérien. Un poids démographique assez considérable est à attribuer donc aux Bas-Sahara.

Cette concentration de population cependant constatée sur une surface minime par rapport au total du Sahara s'explique, d'une part, par la localisation septentrionale du Bas-Sahara, favorable aux contacts et aux échanges sur les frontières nord du Sahara algérien, et d'autre part, par la configuration géomorphologique des pays oasiens, qui a permis depuis longtemps le peuplement de cette région saharienne.

VI.5. Une urbanisation qui pèse sur l'environnement

D'une règle générale, l'urbanisation contemporaine est constatée génératrice de multitudes de problèmes avec des formes multiples. Les territoires accueillant ses dynamiques de croissance urbaine se trouvent soumis aux forces de pression menant généralement à l'altération des paysages et au déséquilibre des écosystèmes. Quant au Bas-Sahara algérien, les répercussions de ces dynamiques sont plus manifestées en raison, d'un côté, de la fragilité du milieu, et d'un autre côté, du rythme accéléré de cette urbanisation. En plus des problèmes constatés à l'échelle nationale qui sont généralement liés aux problématiques de gestion de l'espace urbain et à la planification de son évolution, les villes Bas-Sahariennes confrontent également d'autres problèmes particuliers, liés notamment aux spécificités topographiques et hydrographiques caractérisant le Bas-Sahara. L'ensemble de la région est en face à de véritables risques naturels, dont la remontée des eaux souterraines, les inondations, les risques éoliens en sont les majeurs.

VI.5.1. La remontée des eaux souterraines : un risque menaçant toute la biocénose

Si la genèse des villes sahariennes est historiquement liée à la présence de l'eau, et que les communautés oasiennes ont pu développer des systèmes d'irrigations assez géniales leur permettant de se subsister et même de se prospérer pendant des milliers d'années, la récente explosion démographique enregistrée ces dernières décennies a bouleversé les rapports de ses sociétés à leurs espaces. L'eau, originellement perçue comme contrainte environnementale entravant l'extension des oasis, compte tenu de sa rareté et des techniques limitées de son exploitation, est devenue actuellement une opportunité favorisant la vulgarisation des exploitations agricoles, et permettant aussi le déploiement des réseaux d'alimentation en eau potable en milieux urbains en réponse à la demande croissante des populations (Bensaad, 2011 ; Kouzmine, 2012).

Toutefois, la spectaculaire croissance démographique qu'a connu les villes du Bas-Sahara algérien, d'où la population y résidante s'est multipliée par plus de 20 fois, s'est accompagnée d'une remarquable augmentation de la demande en eau potable avec la généralisation d'un nouveau mode de vie qualifié comme consommateurs d'eau. La symbiose historique caractérisant l'espace oasien, qui est bien fondée sur la trilogie écosystémique eau, palmeraie et habitat, n'est plus actuellement en conséquence, d'une part, de l'émergence de nouveaux modes de vie en accompagnement avec l'étalement des tissus urbains et, d'autre part, l'introduction de nouveaux systèmes hydroagricoles basés notamment sur l'extraction massive des eaux souterraines avec des débits ainsi considérables à la suite de la découverte des immenses réserves emmagasinées au niveau du continental intercalaire (CI) au début du XX^e siècle (Côte, 1998a).

VI.5.2. L'expansion d'un système hydraulique fermé

Le Grand Sahara, à l'image des régions arides, englobe un ensemble de systèmes hydrauliques fermés dont les hydrographies sont toutes de formes endoréiques : « *chaque bassin ou sous-bassin constitue une entité autonome avec plancher imperméable et seuil entre bassin* » (Côte, 1998a). Le système traditionnel présente un circuit fermé, dont l'équilibre entre eau apportée et eaux évacuées est naturellement assuré. Les eaux utilisées provenant principalement de la nappe phréatique trouvent leurs rejets dans les puis abandonnés pour les eaux usées domestiques, et dans les endroits d'épandage après utilisation agricole. La partie non évaporée s'infiltré pour s'ajouter à la nappe phréatique, ce qui lui permet de garder naturellement la stabilité de son niveau pendant longtemps : « *entre volume apporté et volume évacué, un équilibre s'établit sur le long terme, et le niveau de la nappe phréatique reste stable* » (Côte, 1998a). Cependant, la mobilisation des grands aquifères a provoqué un déséquilibre à ce système. Les forts débits intégrés dans ce système fermé permettent l'introduction de grandes quantités d'eau dans le circuit sans que celles-ci soient retournées en

profondeur ou même évacuées au-delà du bassin hydraulique. C'est la nappe phréatique qui va recevoir en permanence ces évacuations, qui au fur et à mesure se trouve gonflée (figure VI-8), en conséquence : « le niveau de la nappe phréatique s'élève, finit par être proche de la surface où elle menace culture ou habitations. Il est des cas où elle finit par affleurer, révélant au grand jour un déséquilibre écologique » (Côte, 1998a).

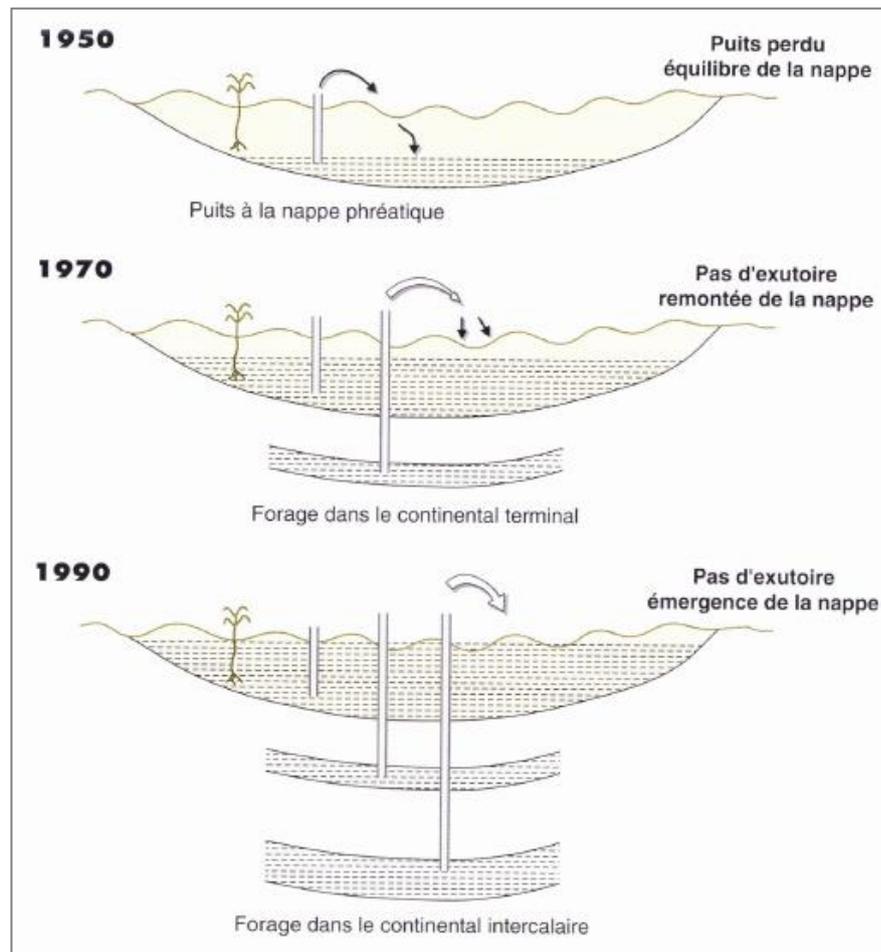


Figure VI-8 : Remontée du niveau de la nappe phréatique

Source : (Côte, 1998b)

En décrivant la situation actuelle de crise, Côte (1998a) a indiqué que : « Le système traditionnel fonctionnait en circuit fermé, avec des débits limités. Les forages profonds ont introduit des entrées supplémentaires sans qu'aucune sortie n'ait été prévue. Le système est aujourd'hui perturbé ». Les conséquences de cette remontée défavorisée sur tous les plans ne se limitent pas seulement aux zones urbanisées et leurs palmeraies, elles touchent également et avec plus d'accentuation les oasis rurales qui subissent les répercussions des choix d'aménagement non appropriés à ces régions fragiles : « C'est en ville que se font les décisions. C'est d'abord pour les besoins urbains que les forages sont réalisés ; mais c'est à l'espace agricole que l'on demande d'absorber le surplus à évacuer. Les

ruraux assistent impuissants à l'engorgement de leurs terrains, dont sont responsables principalement les rejets urbains » (Côte, 1998a).

Le constat est alarmant sur l'ensemble des oasis : égorgeement des palmiers et risque d'effondrement des constructions, ainsi que les problèmes de pollution liés aux stagnations des eaux.

VI.5.2.1. L'Oued Righ

Le recours aux aquifères profonds à l'Oued Righ est ancien. Il remonte à la période coloniale, notamment à partir de la deuxième moitié du XIX^e siècle. Dès cette période, les forages profonds se sont anarchiquement multipliés : près de 2000 forages sont recensés dans les années 60. Étant donné que la topographie de l'Oued Righ n'est pas assez convenable pour assurer l'évacuation des eaux usées, il s'agit là d'une « *gouttière topographique surbaissée et peu efficace* » (Côte, 1998a), le pompage excessif des eaux a progressivement conduit à l'engorgement des palmeraies, la salinisation du sol par remontée capillaire et aussi à la présence d'eaux stagnantes dans les bas-fonds.

Les palmeraies ont subi directement les conséquences de cette utilisation irrationnelle des ressources hydriques. D'un côté, toute la culture sous arbres a été disparue en conséquence de la salinisation du sol ; d'un autre côté, les arbres eux-mêmes se sont trouvés menacés avec le rapprochement progressif du niveau de la nappe phréatique. Ce phénomène est plus accentué dans la région basse d'Oued Righ (le bas Oued Righ), initialement favorisée par l'artésianisme ; mais le haut Oued Righ au sud a aussi subi les conséquences. À Touggourt : « *le vieux Ksar de Mestaoua a vu ses fondements menacés par la nappe qui, sous la ville était moins de 2 m de profondeur* » (Côte, 1998a). En réponse à ces risques menaçant la première région « dattière » en Algérie, les autorités ont procédé à deux mesures à partir des années 1970 : une compagnie de remplissage des puits abandonnés et la réalisation d'un long drain de 150 km (figure VI-9) permettant l'écoulement des eaux usées vers le chott Mérouane (Bouchahm et al., 2013 ; Côte, 1998a).

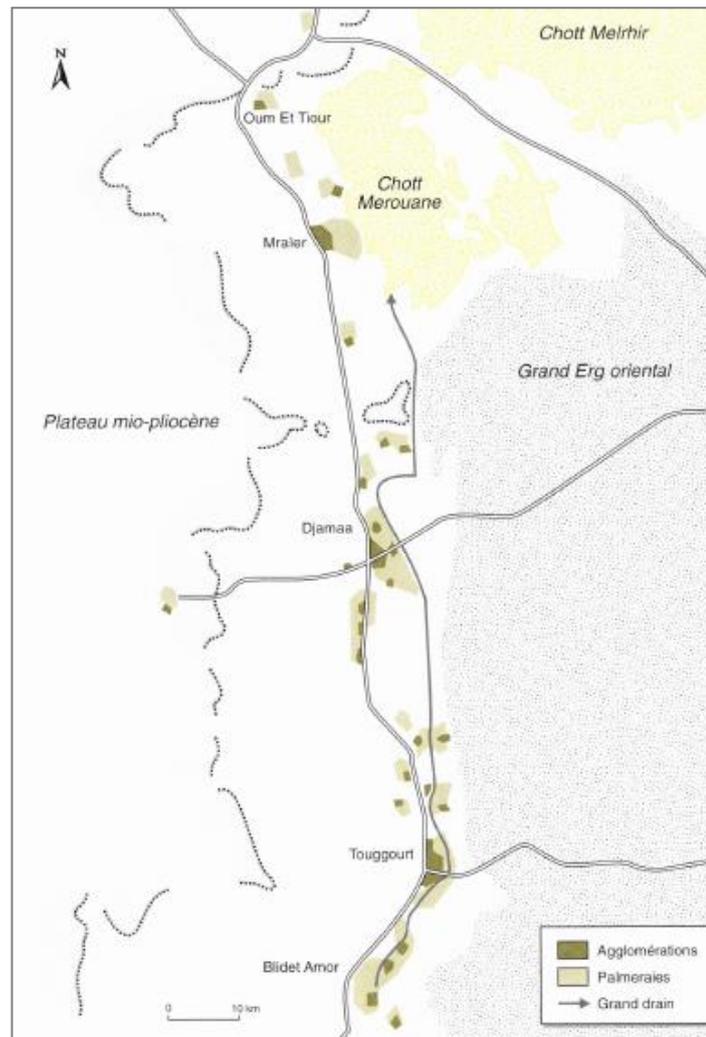


Figure VI-9 : Le drain d'Oued Righ

Source : (Côte, 1998b)

Ce canal a vu le jour en 1984 avec une évacuation de $17 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces solutions sont avérées efficaces en premier temps, mais l'apparition des problèmes liés à l'entretien du canal de drainage et l'implication, par la suite, des eaux du continental intermédiaire par la multiplication des forages profonds n'ont fait que repousser encore la remontée des eaux souterraines conduisant à l'apparition de nouveaux lacs (figure VI-9).

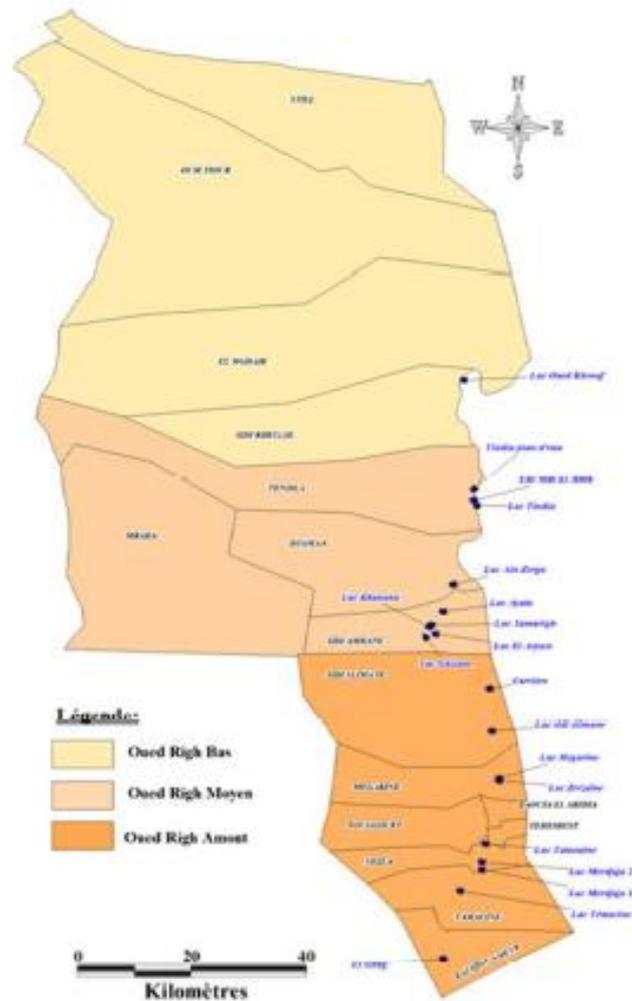


Figure VI-10 : Localisation des sites de remontée des eaux dans la vallée d’Oued Righ

Source : (CRSTRA, 2011 in Bouchahm et al., 2013)

De nos jours, une vingtaine de lacs apparus, en conséquence de la remontée des eaux usées, a été recensée avec présence permanente des eaux superficielles et une salinité variant de 6 à 70 g/l. Ces lacs constituent actuellement une source de contamination des eaux souterraines (Bouchahm et al., 2013). Le tableau qui suit (tableau VI-5) illustre cette situation.

| Sites | Commune | Périmètre (Km) | Superficie (Km ²) | Type d'alimentation | Perennité |
|-------------------|--------------|----------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| El Goug | Blidet Aneur | 3.60353 | 0.593893 | ED+ER | Selon la saison |
| Lac Témacine | Témacine | 0.960574 | 0.038363 | ED +EU + ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Merdjaja 1 | Nezla | 1.60488 | 0.0308611 | ED+ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Merdjaja 2 | Nezla | 0.535001 | 0.0171195 | ED+ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Tataouine | Nezla | 0.308227 | 0.00482274 | EU + ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Megarine1 | Megarine | 1.3354 | 0.0335897 | ED+ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Zerzaine | Megarine | - | - | ED+ER | Existence sur toute l'année |
| Lac sidi slimane1 | Sidi Slimane | 0.238062 | 0.00426276 | ED+ER | Existence sur toute l'année |
| Lac sidi slimane2 | Sidi Slimane | 0.703517 | 0.0332348 | ED + EC +ER | Existence sur toute l'année |
| carrière1et 2 | Sidi Slimane | 0,529102 | 0,01079286 | ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Tamarigh | Sidi Amrane | 0.104078 | 0.000840941 | ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Khanana | Sidi Amrane | 0.151011 | 0.00173342 | ER | Existence sur toute l'année |
| Lac El Aryass | Sidi Amrane | 0.208439 | 0.00329252 | ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Ghilane | Sidi Amrane | 0.166637 | 0.00217117 | ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Ayata | Sidi Amrane | 3.15543 | 0.48249 | ED +EU + ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Ain Zerga | Téggidine | 0.190032 | 0.00271672 | ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Sidi El Abed | Tindla | 0.926515 | 0.037291 | ED+ER | Existence sur toute l'année |
| Lac Tindla | Tindla | 36.9023 | 26.2089 | EC+ER | Selon le niveau du Canal |
| Tindla plan d'eau | Tindla | - | - | ED + ER | Selon la saison |
| Oued Khrouf | El Mghaier | - | - | EC | Existence sur toute l'année |

EC : Eau du canal principal
 ER : Eau issue de la Remontée
 ED : Eau de drainage
 EU : Eaux usées

Tableau VI-5 : Propriétés des lacs témoignant la remontée des eaux sur l'ensemble d'Oued Righ.

Source : (CRSTRA, 2011, d'après Bouchahm et al., 2013)

VI.5.2.2. Ouargla : une cuvette favorable à la stagnation des eaux

L'oasis de Ouargla, qui contient l'une des plus importantes palmeraies d'un seul tenant, présente une configuration particulière. L'ensemble de l'oasis est implanté sur un bas-fond de cuvette, les palmeraies occupent une butte entourée d'une sebkha semi-circulaire. Cette configuration fait du site de Ouargla un milieu favorable à la salinisation et à la stagnation des eaux : *« la ville d'Ouargla, installée avec ses palmeraies au fond d'une cuvette en zone désertique, constitue un lieu idéal pour l'accumulation et la stagnation des eaux. Le milieu naturel évolue rapidement vers des conditions de salinité et d'hydromorphie excessives en raison d'une aridité permanente, ainsi que d'une nappe superficielle excessivement salée et de faible profondeur. La cuvette d'Ouargla représente, par*

conséquent, un contexte écologique particulièrement fragile. La gestion de ses ressources hydriques doit être menée avec beaucoup de soins et de prudence » (Idder et al., 2012).

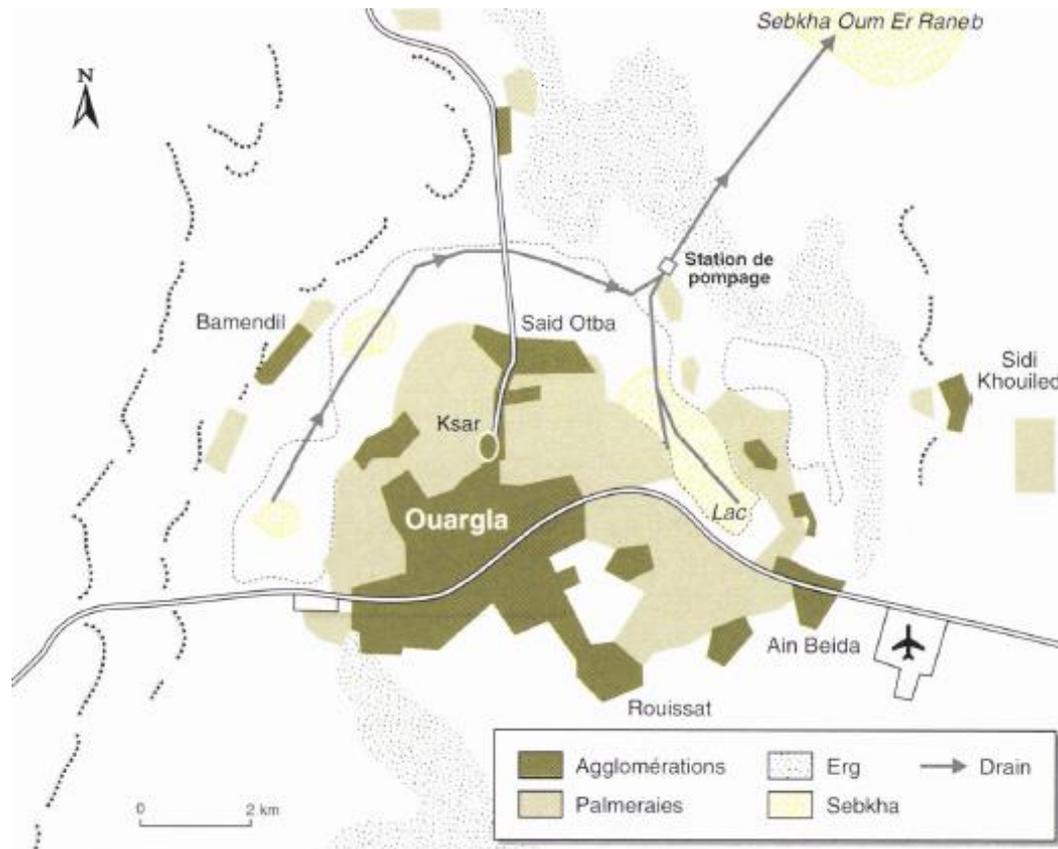


Figure VI-11 : La cuvette de Ouargla

Source : (Côte, 1998a)

À son origine, cette oasis est irriguée par un système artésien, à l'image de l'Oued Righ. La mise en œuvre de forages profonds a permis l'élargissement de la palmeraie, mais l'augmentation en même temps des eaux usées sans prévision de système d'évacuation. Ce qui a conduit à la montée des eaux et la formation de véritables lacs à l'est de la ville (figure VI-12) : « Dans l'agglomération, d'énormes mares d'eaux usées stagnent en permanence dans les quartiers populaires. En saison chaude, ces mares se transforment en de véritables nids à moustiques et autres insectes nuisibles. Dans les palmeraies, la situation n'est guère meilleure. Car, les drains sont mal organisés et leur hiérarchie est souvent aléatoire. À cette mauvaise organisation, s'ajoute un manque flagrant d'entretien. Le réseau est souvent délaissé. Les mauvaises herbes prolifèrent, gênent ou obstruent, parfois totalement, les écoulements. Les eaux stagnantes, qui en découlent, provoquent l'engorgement et le dépérissement de ces palmeraies » (Idder et al., 2012). Devant cette situation « de crise », les autorités locales ont procédé en premier lieu à la réalisation d'un système de drainage. Cette solution est parue peu efficace, les travaux ont alors été repris, à la fin des années 90, pour la

réalisation d'un système de drainage doté d'une station de pompage à fin de permettre l'écoulement des eaux usées vers la sebkha d'Oum Er Raneb.



Figure VI-12 : Engorgement et disparition d'une palmeraie à Ouargla

Source : (Idder et al., 2011)

Un autre problème d'ordre qualitatif s'est ainsi imposé. Il s'agit de la qualité des eaux mobilisées autant pour l'activité agricole que l'usage urbain et domestique. La réalisation des forages profonds a généré de nouveaux problèmes que la communauté habitante n'a pu l'appréhender que tardivement. L'approfondissement des puis des forages nécessitait la traversée d'une considérable couche salifère, ce qui a causé deux sortes de problèmes : la salinisation des eaux pompées et l'apparition d'immenses cavités au niveau de la couche salifère à la suite à sa dissolution partielle. Ces incidents sont en effet le résultat de la corrosion et la dégradation des tubages à cause de l'agressivité des couches de sel avec laquelle les tubages sont mis en contact permanent : « *Les eaux de la nappe phréatique sont de très mauvaise qualité et s'opposent à tout usage agricole. Leur conductivité électrique dépasse 70 ms/cm dans certains endroits de la cuvette* » (Idder et al., 2012). Ce constat a amené les décideurs à agir pour la réduction de cet incident en se procédant à la suppression des forages situés à l'intérieur de la cuvette de Ouargla.

Un nouveau projet visant à améliorer cette situation a été lancé au début des années 1990. Il s'agit de la réalisation d'un drain collecteur traversant la sebkha permettant l'évacuation des eaux usées vers la grande sebkha d'Oum Er Raneb, une dépression de 800 ha située à l'est de la cuvette. Malgré que cette solution a permis en premier temps le rabattement des eaux souterraines notamment dans les parties traversées par le canal. L'accumulation progressive des eaux usées a conduit à

l'engorgement presque total de cette cuvette. La formation de ce nouveau lac stagné génère d'importantes nuisances à savoir : Le retour des eaux vers les palmeraies ; les débordements des eaux sur la voie publique ; les problèmes olfactifs ainsi que la prolifération des anophèles porteurs du paludisme : *«Le site de rejet cause d'importantes nuisances. L'ampleur est devenue sans commune mesure du fait de l'accroissement considérable des effluents. Cet exutoire constitue une véritable menace écologique pour l'oasis d'Ouargla »* (Tahar Idder et al., 2012).

Pour régler de nouveau cette situation persistante, les autorités locales ont opté pour le choix d'un autre site de rejet : la sebkha Safiouna. Il s'agit d'une grande cuvette (10 000 ha) située à une quarantaine de kilomètres au nord de l'oasis. Ce site semble mieux adéquat pour le rejet des eaux domestiques et agricoles, compte tenu de son éloignement et de sa vaste étendue, surtout que cette solution est accompagnée par des mesures de requalification et de remise en état du réseau d'assainissement avec l'installation des stations d'épurations (Seidl et al, 2006 ; Idder et al, 2000). Cette solution constitue une alternative plus durable qui permet de recevoir et d'évaporer des volumes importants d'effluents avec moins de répercussions sur l'ensemble de l'oasis. De grands investissements ont été dispensés en conséquence de la non-prise en compte des contraintes environnementales particulières caractérisant les bassins fermés dans les choix des modes de développement urbain.

VI.5.2.3. Les Ziban

La configuration des oasis du Ziban se présente en deux bandes parallèles en décalage d'altitude : celle de l'amont, au nord, regroupant les oasis du piémont qui sont irriguées par une série de sources ; celle de l'aval, au sud, englobant les oasis de plaines qui sont irriguées par une autre série de sources. L'alimentation des palmeraies des deux ensembles en eau d'irrigation est faite à travers des canaux se prolongeant depuis ses sources sur des longueurs de dizaines de kilomètres. Le recours aux forages avec des débits assez forts par rapport à ceux des sources traditionnelles, à l'image des autres pays bas-sahariens, a permis l'extension des palmeraies de manière assez considérable, ce qui fait appel au pompage de grands volumes d'eau sans prendre en compte leur assainissement. Comme conséquence naturelle, l'évacuation des eaux usées des « hautes » oasis est opérée au détriment des « basses » oasis, par gravité : *« les eaux usées des palmeraies du piémont s'écoulent lentement vers l'aval, ou elles vont engorger la nappe qui remonte au droit des palmeraies d'aval. Le déséquilibre a été révélé lors des grandes pluies de 1969, provoquant de graves inondations dans la région : l'eau, le sel, le diss (*Ampelodesma mauritanicum*) et le tamaris envahi toutes les palmeraies et, depuis cette date, ne les ont pratiquement plus quitté. Alors que les palmeraies d'amant prospèrent, celles d'aval périclitent »* (Côte, 1998a).

Devant cette situation, plusieurs mesures ont été prises. Un premier projet a été mis en place consistant à la réalisation d'un canal longitudinal ouest-est de drainage, suivi par la réalisation d'une série de cinq collecteurs transversaux permettant le rejet des eaux usées au niveau d'Oued Djedi, sur une longueur totale de 48 km (Côte, 1998a).

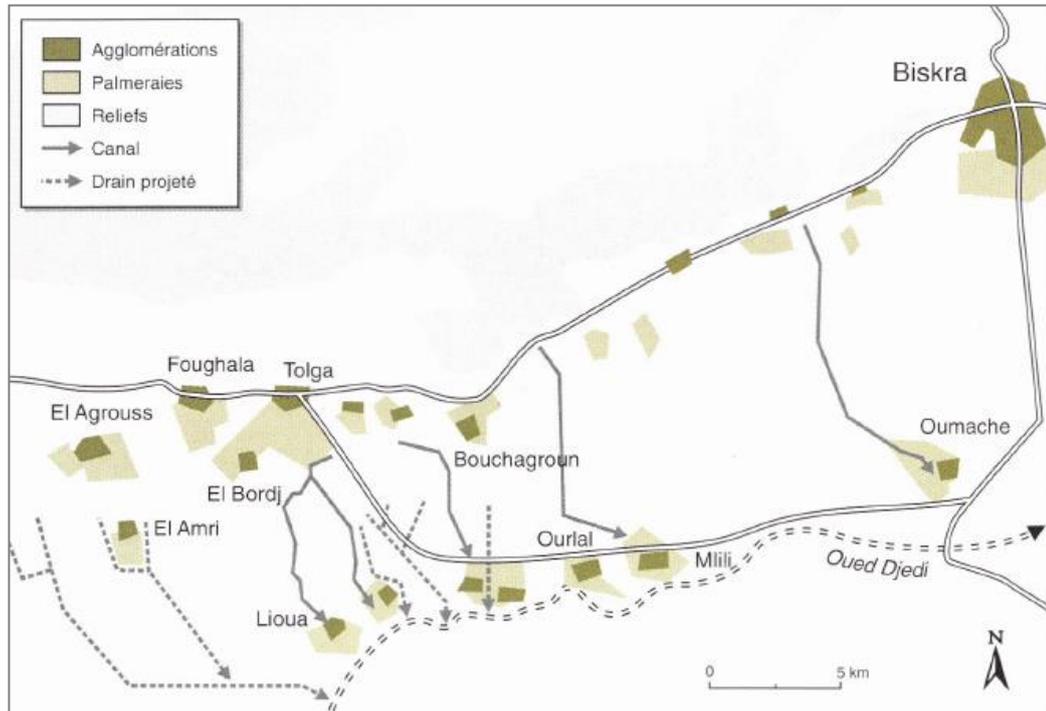


Figure VI-13 : Le pays des Ziban

Source : (Côte, 1998a)

VI.5.2.4. Le pays d'Oued Souf

Au pays du Souf, le problème de la remontée des eaux est d'emblée, compte tenu de sa rapidité et de l'amplitude de son impact sur l'écosystème « soufi ». La surexploitation des aquifères profonds avec une gestion moins maîtrisée de cette ressource abondante a engendré de véritables problèmes mettant l'activité économique et l'originalité du paysage en péril. Le tissu bâti n'a pas ainsi échappé des conséquences néfastes de cette remontée du niveau piézométrique, dont le risque d'effondrement des fondations des constructions et les risques sanitaires issus de la stagnation des eaux en sont les principales.

Le paysage agroéconomique de cette région trouve son originalité particulièrement dans le système de « Ghout ». Il s'agit d'une vaste excavation au fond de laquelle s'est effectuée la plantation des palmiers dattiers. Ce système permet le rapprochement aux eaux de la nappe phréatique depuis laquelle les arbres peuvent s'irriguer directement à travers leurs racines. Cette technique, reflétant

l'ingéniosité de l'homme soufi, est bien appropriée au milieu d'Erg, mais d'un autre côté elle est fragile parce qu'elle est étroitement liée au niveau de la nappe phréatique. L'abaissement ou la remontée de celle-ci peut causer la mort de la culture : faute d'insuffisance ou de trop d'eau. La mobilisation des eaux du Complexe Terminal (CT) depuis 1959, et du Continental Intercalaire (CI) depuis 1980 avec de grandes quantités en réponse aux besoins effrénés de la population croissante et de l'agriculture sans accompagnement de mesures d'assainissement, a conduit à la perturbation de l'équilibre de cet écosystème. Les eaux utilisées que ce soit par la ville ou par l'agriculture ne trouvent pas de chemin pour s'évacuer que de s'infiltrer en traversant le sol sableux pour rejoindre la nappe phréatique en participant à son gonflement (Côte, 1998a).

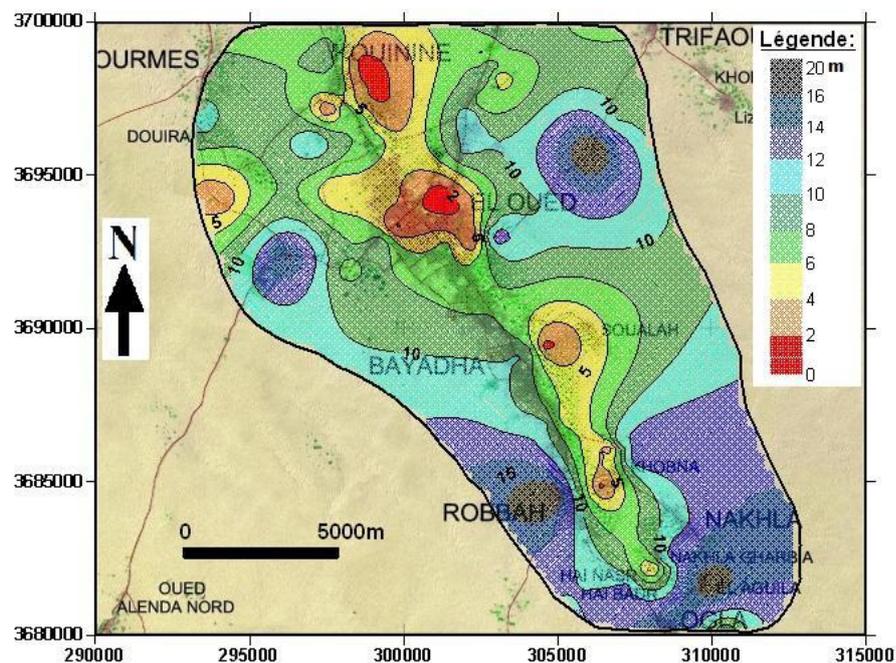


Figure VI-14 : Les profondeurs de la nappe phréatique dans le pays d'Oued Souf

Source : (Bouselsal et Kherici, 2014)

Les conséquences étaient néfastes, notamment sur l'épanouissement des Ghout. La ville d'El Oued est la première localité qui a vu la remontée des eaux avec le dépérissement des premiers Ghout en 1980. En 1993, l'engorgement a touché les Ghout appartenant au corridor Kouinine-Robbah. Sur 25 km de palmeraies, près de 600 Ghout étaient noyés et 60 000 palmiers sont morts selon Côte (1998a) qui, en décrivant la disparition d'un paysage séculaire, a mentionné qu'« *en une décennie, on assiste à la mort d'un paysage qui avait été élaboré par des générations de Soufis, au prix d'un travail énorme, et qui faisait la beauté de cet espace saharien. Or la [maladie] née de la ville en gagnant progressivement la campagne, se retourne aujourd'hui contre la ville* ». Ce n'est qu'à partir de cette date que les autorités ont commencé leurs investigations pour appréhender le phénomène. Depuis lors, une série de mesures a été prise pour lutter contre la remontée des eaux comme l'arrêt

d'attribution de nouveaux forages profonds en les remplaçant par des puits captant la nappe phréatique, et la restriction des extensions du réseau d'alimentation en eau potable (AEP) aux populations. Quoique ces premières mesures aient pu participer à la stabilisation du niveau piézométrique dans quelques localités, le phénomène demeure persistant notamment dans la partie sud de la région. En 2000, le constat recense 915 Ghouts inondés, dont 65 en milieux urbains, ainsi que 2100 autres en état humides (Ballais, 2005a).



Le Ghout: une particularité du système agricole du Souf



La mort d'un Ghout suite à la remontée des eaux usées dont la ville (au fond) est à l'origine

Figure VI-15 : Le Ghout du Souf : un système agricole en déclin

Source : (Côte, 1998a)

La première ville touchée par ce problème est bien celle d'El Oued, chef-lieu de wilaya, particulièrement les quartiers bas de la ville (Chott, Laâchache et Lamsaâba et la cité Sidi Mestour), d'où la nappe phréatique a enregistré une augmentation en continu de 60 à 80 cm par an (Bouselsal et Kherici, 2014). Ces quartiers se sont trouvés donc menacés. Ils ont aussi vécu l'affleurement des eaux souterraines et donc le risque de leurs inondations. Un autre problème aggravant ainsi la situation s'ajoute : la stagnation permanente des eaux usées a provoqué la pollution de la nappe phréatique « urbaine ». Tous les rejets urbains y participaient : « *les Ghouts ennoyés qui cernent la ville présentent une eau noirâtre et nauséabonde, qui incite la population à en faire autant de décharges sauvages. Et le cycle de pollution s'accroît ...* » (Côte, 1998a). Ainsi, un bon nombre de ces Ghouts engorgés a constitué un lieu préféré pour le développement des décharges illicites ou de l'habitat informel sur leurs bordures, ce qui pouvait engendrer des risques sanitaires. Sur ce point, Kouzmine (2012) a souligné que « *Le développement de décharge dans les [Ghouts] ennoyés a une incidence directe sur les conditions sanitaires de vie à proximité de ces lieux constamment humides, ainsi se développent des maladies ophtalmiques telles le glaucome ou le trachome* » (Kouzmine, 2012).

Pour faire face à cette situation, un grand projet de drainage vertical mobilisant un système de pompage des eaux usées a été lancé en 2011. Il s'agit de la réalisation d'une série de 58 puits au niveau des centres urbains, débitant une moyenne de 6l/s et reliés à un réseau de conduites d'une longueur totale de 34 km. Ce réseau devrait conduire les eaux drainées vers le Chott Hallouf par l'intermédiaire d'une station de pompage. Ce projet avait le but de maintenir le niveau de la nappe phréatique à 1m de profondeur au-dessous des bas-fonds des Ghouts (Bouselsal et Kherici, 2014).

VI.5.3. Les risques d'inondations : des aléas mal moins estimés

VI.5.3.1. Le géosystème

Dans une approche systémique, la compréhension des interactions entre le milieu naturel et l'activité anthropique peut être abordée à travers l'étude des géosystèmes. Le géosystème est un ensemble homogène, spatialement organisé, et composé d'éléments naturels et humains en interrelations. Il s'agit là d'un concept intégrateur et unificateur : « *Concept intégrateur, il inclut l'écosystème en prenant en compte, non seulement les interactions entre les systèmes vivants et leur environnement, mais plus largement, les interrelations entre le milieu biophysique et les activités des sociétés humaines. Concept unificateur, son objectif est en outre d'aborder de manière globale les rapports entre nature et société en s'appuyant sur une démarche systématique* » (Barrué-Pastor et Muxart, 1992). Le géosystème se distingue par l'interaction complexe des trois composantes : abiotiques (lithomasse, aéromasse et hydromasse), biotiques (biomasse, phytomasse), et des éléments de contact (sol et surfaces superficielles). Dans le cas des milieux arides, la plupart de ces éléments présentent des contraintes parfois entravantes au développement soutenable (Ballais, 2005b).

VI.5.3.2. Crues des oueds et inondations des bassins fermés : deux sortes d'inondations sahariennes

La vulnérabilité des villes du Bas-Sahara algérien peut être appréhendée à travers la caractérisation de leurs géosystèmes, notamment la composante abiotique dont l'agressivité est un élément déterminant, ainsi que des incidences qui peuvent être engendrées par les dynamiques urbaines sur la ville. Le Bas-Sahara, étant positionné en limite septentrionale du domaine hyperaride, est principalement exposé à deux sortes de contraintes : les inondations et le risque éolien. Le risque d'inondation, qui concerne pratiquement toutes les villes sahariennes, est généralement sous-estimé compte tenu de sa rareté. Deux sortes d'inondations peuvent être distinguées au Sahara algérien en fonction des propriétés qui peuvent particulariser chaque région : celles liées aux crues des oueds et celles liées aux inondations des dépressions bouclées (Ballais, 2005b).

L'un des principaux risques naturels majeurs que confrontent les agglomérations non seulement sahariennes mais la majorité des villes algériennes est celui des inondations. Il concerne particulièrement les établissements humains implantés aux piémonts des Atlas tellien et saharien, et aussi ceux occupant les basses plaines aux embouchures des oueds. Selon les organismes officiels, environ 600 localités sont considérées comme exposées aux risques hydrologiques, avec degrés variés (Azioune et al., 2018).

Quant au Bas-Sahara algérien, l'existence de plusieurs oueds descendant des monts des Aurès fait de ceux-ci une source majeure de risque du fait des crues qu'ils apportent à chaque tempête. L'implantation des établissements humains à proximité des lits de ces oueds augmente en effet leur vulnérabilité au risque d'inondation fluviale, compte tenu de la rapidité de la montée rapide des eaux et la grande vitesse des courants. L'aléa s'aggrave plus quand il survient soudainement : *« ce danger est d'autant plus grand que la pluie qui a généré ces crues est tombée à des kilomètres, voire à des dizaines de kilomètres à l'amont, alors que le temps restait sec et beau à l'aval. Les pluies catastrophiques de l'automne 1969 [...] ont montré que le Bas-Sahara algéro-tunisien n'était pas à l'abri de pluies quotidiennes égales au total annuel moyen »* (Ballais, 2005b).

VI.5.3.3. Les crues des oueds : cas de Biskra

Plusieurs études et rapports d'études ont indiqué le caractère vulnérable que présente la ville de Biskra face aux risques d'inondations (Azioune et al., 2018 ; Ballais, 2005b ; PDEAU 1996). Deux facteurs contribuent à l'augmentation de la vulnérabilité de cette ville. Un facteur naturel lié aux actuelles variations pluviométriques, un second facteur d'ordre anthropique lié à l'intensification de l'urbanisation non maîtrisée.

La ville de Biskra, la plus grande agglomération au Sud algérien, a été plusieurs fois touchée par ce type d'aléas avec de considérables dégâts. En raison de sa situation aux piémonts des massifs des Aurès et du Zab en occupant le versant sud du Col de Sfa sur une altitude relativement basse (120m), et également à la confluence de l'Oued El-Hai et l'Oued de Djemora (Oued de Biskra), ainsi qu'elle est traversée par l'Oued Z'mor et d'autres cours d'eau, cette ville a connu de multiples inondations, souvent catastrophiques (figure VI-16). À titre d'exemple, on peut citer celles des années 1960, 1963, 1969 (la plus remarquable), 1973, 1970, 1975, 1978, 1989, 1999, 2004, 2005, 2009 et 2015, qui ont provoqué la submersion systémique des oueds notamment l'oued de Biskra et l'obturation de la voirie et des réseaux d'assainissement. À noter qu'au cours de ces dernières décennies, les inondations étaient beaucoup plus liées aux engorgements du réseau d'évacuation des eaux pluviales qu'aux tempêtes elles-mêmes (Azioune et al., 2018).



Figure VI-16 : Des quartiers inondés à Biskra

Source : (Azioune et al., 2018)

L'Oued de Biskra, qui traverse la ville avec une largeur de 400 m, et bordé de part et d'autre par de hautes berges subverticales, a lui aussi subi de nombreuses crues³⁰ avec des montées considérables des eaux occasionnant parfois la possibilité de remplir son lit moyen. Il s'agit là d'un risque de grande brutalité qui s'explique par le fait que, d'une part, ces crues sont en fonction des orages et pluies tombant plus loin dans les régions eurasiennes, et d'autre part, l'incertitude relative aux pluies peut s'étaler sur de longues durées pouvant inclure plusieurs saisons : hiver et printemps selon Rolland (1890)³¹ ; printemps et en fin d'été, particulièrement septembre pour Dubief (1953)³². Il est ainsi à noter que cette région n'est pas à l'écart des conséquences du réchauffement climatique. Sur ce sujet, Ballais (2005b) a écrit : « *en confrontant les données recueillies depuis plus d'un siècle, on peut montrer des évolutions dans le nombre moyens des crues annuelles de cet oued, conséquence possible du réchauffement climatique* ».

Malgré que la mise en place des ponts aux gués préexistants a participé à la réduction de ce risque, depuis les années quatre-vingt, de nouvelles menaces se présentaient, notamment au niveau de ces ponts : « *localement, juste à l'amont du pont Sidi Zerzour, le rétrécissement du lit moyen en rive droite fragilise la route digue menacée par le sapement du lit mineur. Malgré cette intervention, on peut estimer qu'une crue supérieure à 1600m³/s serait nécessaire pour submerger ces ponts, ce qui paraît d'autant moins probable que le barrage de Fontaines des Gazelles, sur l'Oued El Hai, est maintenant terminé* » (Ballais, 2005b). Ce véritable risque paraît moins considéré dans les projets d'aménagement de la ville de Biskra, notamment en ce qui concerne la prise en compte des

³⁰ Il y a un désaccord concernant le nombre annuel de crues, notamment entre G. Rolland (1890) qui en recense entre 15 et 20, et Dubief (1953) qui n'en recense que 4, compte tenu de la diminution des crues entre le XIX^e et XX^e siècle.

³¹ Cité in (Ballais, 2005b)

³² Idem ³¹

inondations sur le lit majeur exceptionnel, alors une vision de soutenabilité urbaine nécessite l'intégration de toutes les contraintes environnementales.

VI.5.4. Une imperméabilisation des sols en augmentation contre un réseau vétuste d'assainissement

Il est également constaté que l'urbanisation non maîtrisée a conduit à l'augmentation de la vulnérabilité de Biskra au risque d'inondations. D'une part, cette urbanisation n'a pas été accompagnée par élargissement convenable du réseau d'assainissement ou même amélioration du réseau existant qui, au fur et mesure du temps, est devenu sous-dimensionnée par rapport aux besoins réels d'évacuation en matière des eaux usées et des eaux pluviales : « *La ville est dotée en effet, d'un réseau d'assainissement relevant en totalité du système unitaire, où l'ensemble des eaux usées et pluviales sont évacuées en commun, un réseau vétuste et insuffisant qui ne couvre pas la totalité du périmètre urbain. On relève l'absence quasi-totale de réseau d'assainissement dans certains quartiers (El Alia, vieux Biskra, Sidi Ghezal....) où le recours aux fosses septiques et rejets en pleine nature constituent une atteinte à la santé publique. Le réseau comprend six (06) collecteurs principaux en béton armé* » (Azioune et al., 2018). D'autre part, la propagation anarchique des quartiers résidentiels en réponse à la croissance démographique plus particulièrement au sein de la palmeraie a conduit à l'augmentation de l'imperméabilité des sols qui, combinée également à la configuration topographique du site, favorise le développement des ruissellements superficiels et la formation de crues : « *L'imperméabilisation, consécutive immédiate du développement du tissu urbain augmente les flux du ruissellement qui peuvent entraîner des inondations et une détérioration rapide des routes, l'infiltration étant réduite à sa plus simple expression. Des 1972, l'urbanisation tentaculaire engagée vers la palmeraie, a posé de sérieux problèmes à la ville, notamment en matière d'infrastructures d'assainissement* » (Azioune et al., 2018).

Le tableau qui suit (tableau VI-16) illustre l'historique de ce risque avec les dégâts engendrés à chaque inondation.

| Dates des inondations | Quartiers, zones ou secteur touchés | Dégâts | | | Les caractéristiques Hydroclimatiques |
|-----------------------|--|--------------------------------|--------------------------|--|--|
| | | Humains (morts et blessés) | Sinistrés | Matériels | |
| Février 1980 | Ancienne ville, Sidi Zarzour | 4 morts, 32 blessés | 200 familles | | Q=283 m ³ /s |
| Juin 1981 | Ancienne ville oued Biskra | | 10 familles | 02 bâtiments effondrés et 17 bâtiments endommagés à risque d'effondrement | Q=178,2 m ³ /s |
| Octobre 1982 | Centre-ville | 03 blessés, 02 portés disparus | 138 familles | Réseau routier détérioré, 236 maisons endommagées ou détruites | 48mm, 24 h, Q=246,6 m ³ /s |
| Août 1984 | Centre-ville, Sidi Barket, Bab El-Darb et Majeniche | 16 blessés | 40 familles | 435 maisons, 10 km de câble téléphonique. 21 Habitations, 5km câble électrique | Q= 127,6 m ³ /s 03 h19 |
| Août 1989 | El-Alia, Sidi Ghozal, Zhun Est, centre-ville, Star Melok | 03 morts, 09 blessés | 126 familles, 59 maisons | 10 sociétés, 119 constructions, 543 habitations, 1,5km de câbles électriques, 3km de route | 70,7mm mois d'avril, et 34 mm Q=152,4 m ³ /s |
| Décembre 1990 | Centre-ville et les quartiers sur les berges de Sidi Zerzour) | 07 blessés | 58 familles | Effondrement de 40 habitations et 21 bâtiments endommagés, à risque d'effondrement | 1h de pluie Q=91,45 m ³ /s |
| Janvier 2003 | Quartiers longeant oued Biskra et oued Zarzour | 11 morts | | 543 habitations, 2,5 km de routes. | Q=142 m ³ /s 49mn |
| Mai 2004 | Biskra, El-Hadjeb | 01 mort | | 8 habitations détruites suite au débordement de l'Oued Biskra | Q=64,3 m ³ /s, 48heures |
| Avril 2005 | La vieille ville et quartiers ouest, El-Hadjeb Sidi Zerzour, Z'mor, Oued El Hai) | 3 morts, 7 blessés | | Effondrement de 543 habitations | Q=150 m ³ /s 25/24_Avril |
| Janvier 2011 | Oued Biskra | 01 mort, 02 blessés | | Dégâts matériels importants | Q=281 m ³ /s ; 23h |
| 26 Mars 2015 | Oued Z'mor | 05 morts 3 blessés | 03 familles | Dégâts matériels, réseau routier endommagé | Q=83,31 m ³ /s 5h |

Figure VI-17 : Historique des inondations de la ville de Biskra depuis 1980

Source : (Azioune et al., 2018, d'après les rapports de l'ANRH)

À l'heure actuelle, la majorité des quartiers de la ville de Biskra sont concernés par le risque d'inondations. Un projet de protection de ces zones habitées contre les inondations est d'urgence nécessaire. Il devrait consister, d'une part, à la requalification du réseau existant avec comme mesure de protection la séparation du réseau des eaux usées (EU) de celui des eaux pluviales (EP), ainsi que la prise en compte des nécessités écologiques concernant le rejet et le recyclage des eaux usées que cette ville, jusqu'à ces jours, a besoin pour lutter contre la pollution urbaine et les risques sanitaires. D'autre part, cette vision protectrice d'aménagement devrait ainsi mettre en avant de cette contrainte environnementale pour une démarche globale de soutenabilité urbaine.

Conclusion

La lecture statistique de l'évolution démographique au Sahara algérien révèle une extraordinaire croissance démographique. Depuis l'indépendance, la population du Sahara s'est remarquablement accrue avec des rythmes plus accélérés par rapport à ceux du nord du pays ou même à la moyenne nationale. Dans presque cinquante ans, la population habitant le Sahara s'est multipliée par plus de 5.4 fois, pour passer de 600 000 habitants à 3 600 000 habitants entre 1954 et 2008. La majeure partie de cette croissance démographique s'est effectuée dans les centres urbains.

L'urbanisation est ainsi plus accentuée au Sud algérien et plus particulièrement au Bas-Sahara qui abrite actuellement environ de 54 % de la population urbaine du Sahara algérien : un poids démographique assez considérable est à attribuer donc aux Bas-Sahara. En plus des facteurs liés aux politiques nationales et aux investissements en hydrocarbures, deux autres facteurs particuliers ont donné au Bas-Sahara algérien cette faveur d'être le plus peuplé dans le Sud algérien : d'une part, la situation septentrionale que bénéficie le Bas-Sahara, qui est favorable aux contacts et aux échanges avec les régions du nord du pays, d'autre part, la configuration géomorphologique des pays oasiens, qui a permis depuis longtemps le peuplement de cette région saharienne.

Spatialement, cette urbanisation effrénée s'est traduite par un étalement spatial non maîtrisé ; dont les répercussions sont assez néfastes compte tenu de la fragilité environnementale que présentent les pays bas-sahariens. Des risques « urbains » majeurs comme la remontée des eaux souterraines et les inondations persistent jusqu'à nos jours. Cette situation inquiétante montre, d'une part, la vulnérabilité de ces établissements humains face aux risques naturels ; d'autre part, l'inadéquation des modèles d'aménagement tant que les contraintes environnementales ne sont pas convenablement prises en charge, notamment quand il s'agit d'une mise en œuvre du concept du développement soutenable dans les politiques nationales.

Chapitre VII. Cartographie spatiotemporelle et évaluation des formes d'urbanisation des grandes villes du Bas-Sahara algérien : application des techniques de Détection du Changement (DC)

Introduction

Durant ces dernières décennies, les villes du Bas-Sahara algérien ont subi un étalement spatial assez démesuré. Dans un contexte de fragilité saharienne, les surfaces urbaines n'ont cessé de s'accroître, affectant de plus en plus le paysage oasien et mettant en péril leurs écosystèmes (Ballais, 2005b ; Kouzmine, 2012). Cette modalité contemporaine de croissances est jugée génératrice de nuisances autant sur le plan socioéconomique qu'environnemental. En plus des conséquences constatées à l'échelle globale (pollution, effet de serre, réchauffement climatique, etc.), induites par la croissance effrénée des villes contemporaines, les écosystèmes oasiens ont, quant à eux, subi des processus d'altération déperissant progressivement leurs fonctionnements et leurs épanouissements. Les palmeraies, potentiel agroéconomique et régulateur bioclimatique, sont actuellement en situations préoccupantes face aux envahissements effrénés des tissus bâtis (Côte, 2012 ; Jouve et Jouve, 2012 ; Kouzmine, 2012) .

L'appréhension de cette évolution rapide et incontrôlée constitue une étape essentielle pour mettre en œuvre une démarche de développement soutenable de la ville oasienne. Un meilleur suivi des mutations spatiotemporelles nécessite l'actualisation effective et permanente de l'information sur l'occupation et l'utilisation du sol. Devant cette situation, les collectivités locales ne disposent pas d'outils si pertinents pour maîtriser et gérer l'étalement des villes oasiennes. Avec les méthodes « classiques » de relevé des états de lieu et d'enquête sur terrain, ainsi que les procédures bureaucratiques, les documents d'aménagement et d'urbanisme se trouvent incapables d'être effectivement à jour avec l'évolution rapide des tissus urbains (Armand, 2016).

Dans ce contexte, de nouvelles approches basées sur la télédétection spatiale et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont été développés pour surmonter ces difficultés. Parmi celles-ci se présentent les méthodes de détection du changement (DC) comme démarche utile pour l'étude des phénomènes terrestres, en faveur des opportunités apportées par les images satellitaires. En effet, cette source de données est devenue incontournable pour le suivi et le contrôle de l'urbanisation, notamment dans les pays en voie de développement où ce phénomène est plus accentué et la mise en évidence de ces impacts est moins évidente (Armand, 2016 ; Donnay et al., 2003).

En appliquant le modèle de détection du changement (DC), et en se basant sur les images satellites Landsat, l'objectif de ce chapitre est double. D'une part, la mise en évidence du processus d'étalement des trois grandes villes oasiennes (Biskra, Ouargla et Touggourt) durant la période 1985 - 2015, en essayant d'établir une cartographie de changement caractérisant l'évolution spatiotemporelle de chaque ville. D'autre part, quantifier cette croissance spatiale, à travers la lecture des rapports descriptifs générés à l'issue de la comparaison pos-classification, afin de se rendre compte de ses répercussions sur les palmeraies (Dechaicha et Alkama, 2020).

Notre analyse est structurée en deux volets : en premier lieu, chaque ville sera étudiée séparément afin de pouvoir passer en second lieu à l'analyse de l'ensemble dans une lecture comparative.

VII.1. Présentation des trois villes

Les trois villes constituant notre corpus d'étude correspondent aux trois grandes villes du Bas-Sahara algérien à savoir Biskra, Ouargla et Touggourt (figure VII-1).

VII.1.1. Situation géographique et Topographie

La ville de Biskra, la plus grande ville dans le Sud algérien, est située à 470 km au sud-est de la capitale Alger, sur les limites septentrionales du Bas-Sahara algérien. Une oasis historique, souvent appelée porte du désert. Chef-lieu de wilaya portant son nom et microcapitale du pays des Ziban, un pays oasien distingué par sa production agricole, particulièrement les dates. Géographiquement, elle est localisée sur les coordonnées suivantes : latitude (34° 51' 00" Nord) ; longitude (5° 44' 00" Est) ; Altitude : 120 m.

Topographiquement, la ville de Biskra est implantée sur un site appartenant à une zone de jonction entre deux domaines naturels opposés, les monts de l'atlas saharien (Monts du Zab et des Aurès, 2329 m) et les plaines étendues de la frange saharienne (60 m). Sur une surface communale de l'ordre de 127,53 km², les plaines argilosablonneuses occupent la majeure partie, avec environ 80 % de l'assiette, la zone de piémont présente 10 %, le reste est une zone de relief couvrant la partie nord de la commune (Alkama, 2005b ; Bouzahzah, 2015).

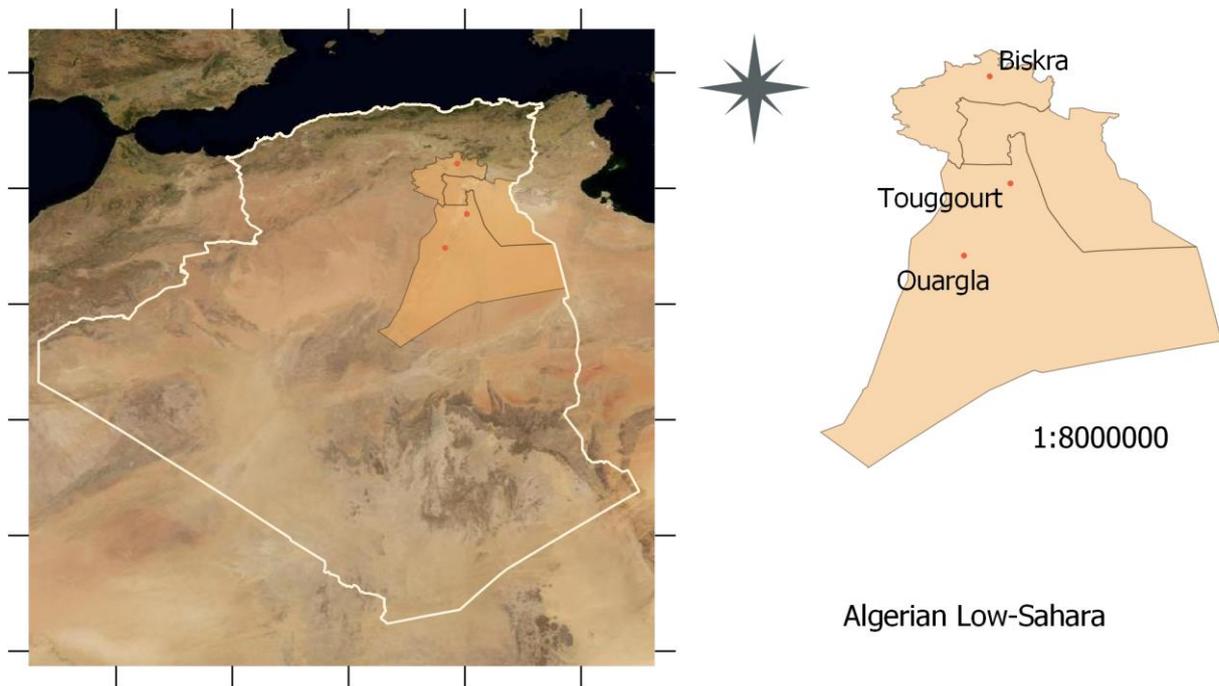


Figure VII-1 : Situation de l'aire d'étude

Source : Auteur à partir d'une cartographie Diva-GIS

La ville de Ouargla, l'oasis géante, est située à 820 km au sud-est de la capitale Alger. Sur la latitude ($31^{\circ} 58'$ Nord), la longitude ($5^{\circ} 24'$ Est) et l'altitude 128 m. L'ensemble de l'oasis occupe le fond d'une vaste cuvette sédimentaire dans la basse vallée de l'Oued Mya, qui s'étend du sud-est au nord-est sur une soixantaine de kilomètres avec une largeur relativement modeste, variant de 4.5 à 11 km au niveau l'agglomération (Tahar Idder et al., 2012).

La ville de Touggourt est située à 600 km au sud-est de la capitale Alger, et à 120 km au nord de Ouargla. Elle est localisée sur les coordonnées géographiques suivantes : Longitude ($6^{\circ} 4'$ Est) ; Latitude ($33^{\circ} 06'$ Nord) ; Altitude 80 m. Microcapitale régionale de l'Oued Righ au Bas : un pays oasien connu par sa richesse en matière de production des dattes, particulièrement Deglat Nour. Historiquement, cet espace désertique fut une entité socioéconomique homogène, animée pendant longtemps de par sa production agricole et comme un couloir de communication servant le commerce transsaharien.

Sur le plan topographique, l'Oued Righ est une dépression longitudinale orientée sud-nord, qui s'allonge sur 150 km avec une largeur variant de 15 à 30 km et des altitudes descendant du sud au nord de 140 m au niveau d'El-Goug à moins de 35 m au niveau du chott Mérouane (Boumaraf, 2013). Avec une superficie environnant les 3000 km^2 , cet oued est enserré de part et d'autre par le grand Erg oriental, délimité par les chotts au sud et aussi par Ouargla au sud. Le long de cette vallée s'étale une bande verte constituée d'une cinquantaine d'oasis, sur une longueur environnant 45 km du nord

au sud et une largeur de 22 km de l'est à l'ouest. Les ressources hydriques souterraines abondantes ainsi que la position de ce corridor oasien sur les axes méridionaux du commerce caravanier ont permis aux établissements humains, organisés en réseau dont Touggourt fut l'oasis mère, de se prospérer pendant une longue période historique.

VII.1.2. Climat

Climatiquement, les trois villes Bas-Sahariennes appartiennent au domaine hyperaride dont le climat est chaud et très sec en été, et doux et froid en hiver. Les températures moyennes varient entre 40,6°C (juillet) et 5,8°C (janvier) pour Biskra, entre 44,10°C et 12,76°C pour Ouargla, et entre 42,12°C et 12,15°C pour Touggourt. Les moyennes de l'humidité relatives sont généralement basses, elles varient entre 59,85 % en mois du décembre et 26,42 % en mois du juillet à Biskra, entre 59 % et 20 % à Ouargla et elles varient entre 63 % et 29 % à Touggourt. Les précipitations sont très rares et irrégulières avec des moyennes annuelles avoisinant les 140 mm à Biskra, 33,41 mm à Ouargla et 58,87 mm à Touggourt. Les périodes sèches sont relativement longues, elles peuvent s'étaler sur 9 mois de l'année, de mars à novembre. Les vents dominants sont de deux directions : ceux du nord-est, relativement humides et soufflent pendant l'hiver et le printemps ; ceux venant du sud et du sud-ouest, des vents de sable, chauds et secs, caractérisant l'été (le sirocco). L'insolation est assez importante, la durée annuelle cumulée peut atteindre 3245,98 h à Biskra, 3245,98 h à Ouargla et 3300h à Touggourt³³.

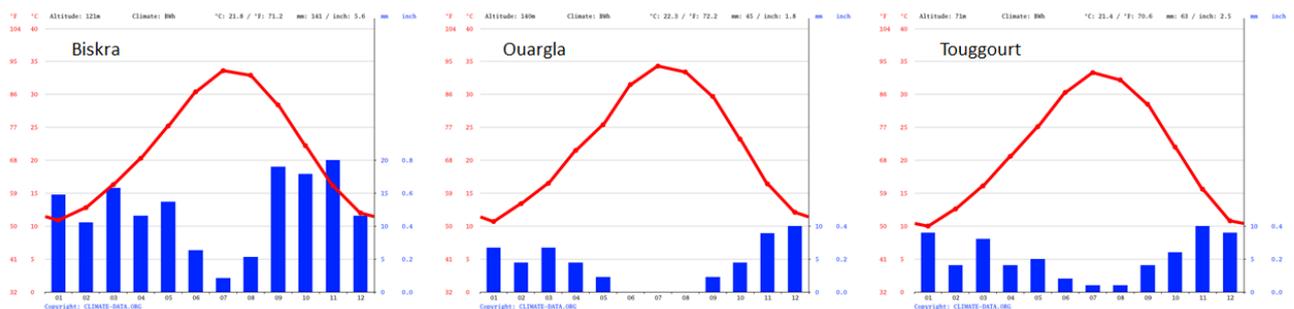


Figure VII-2 : Température et précipitations annuelles des villes de Biskra, Ouargla et Touggourt

Source : climat-data.org

VII.1.3. Démographie

Les trois villes ont toutes une croissance démographique assez remarquable. La ville de Biskra est passée de 52 519 hab en 1966 pour atteindre un nombre de 211 890 hab en 2015, soit une multiplication par plus de 4 fois. La ville de Ouargla, quant à elle, a vu sa population grimper de

³³ Atlas solaire algérien (2002).

23 266 hab en 1966 pour enregistrer un total de 228 072 hab en 2015, soit une multiplication par plus de 9 fois. Touggourt a ainsi suivi la même tendance d'expansion démographique, sa population est passée de 26 590 hab en 1966 pour compter un nombre de 167990 habitants en 2015, c'est-à-dire une multiplication par 6.3 fois (figure VII-3).

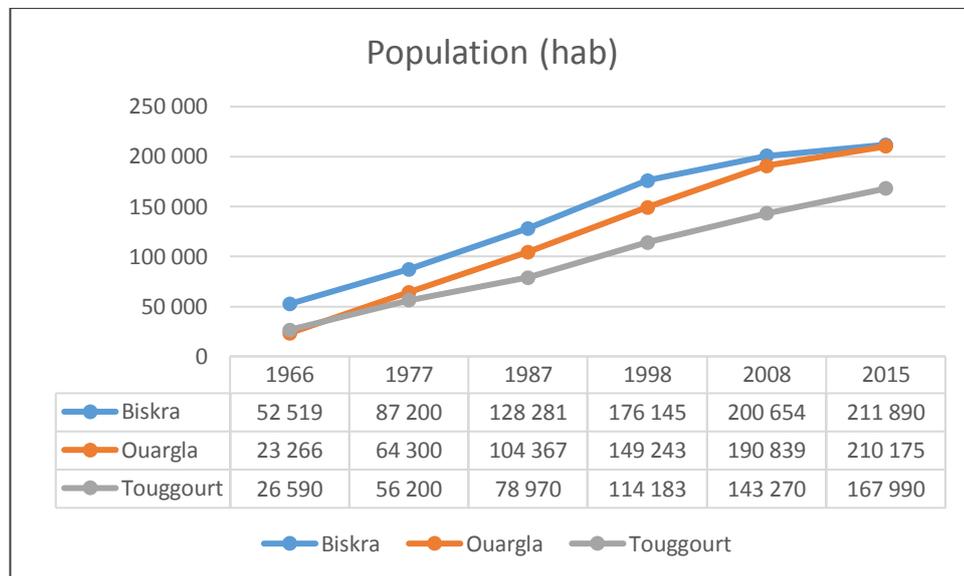


Figure VII-3 : Évolution démographique des villes de Biskra, Ouargla et Touggourt

Source : Auteur d'après (ONS, 2011)

Cet essor démographique pose actuellement de multiples problèmes d'ordre général comme la consommation excessive de l'espace, la congestion urbaine, la pollution, et d'ordre local comme les risques liés aux contraintes environnementales particulières à savoir la remontée des eaux souterraines et les inondations, qui sont principalement dues aux aménagements inadaptés aux spécificités géomorphologiques et bioclimatiques locales, et qui amènent également à la perte progressive des identités oasiennes (Alkama, 2005b ; Bouzahzah, 2015 ; CNES, 2002 ; Kouzmine, 2012).

VII.2. La détection du changement pour suivre l'étalement urbain

La détection du changement d'occupation et d'utilisation des sols est l'une des principales applications de la télédétection spatiale (Mas, 2000). Elle permet d'appréhender le processus d'étalement des villes à travers l'identification des différents changements en matière d'utilisation et d'occupation du sol s'opérant sur les territoires urbains et périurbains. Cette démarche peut aider les autorités locales à agir efficacement en matière de planification spatiale, dans une optique de développement soutenable des territoires avec moins d'impact sur l'environnement (Thériault et al., 2011 ; Weng, 2007). La finalité de cette approche peut inclure la localisation géographique du

changement à travers une cartographie du changement, l'identification du type de changement ainsi que son évaluation quantitative et qualitative.

Pour notre étude, la méthode de comparaison post-classification, la plus répandue en détection du changement, a été privilégiée en raison des avantages qu'elle présente (Hussain et al., 2013 ; Mas, 2000). En plus de la réduction des effets dus aux anomalies atmosphériques et aux capteurs satellites, un rapport descriptif peut être généré à l'issue du calcul. Ce qui permet la mise en valeur du changement, sa qualification (de... à) ainsi que la quantification des pixels inchangés et ceux qui sont convertis. Une démarche de traitement et de classification des images est nécessaire pour entamer le calcul de changement. Cependant, cette méthode présente certaines limites. La qualité des résultats dépend directement du niveau de précision des cartes usitées comme point d'entrée. À juste titre, une évaluation de la classification est nécessaire avant d'entamer cette procédure (Mas, 2000).

VII.3. Méthodologie du travail

VII.3.1. Données et matériel utilisés

Notre étude consiste à caractériser l'évolution de la tâche urbaine, successivement des villes de Biskra, Ouargla et Touggourt, sur une période de 30 ans, entre 1985 et 2015. Une période durant laquelle l'étalement urbain semble plus significatif. Pour ce faire, une série séquentielle constituée de trois images multispectrales Landsat a été acquise pour chaque ville par le biais de l'USGS (United States Geological Survey). Les images acquises correspondent aux années suivantes : 1985, 2001 et 2015. Ces trois scènes satellitaires ont été sélectionnées en faveur de leurs similarités temporelles (scènes prises dans les mêmes saisons de l'année et ayant des horaires du jour très proches), afin d'assurer plus de similitudes en matière de conditions atmosphériques et phénologiques (Coppin et al., 2004 ; D Lu et Weng, 2007). Les caractéristiques des images obtenues seront présentées cas par cas pour chaque ville, aussi de la même manière pour les cartes complémentaires de référence.

La chaîne de traitement (classification et post-classification) des images satellitaires est effectuée au moyen du logiciel libre QGIS (Congedo, 2016 ; Leroux et al., 2018).

VII.3.2. Démarche méthodologique

La démarche suivie dans cette étude est structurée en quatre étapes : un prétraitement et une normalisation des images acquises suivis par une procédure de classification et de post-traitement (perfectionnement), ensuite, une évaluation de la performance pour passer, in fine, à une comparaison post-classification des cartes thématiques générées à l'issue de la classification (Ban et Yousif, 2016 ; Dechaicha et Alkama, 2020 ; Dengsheng Lu et Weng, 2007 ; Nath et al., 2014).

VII.3.2.1. Prétraitement et normalisation des images

Les images sélectionnées pour cette étude (collection de niveaux L1TP) sont géométriquement autoremplacées et géocodées préalablement avant leurs diffusions par l'USGS, selon le système de référencement géographique WGS 84, zone 31 Nord pour Biskra et Ouargla et WGS 84, zone 32 Nord pour Touggourt. L'estimation standard d'erreur RMSE (Rout Mean Square Error) a révélé un niveau négligeable d'erreur (moins de 0,23 pixel pour Biskra, moins de 0,22 pixel pour Ouargla et moins de 0,28 pixel pour Touggourt). La superposition des images est ainsi visuellement vérifiée. Les zones d'étude sont extraites à travers une fenêtre de découpe incluant pour chaque ville l'actuel périmètre urbain ainsi que son proche environnement périurbain. Les coordonnées de chaque zone d'étude seront présentées séparément cas par cas. Ainsi, un calibrage radiométrique, consistant à convertir les radiances des images en réflectances, a été effectué avec correction atmosphérique de type TOA³⁴ et soustraction des objets sombres (non attribués) en appliquant le modèle DOS1³⁵ (Congedo, 2016 ; NASA, 2011 ; Tucker et al., 2004).

VII.3.2.2. Classification supervisée et post-traitement

La classification de données satellitales est une méthode efficace qui a largement prouvé sa faisabilité pour l'extraction de l'information spatiale. Elle consiste à donner à chaque pixel son appartenance en matière d'utilisation du sol. Pour se faire, une classification de type supervisée a été entamée (Girard et Girard, 2010 ; D Lu et Weng, 2007). En se basant sur les documents de référence et la connaissance du terrain, quatre classes ont été définies³⁶ : surfaces urbanisées, palmeraie (haute végétation), basse végétation et sol nu. La description de chacune de ces classes est illustrée dans le tableau qui suit (tableau VII-1).

| N° classe | Labelle | Description |
|-----------|-------------------|---|
| 01 | Surface urbanisée | Constructions résidentielles, commerciales et de services, complexes touristiques et industriels, zone d'activité, voies de circulation, zones urbaines mixtes. |
| 02 | Palmeraie | Haute végétation (phoceniciculture). |
| 03 | Basse végétation | Prairies, maraichages et sols à vocation agricole. |
| 04 | Sol nu | Sols non bâtis et non cultivés, de natures diverses : sablonneuse, rocheuse, limoneuse (lit d'oued), etc. |

Tableau VII-1 : Labélisation et description des classes retenues

³⁴ Top Of Atmospheric.

³⁵ Dark Object Subtraction.

³⁶ Selon la nomenclature FAO (2004)

L'échantillonnage des zones d'entraînement (zones de test) a été établi par photo-interprétation des images en compositions colorées, en correspondance avec les cartes de référence (Du et al., 2014 ; Hugerot et al., 2017 ; Lillesand et al., 2014 ; Munafò et Congedo, 2017 ; Taylor et al., 1986). Des polygones représentatifs de différentes classes ont été générés à travers l'algorithme « Region Growing » qui consiste à créer, à partir d'un pixel de départ, une région homogène incluant des pixels ayant des valeurs spectrales similaires (Congedo, 2016 ; Rajendran et Mani, 2015). La comparaison des signatures spectrales a révélé quelques chevauchements, particulièrement entre le sol nu et le bâti. Pour régler cette anomalie, nous avons multiplié les sous-classes au niveau des zones de confusion, avec seuillage automatique permettant leurs séparabilités spectrales (Congedo, 2016 ; Sezgin & Sankur, 2004).

À fin d'exécuter la classification, l'algorithme « Maximum de vraisemblance » est utilisé (D Lu et Weng, 2007 ; Mather et Tso, 2016 ; Nath et al., 2014 ; Phiri et Morgenroth, 2017). Par la suite, une amélioration post-traitement des cartes générées par la classification est effectuée. Elle consiste à corriger les confusions induites par la classification ainsi que l'élimination des pixels isolés en appliquant un filtre de 3x3 pixels. À la fin de cette étape, un traitement de reclassification est appliqué sur les trois cartes en vue de les rendre homogènes et comparables (Dengsheng Lu et Weng, 2007). Les sous-classes du sol nu sont regroupées en une seule classe, de même pour celles des surfaces urbanisées. Concernant la végétation, nous avons distingué deux classes : végétation urbaine localisée à l'intérieur de l'actuel périmètre urbain, principalement présentée par la palmeraie ; végétation périurbaine au-delà du périmètre bâti. Cette dernière classe représente les nouvelles exploitations agricoles dans la périphérie de la ville. Cette distinction nous permettra de visualiser l'évolution spatiotemporelle de la palmeraie à l'intérieur de la ville, séparément de celle s'opérant en périphérie.

VII.3.2.3. Évaluation de la performance : la matrice de confusion

L'évaluation de la classification est cruciale pour pouvoir procéder à l'analyse thématique. Elle nous renseigne sur le niveau de précision des cartes produites par la classification (Congalton et Green, 2008). Il s'agit d'une comparaison de données issues de la classification à celles de la réalité, à travers un échantillon sélectionné, en se référant à l'information collectée sur terrain ou à la photo-interprétation des cartes de référence. Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la classification. La plus courante est la matrice de confusion (Congalton, 1991). Elle consiste en la construction d'une table dont les colonnes présentent les données de la classification et les lignes contiennent les données réelles. La finalité est de calculer le pourcentage des pixels correctement classés à un niveau global (pourcentage global) et à un niveau détaillé (par classe). Un autre indice synthétique issu de la matrice

de confusion est ainsi utilisé dans l'évaluation de la précision. Il s'agit de l'indice Kappa (K_{hat}). C'est un indicateur de qualité servant à mesurer la performance d'une classification multiclasse. Pour une valeur de K_{hat} supérieur ou égale à 0.8, la classification est statistiquement assez considérable ; K_{hat} varie entre 0,4 et 0,8, la classification est de moyenne considération (Congalton et Green, 2008 ; Landis et Koch, 1977).

Quant à notre étude, l'évaluation de la précision est effectuée en se procédant, en premier lieu, à une digitalisation de 200 points de contrôle créés et répartis aléatoirement sur toute la zone d'étude et couvrant toutes les classes, puis, et en second lieu, à l'enregistrement des données réelles à partir de la photo-interprétation des cartes de référence. La matrice de confusion est générée après calcul matriciel de comparaison (SIG).

VII.3.2.4. Détection du changement

Une comparaison post-classification est entamée à partir des trois cartes thématiques générées à l'issue de la classification. L'objectif de cette analyse est de mettre en évidence le processus de l'étalement de la tâche urbaine de la ville de Biskra à travers l'identification des différents changements en matière d'occupation et d'utilisation du sol, en essayant de nuancer les deux périodes : (1985 – 2000) et (2000 – 2015). Le résultat pour chaque période est une carte de changement complétée par un rapport descriptif. Sur la carte de changement sont localisées les surfaces inchangées et celles converties durant la période concernée ; le rapport descriptif illustre quantitativement l'évolution de chaque classe en indiquant la nature de mutations (changement d'une classe à une autre).

VII.4. La ville de Biskra : deux tendances spatiales nettement opposées

VII.4.1. Données utilisées

Les images utilisées pour le suivi de l'évolution spatiotemporelle de la ville de Biskra correspondent aux dates suivantes : une scène Landsat 5 TM acquise le 30/04/1985, une seconde scène Landsat 7 ETM+ prise le 15/04/2000 et une troisième scène Landsat 8 OLI-TIRS acquise le 03/05/2015. Les caractéristiques techniques des images mobilisées sont illustrées dans le tableau VII-2.

| Image | Capteur | Date | Bandes | Nébulosité | RMSE (m) | Rés. spatiale (m) |
|---------|--------------------|------------|-------------|------------|----------|-------------------|
| Image 1 | Landsat 5 TM | 30-04-1985 | 1-2-3-4-5-7 | 0 | 4 416 | 30 |
| Image 2 | Landsat 7 ETM+ | 15-04-2000 | 1-2-3-4-5-7 | 0 | 4 148 | 30 |
| Image 3 | Landsat 8 OLI-TIRS | 03-05-2015 | 2-3-4-5-6-7 | 0 | 6 786 | 30 |

Tableau VII-2 : Caractéristiques des images Landsat utilisées (Biskra)

Des cartes auxiliaires de référence sont ainsi utilisées. Il s'agit de trois plans parcellaires représentant les états d'utilisation et d'occupation du sol des années 1986, 2002 et 2014, qui sont élaborés à des échelles plus fines par l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT). Trois images Geotiff (1985 - 2000 - 2015) fournies en coloration naturelle par l'USGS sont également mobilisées. Le recours à ces images historiques permet de vérifier les surfaces situées en dehors des périmètres urbains et non couvertes par les plans parcellaires.

VII.4.2. Prétraitement et normalisation des images

Les images sélectionnées pour cette étude (collection de niveaux L1TP) sont géométriquement autorectifiées et géocodées préalablement avant leurs diffusions par l'USGS, selon le système de référencement géographique WGS 84, zone 31 Nord. L'estimation standard d'erreur RMSE (Rout Mean Square Error) a révélé un niveau négligeable d'erreur (moins de 0,23 pixel). La zone d'étude est extraite à travers une fenêtre de découpe incluant l'actuel périmètre urbain ainsi que son proche environnement périurbain. Elle est incluse entre les longitudes ($5^{\circ} 40'42''$ et $5^{\circ} 48'0.96''$ Est) et les latitudes ($34^{\circ} 52'48.36''$ et $34^{\circ} 48'45''$ Nord). Ainsi, un calibrage radiométrique, consistant à convertir les radiances des images en réflectances, a été effectué avec correction atmosphérique de type TOA³⁷ et soustraction des objets sombres (non attribués) en appliquant le modèle DOS1³⁸ (Congedo, 2016 ; NASA, 2011 ; Tucker et al., 2004).

Par la suite, un rehaussement des images a été appliqué afin d'améliorer leurs qualités et de faciliter leurs interprétations visuelles. Une composition colorée en fausses couleurs a été maintenue avec la combinaison des bandes (4-3-2) pour les images TM et ETM+ et (5-4-3) pour celle de Landsat 8 (figure VII-4). Cette composition, après plusieurs combinaisons, a montré de meilleures discriminations des surfaces et des objets constituant les différents types d'occupation du sol (Collet et Caloz, 2001 ; Jensen et Lulla, 1987).

³⁷ Top Of Atmospheric.

³⁸ Dark Object Subtraction.

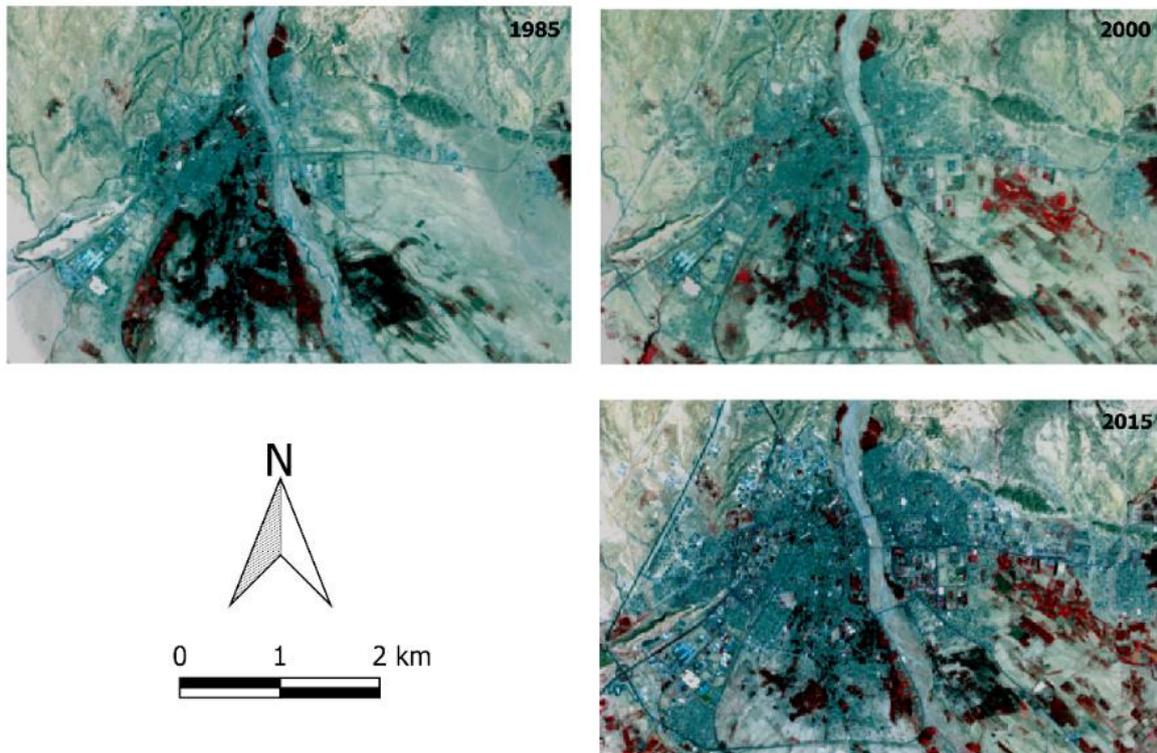


Figure VII-4 : Compositions en fausses couleurs des images utilisées (1985 – 2000 – 2015)
(Auteur à partir d’une imagerie USGS)

VII.4.3. Résultats et interprétation

VII.4.3.1. Validation de la classification

Les cartes thématiques obtenues sont illustrées dans la figure (Fig. 4). Elles correspondent respectivement aux années 1985, 2000 et 2015. Les matrices de confusion générées pour ces trois cartes ont montré un niveau satisfaisant de précision, aussi bien pour la précision globale que la précision des classes, notamment celles des surfaces urbanisées et celle de la palmeraie. L’indice Kappa (K_{hat}) a ainsi montré un niveau de précision assez acceptable avec les valeurs 0.81, 0.89 et 0.90 pour les années 1985, 2000 et 2015 respectivement (tableau VII-3).

| Type d'évaluation | 1985 | 2000 | 2015 |
|--|-------|-------|-------|
| Précision globale (%) | 91,01 | 95,18 | 94,87 |
| Précision classe « surface urbanisée » (%) | 92,20 | 94,30 | 97,85 |
| Précision classe « palmeraie » (%) | 96,00 | 92,30 | 98,10 |
| Indice K_{hat} | 0,81 | 0,89 | 0,90 |

Tableau VII-3 : Précision de la classification des trois images 1985, 2000 et 2015

Il est à noter que cette évaluation a révélé quelques résultats erronés négligeables, correspondant à quelques confusions de classification au niveau des lisières entre le sol nu (de nature caillouteuse) et le bâti.

VII.4.3.2. La cartographie du changement : un remarquable étalement des surfaces bâties

La lecture diachronique des trois cartes illustrées dans la figure qui suit (Figure VII-5) nous montre une nette croissance des surfaces urbanisées durant la période d'étude, contre un important recul de la palmeraie. Cette dernière, positionnée en dehors de la ville en 1985, a été progressivement incorporée dans le périmètre urbain. Par ailleurs, la végétation périurbaine a connu une augmentation de sa surface, notamment au sud-est de la ville.

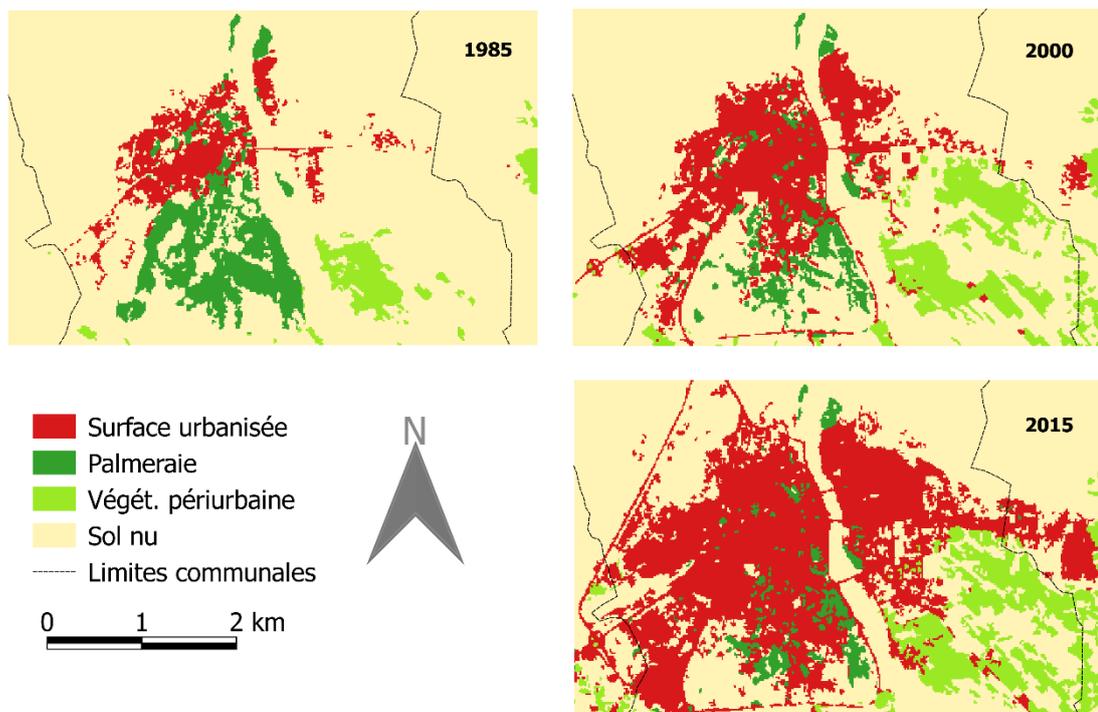


Figure VII-5 : Évolution spatiotemporelle de l'oasis de Biskra (1985 - 2015)

Spatialement, l'extension de la tâche urbaine s'est opérée suivant trois directions : vers le sud, par empiètement des surfaces appartenant à la palmeraie ; vers l'Ouest et le Sud-ouest, le long des axes routiers, notamment la RN° 46³⁹, d'où un début de franchissement des limites communales est remarqué sur le territoire de la commune d'El-Hadjeb ; vers l'est, au-delà de l'oued de Biskra. Le

³⁹ Route nationale N° 46 reliant la ville à la route transsaharienne RN° 01.

long de cette dernière direction, un processus de conurbation urbaine est observé particulièrement durant la période (2000 – 2015), intégrant un autre territoire communal limitrophe, celui de Chetma à l'est de la ville de Biskra. En revanche, la palmeraie s'est progressivement reculée au profit du bâti, avec succession deux processus : en premier temps, occupation des surfaces interstitielles dégradées à l'intérieur de la palmeraie ; en second temps, conversion par mitage de la surface boisée.

Sur le plan quantitatif, le tableau VII-4 illustre cette évolution. La lecture du tableau révèle une variation de rythme de croissance entre les deux périodes (1985 – 2000) et (2000 – 2015).

| Classe | Surface (ha) | | | 1985 - 2000 | | | 2000 - 2015 | | |
|-------------------------------|--------------|---------|---------|-------------|--------|--------|-------------|---------|--------|
| | 1985 | 2000 | 2015 | +/- (ha) | % | Év/an | +/- (ha) | % | Év/an |
| Tissu bâti | 488,43 | 1279,62 | 2673,00 | +791,19 | 161,99 | +52,75 | +1393,38 | +108,89 | +92,89 |
| Végétation urbaine | 635,13 | 314,01 | 241,29 | -321,12 | -50,56 | -21,41 | -72,72 | -23,16 | -4,85 |
| Végétation périurbaine | 247,50 | 673,92 | 786,42 | +426,42 | 172,29 | +28,43 | +112,50 | +16,69 | +7,50 |
| Sol nu | 6772,14 | 5875,65 | 4442,49 | -896,49 | -13,24 | -59,77 | -1433,16 | -24,39 | -95,54 |

Tableau VII-4 : Évolution surfacique des classes d'occupation et d'utilisation du sol

La figure qui suit (figure VII-6) montre également l'évolution des parts occupées par les surfaces urbanisées en rapport avec celles des surfaces végétales.

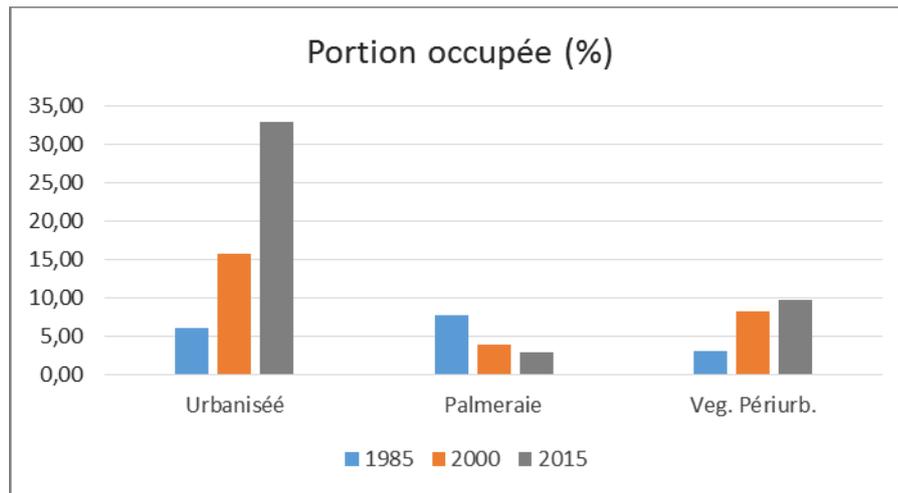


Figure VII-6 : Les portions des surfaces urbanisées et des surfaces agricoles (1985 - 2015)

Durant la première période (Figure VII-7), la classe bâtie a marqué une croissance de surface passant de 488.43 ha en 1985, pour enfin atteindre 1279.62 ha en 2015 avec une hausse de 791.19 ha, soit une évolution annuelle estimée à 52.75 ha. Par contre, la palmeraie a connu un processus inversé. Sa surface s'est diminuée de 635.13 ha en 1985 à 314.01 ha en 2000 avec perte de 50.56 %, soit 21.41 ha de pertes annuelles. L'agriculture périurbaine a enregistré un gain de surface estimé à 426.42 ha. Cette classe est passée de 247.50 ha en 1985 à 673.92 ha en 2000 avec une croissance annuelle de l'ordre de 28.43 ha par an. La classe du sol nu a ainsi perdu de sa surface dont 896.49 ha convertis par les autres classes.

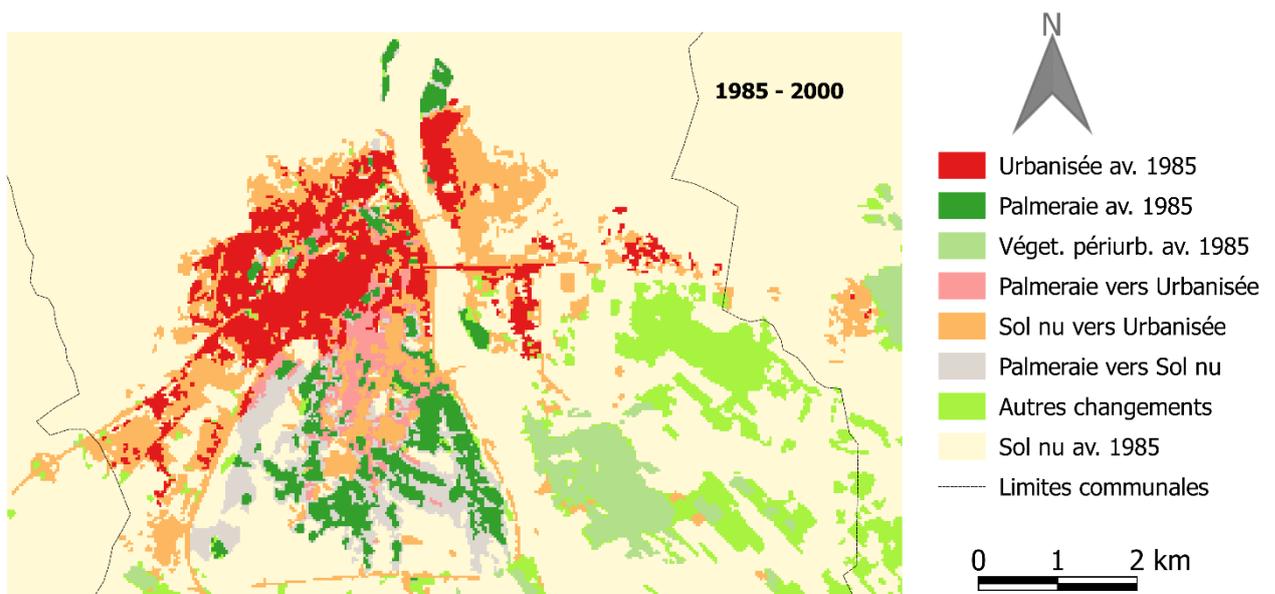


Figure VII-7 : Carte de changement UOS entre 1985 et 2000 (Biskra)

Durant la période 2000 – 2015 (figure VII-8), le changement d'occupation et d'utilisation du sol s'est continué, mais avec variation d'ampleur. La classe du bâti a enregistré une évolution plus accélérée par rapport à la première période. Elle a intégré plus de 1393.38 ha pour atteindre 2673 ha d'emprise en 2015, soit une évolution annuelle de l'ordre de 92.89 ha (contre 52.75 ha/an durant la période 1985 – 2000). À l'opposé, la palmeraie a continué de perdre de surface, mais avec rythme moins rapide. La surface disparue durant cette période est estimée à 72.72 ha (contre 321.12 ha entre 1985 et 2000), soit une perte de 4.85 ha par an. L'évolution de la surface occupée par la végétation périurbaine a enregistré un ralentissement par rapport à la première période. Avec une augmentation annuelle de 7.50 ha, cette classe a atteint 786.42 ha en 2015. La dernière classe, celle des sols nus, a enregistré une accélération du rythme de conversion vers les autres classes avec moyenne annuelle estimée à 95.54 ha par an.

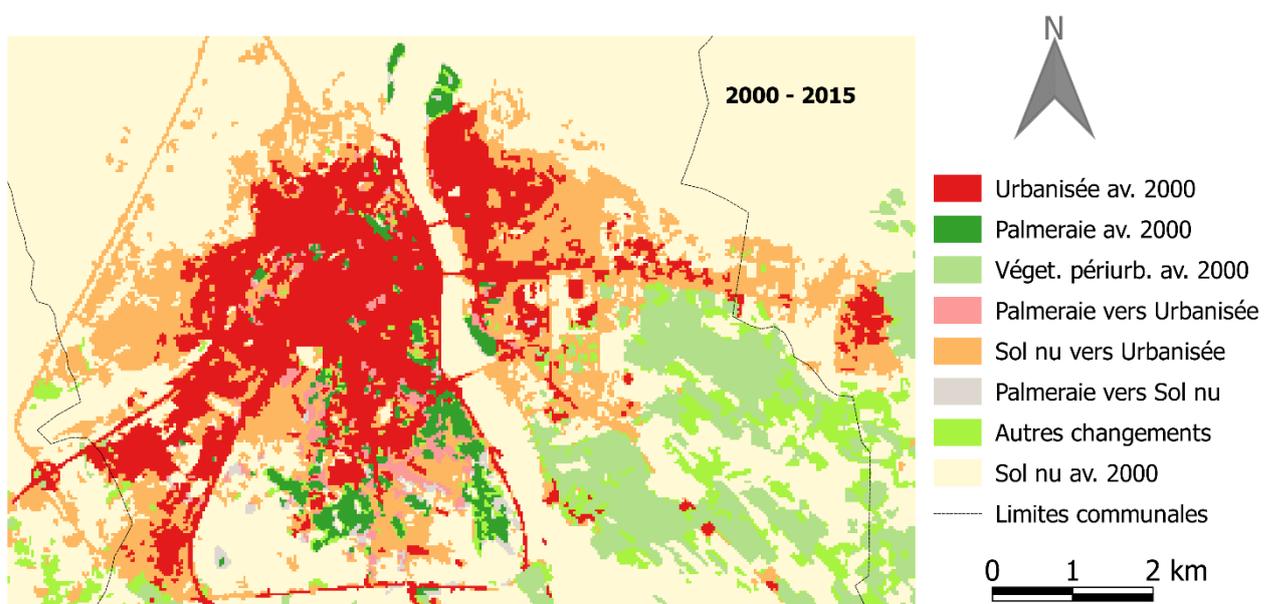


Figure VII-8 : Carte de changement UOS entre 2000 et 2015 (Biskra)

VII.4.3.3. Conurbation achevée contre un morcellement de la palmeraie : discussion

En somme, la cartographie du changement spatiotemporel a montré un étalement spatial de la tâche urbaine nettement remarqué sur toute la période d'étude, avec plus d'ampleur constatée entre 2000 et 2015. Cet étalement se caractérise par deux traits majeurs. D'une part, une conurbation continue étendant la tâche urbaine de Biskra vers les agglomérations périphériques, notamment celle de Chetma à l'est et celle d'El-Hadjeb au sud et au sud-ouest. Les axes de transport ont ainsi influencé ces extensions conduisant à l'allongement du périmètre urbain. D'autre part, un empiétement

progressif des surfaces agricoles constituant la palmeraie. Cette dernière a subi un processus de morcellement et de mitage par l'avancée effrénée du bâti. La détection du changement illustrée dans les figures VII-4 et VII-5 rend compte des répercussions induites par l'étalement du bâti sur la palmeraie, par la mise en valeur des surfaces converties par l'urbanisation. La quantification de ces conversions, extraite des rapports descriptifs, révèle que 322.22 ha de surface agricole a été convertie par le bâti entre 1985 et 2015, soit un pourcentage de perte estimée à 47.22 %. De plus, les surfaces converties en sols nus sont de l'ordre de 123.03 ha, avec un taux de perte égale à 19.37 %. Cette surface, dégradée, sera éventuellement construite par la suite. Au total, la palmeraie a enregistré une perte globale estimée à 66.56 % de sa superficie, pendant 30 ans. Ce taux de perte montre l'ampleur du mitage induit par l'étalement urbain sur le potentiel oasien présenté par la palmeraie.

VII.5. La ville de Ouargla : une palmeraie fragmentée par l'avancée du bâti

VII.5.1. Données utilisées

La croissance spatiale de la ville de Ouargla a été mise en valeur moyennant une série multodate composée de trois images satellitales acquises via les capteurs suivants : Landsat 5 TM, Landsat ETM+ et Landsat 8 OLI-TIRS. Ces scènes correspondent successivement aux dates suivantes : le 30/04/1985, le 14/03/2000 et le 01-04-2015. La nébulosité est favorable pour les trois scènes. Les détails techniques de ces images sont illustrés dans le tableau suivant (tableau VII-5) :

| Image | Capteur | Date | Bandes | Nébulosité | RMSE (m) | Rés. spatiale (m) |
|---------|--------------------|------------|-------------|------------|----------|-------------------|
| Image 1 | Landsat 5 TM | 30-04-1985 | 1-2-3-4-5-7 | 0 | 4 112 | 30 |
| Image 2 | Landsat 7 ETM+ | 14-03-2000 | 1-2-3-4-5-7 | 0 | 4 624 | 30 |
| Image 3 | Landsat 8 OLI-TIRS | 01-04-2015 | 2-3-4-5-6-7 | 0 | 6 643 | 30 |

Tableau VII-5 : Caractéristiques des images Landsat utilisées (Ouargla)

À fin de compléter et aussi vérifier les informations recueillit avec la réalité du terrain, des documents cartographiques ont été utilisés. Trois images Geotiff en coloration naturelle, fournies par l'USGS et ayant les mêmes dates des images traitées ont été acquises, ainsi que des plans parcellaires correspondant aux dates proches des dates de prise de scènes (2001 et 2014).

VII.5.2. Prétraitement et normalisation des images

Tout comme celles de Biskra, les images mobilisées pour le cas de Ouargla sont géométriquement autorectifiées et géocodées préalablement avant leurs diffusions par l'USGS, selon le système de référencement géographique WGS 84, zone 31 Nord. L'estimation standard d'erreur RMSE (Rout Mean Square Error) a révélé un niveau négligeable d'erreur (moins de 0,22 pixel). Une fenêtre de découpe incluant la zone d'étude a été définie. Elle est incluse entre les longitudes ($5^{\circ}15'6,18''$ et $5^{\circ}24'23''$ Est) et les latitudes ($31^{\circ}54'27,2''$ et $32^{\circ}0'24''$ Nord). Ainsi, un calibrage radiométrique, consistant à convertir les radiances des images en réflectances, a été effectué avec correction atmosphérique de type TOA et soustraction des objets sombres (non attribués) en appliquant le modèle DOS1 (Congedo, 2016 ; NASA, 2011 ; Tucker et al., 2004).

Des opérations de rehaussement sont par la suite appliquées sur les images en vue d'améliorer leurs qualités et de faciliter leurs interprétations visuelles. Une composition colorée en fausses couleurs a été maintenue avec la combinaison des bandes (4-3-2) pour les images TM et ETM+ et (5-4-3) pour celle de Landsat 8 (figure VII-9).

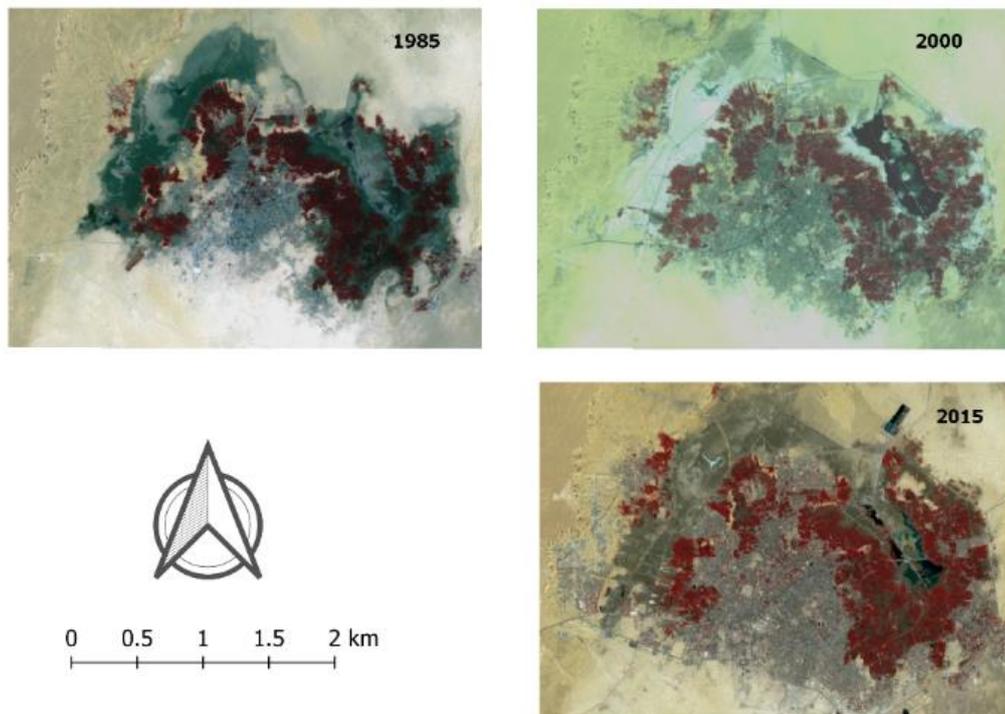


Figure VII-9 : Compositions en fausses couleurs des images utilisées (1985 – 2000 – 2015)
(Auteur à partir d'imagerie USGS)

VII.5.3. Résultats et interprétation

VII.5.3.1. Validation de la classification

Trois cartes thématiques sont générées à l'issue de la classification (figure VII-7). Ces cartes correspondent aux années 1985, 2000 et 2015 respectivement. Le calcul des matrices de confusion a montré un niveau acceptable de précision autant pour la précision globale (92,10, 89,64 et 93,22 respectivement) que pour l'indice K_{hat} dont les valeurs de précision obtenues sont 0,86, 0,92 et 0,91 respectivement (tableau VII-6).

| Type d'évaluation | 1985 | 2000 | 2015 |
|--|-------|-------|-------|
| Précision globale (%) | 92,10 | 89,64 | 93,22 |
| Précision classe « surface urbanisée » (%) | 91,00 | 92,20 | 94,36 |
| Précision classe « palmeraie » (%) | 94,20 | 90,60 | 94,20 |
| Indice K_{hat} | 0,86 | 0,82 | 0,91 |

Tableau VII-6 : Précision de la classification des trois images 1985, 2000 et 2015

VII.5.3.2. La cartographie du changement : un net étalement des surfaces bâties

La classification supervisée a permis l'obtention de 3 cartes thématiques, qui sont illustrées dans la figure qui suit (Fig. VII-10).

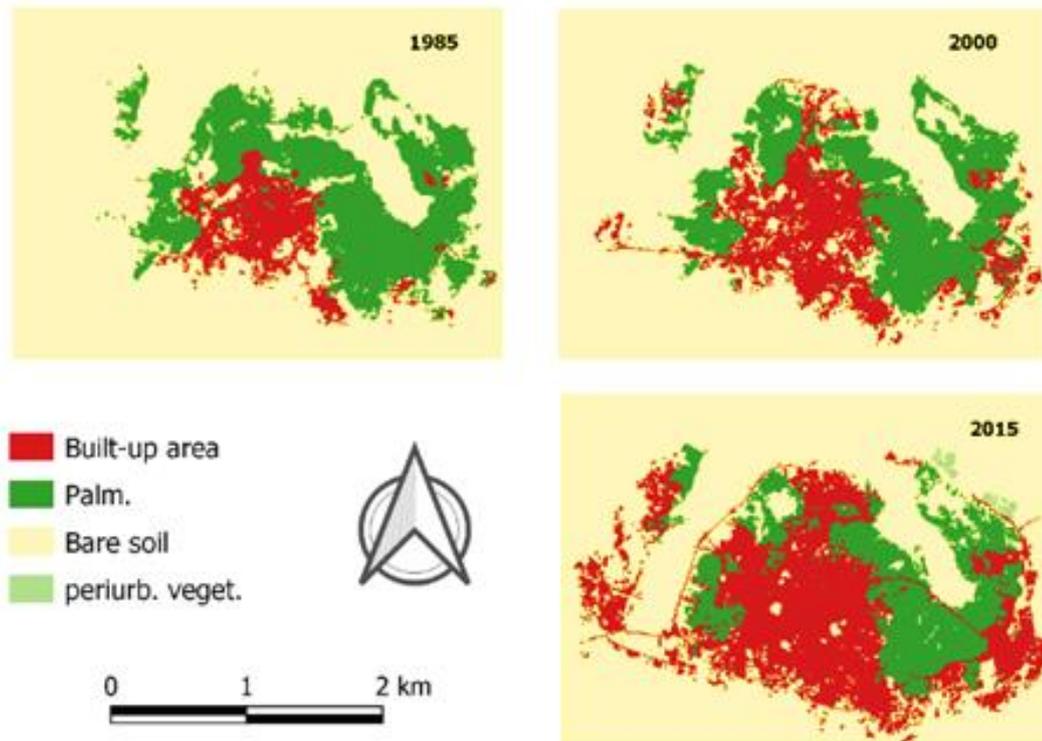


Figure VII-10 : Évolution spatiotemporelle de la ville de Ouargla entre 1985 et 2015

La lecture diachronique des trois cartes, illustrées dans la figure VII-10, montre une nette croissance des surfaces bâties durant la période d'étude, contre un important recul de la palmeraie. Au cours de la première période, la croissance spatiale de la ville de Ouargla s'est caractérisée par deux tendances. D'une part, des extensions en continu vers le sud et vers le nord traversant la palmeraie et provoquant de ce fait un processus de fragmentation de celle-ci. D'autre part, des extensions au-delà des limites physiques (*Sebkh*a et palmeraie) pour débiter une urbanisation en discontinue suivant deux directions : à l'ouest sur le plateau de Bamendil avec l'installation de la nouvelle ville (Hai en Nasr), à l'est en intégrant les quartiers de Ain Beida. Durant la deuxième période (2000-2015), la tache du bâti a aussi enregistré une importante croissance. La fragmentation de la palmeraie s'est continuée par empiétement surfacique notamment vers le nord d'où la coalescence avec l'agglomération de Said Otba, et vers le sud en remplissant l'ensemble de la cuvette. L'extension des surfaces urbanisées a ainsi marqué les agglomérations périphériques, notamment la ville nouvelle à l'ouest et la ville de Ain Beida à l'est. Un processus de densification de ces zones périphériques est caractéristique pendant cette période.

Quantitativement, l'évolution surfacique des classes UOS caractérisant le paysage « Ouargli » est synthétisée dans le tableau VII-7. Les résultats illustrés dans ce tableau montrent un changement d'ampleur de croissance entre la première et la seconde période d'étude.

| Classe | Surface (ha) | | | 1985 - 2000 | | | 2000-2015 | | |
|----------------------|--------------|-----------|-----------|-------------|--------|--------|-----------|--------|---------|
| | 1985 | 2000 | 2015 | +/- (ha) | % | Év/an | +/- (ha) | % | Év/an |
| Bâti | 986,22 | 1821,87 | 3538,08 | +835,65 | +84,73 | +55,71 | +1716,21 | +94,20 | +114,41 |
| Palmeraie | 2782,62 | 2401,74 | 2042,37 | -380,88 | -13,69 | -25,39 | -359,37 | -14,96 | -23,96 |
| Vég. Périurb. | - | - | 59,85 | - | - | - | 59,85 | - | - |
| Sol nu | 11 178,36 | 10 723,59 | 10 723,59 | -454,77 | -4,07 | -30,32 | -1416,69 | -13,21 | -94,45 |

Tableau VII-7 : Évolution surfacique des classes d'occupation et d'utilisation du sol (Ouargla)

Sur toute la période d'étude, la classe du bâti a enregistré une augmentation importante de sa surface. Elle est passée de 986.22 ha en 1985 à 1821.87 ha en 2000 pour atteindre 3538.08 ha en 2015. Une variance de rythme de croissance est constatée avec un gain de surface estimé à 835.65 ha pendant la première période contre un cumul de 1716.21 ha durant la deuxième période. En revanche, la palmeraie a subi un processus inverse. Sa surface s'est diminuée de 2782.62 ha en 1985 à 2401.74 en 2000 pour enregistrer 2042.37 ha de surface en 2015. Ce processus de perte a presque suivi le même rythme avec une perte de 380.88 ha de surfaces durant la première période et 359.37 ha pendant la deuxième période. Il importe de noter également que de nouvelles exploitations agricoles sont également remarquées au dehors du périmètre urbain avec la plantation de 59.85 ha entre 2000 et 2015 (figure VII-11).

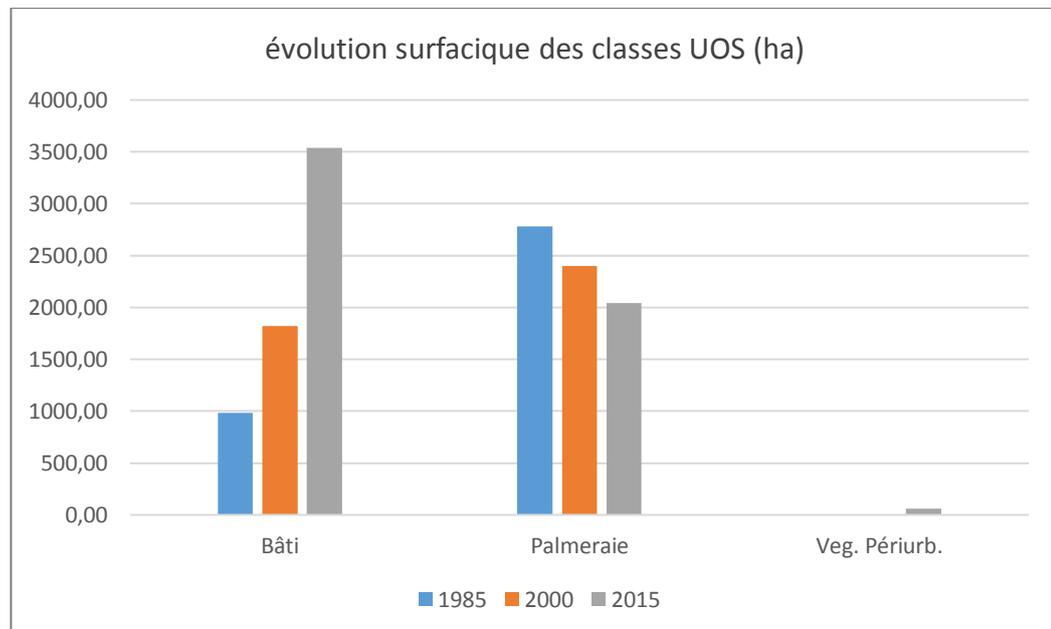


Figure VII-11 : Évolution surfacique des classes UOS de l'oasis de Ouargla (1985 – 2015)

Au cours de la première période (figure VII-9), la classe bâtie a marqué une croissance de surface de 986.22 ha en 1985, pour atteindre 1821.87 ha en 2000 avec une hausse de 835.65 ha, soit une évolution annuelle estimée à 55.71 ha. Par contre, la palmeraie a connu un processus inverse. Sa surface s'est diminuée de 2782.62 ha en 1985 à 2401.74 ha en 2000 avec perte de 13.69 %, soit 25.39 ha de perte annuelle. L'agriculture périurbaine a enregistré un gain de surface estimé à 426.42 ha. Les sols nus ont subi des conversions estimées à 454.77 ha pendant 15 ans, soit une perte annuelle égale à 30.32 ha par an (figure VII-12).

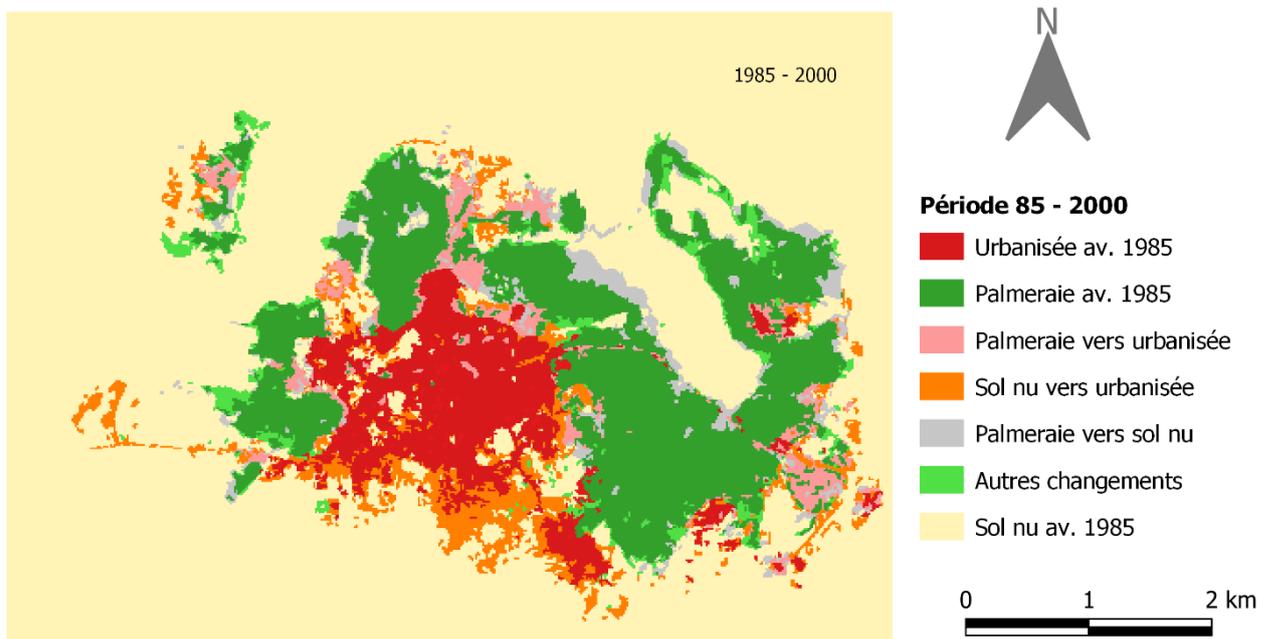


Figure VII-12 : Carte de changement UOS de l'oasis de Ouargla pendant la période 1985 - 2000

Au cours de la seconde période (2000 – 2015), les modifications d'occupation et d'utilisation du sol n'ont cessé de se continuer, mais avec variation de rythme. La croissance des surfaces bâties s'est accélérée par rapport à la première période. Cette classe a gagné environ de 1716.21 ha pour atteindre une surface de 3538.08 ha d'emprise en 2015, soit une évolution annuelle estimée à 114.41 ha (contre 55.71 ha/an durant la période 1985 – 2000). En revanche, la palmeraie a continué de perdre de surface, mais avec un léger ralentissement de rythme. La surface disparue durant cette période est estimée à 359.37 ha (contre 380.88 ha entre 1985 et 2000), soit une perte de 23.96 ha par an (contre 25.39 ha entre 1985 et 2000). Durant cette période, la végétation périurbaine a marqué son apparition avec la plantation d'une surface de 59.85 ha. La dernière classe, celle des sols nus, a enregistré une

accélération du rythme de conversion vers les autres classes avec moyenne annuelle estimée à 95.54 ha par an (figure VII-13).

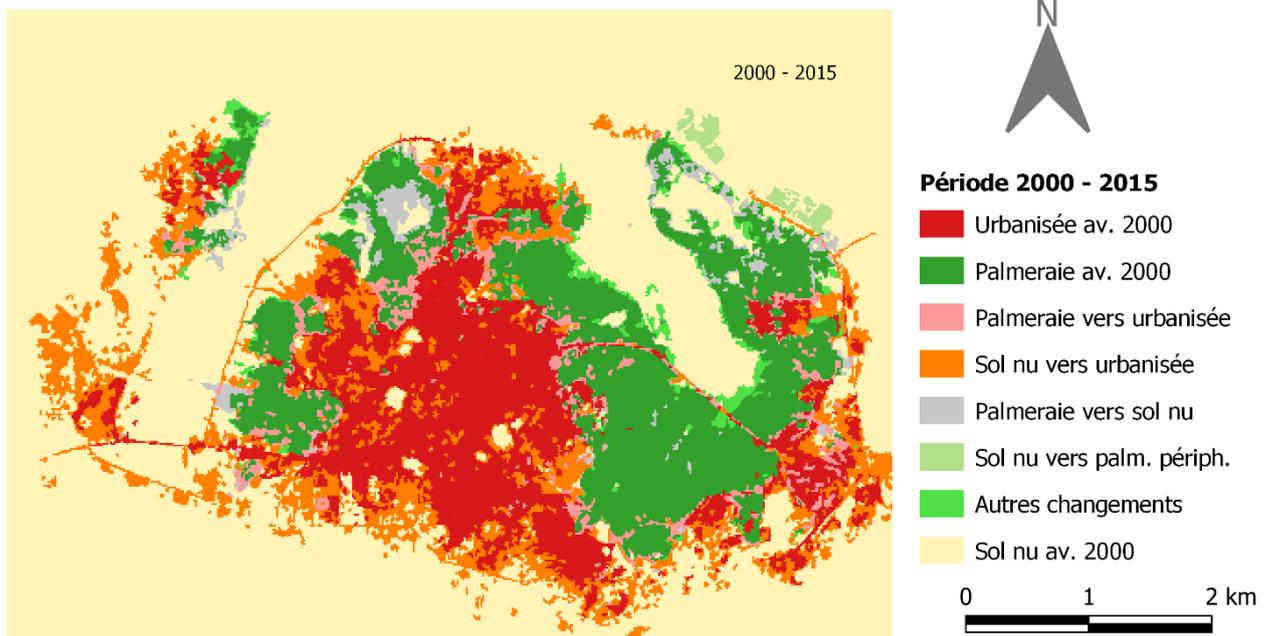


Figure VII-13 : Changement de l'occupation du sol entre 1985 et 2000 (Ouargla)

VII.5.3.3. Discussion

Globalement, la cartographie du changement spatiotemporel a révélé que la classe du bâti a connu un important spatial caractérisant pratiquement toute la période d'étude, mais un rythme plus accéléré constaté pendant la seconde période (2000 -2015). Morphologiquement, cette croissance spatiale a pris en premier temps (1985 – 2000) une forme plutôt continue, notamment en continuité avec la ville-centre jusqu'au remplissage de sa cuvette. En second temps (2000 – 2015), les extensions urbaines sont devenues davantage discontinues en franchissant les limites physiques définissant « la cuvette urbaine » et en aboutissant à l'apparition et le développement de la nouvelle ville (Hais En Nasr) sur le plateau de Bamendil, ainsi que les autres quartiers périphériques au-delà de la palmeraie. Trois traits morphologiques caractérisent la croissance spatiale de la ville de Ouargla :

- une conurbation réunissant les agglomérations existantes pour former l'actuelle Grande Ouargla ;
- une pénétration progressive de la palmeraie par les extensions bâties notamment au nord vers le quartier de Sidi Khouiled, et à l'ouest vers les quartiers de Beni H'Cen et Bouamar ;

- un étalement au-delà de la *sebkha* de l'urbanisation traduit par la création de la nouvelle ville qui va par la suite recevoir la majorité des programmes de développement urbain.

En revanche, la palmeraie a subi un processus opposé. Sa surface s'est pratiquement reculée sur toute la période d'étude, mais avec plus de perte pendant le premier intervalle d'étude (1985 – 2000). Ainsi, et en conséquence du franchissement de cette trame verte par les extensions incontrôlées des surfaces bâties, cet espace vital se trouve soumis au processus de fragmentation affectant sa configuration paysagère et menant également à la disparition d'une bonne partie de sa surface agricole (figure VII-14).

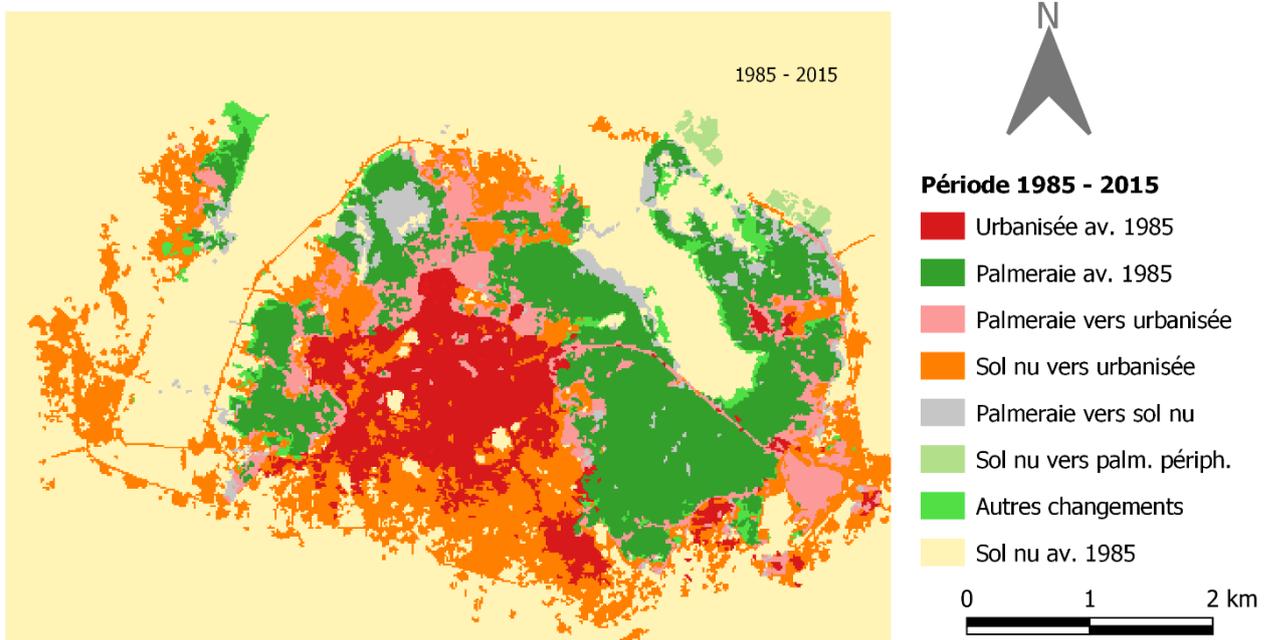


Figure VII-14 : Changement d'occupation du sol entre 1985 et 2015 (carte synthétique)

VII.6. La ville de Touggourt : franchissement des limites physiques et naturelles

VII.6.1. Données utilisées

Quant à la ville de Touggourt, les images mobilisées sont les suivantes : une image acquise du capteur Landsat 5 TM le 30/04/1985, une seconde scène acquise du capteur Landsat 7 ETM+ le 15/04/2000 et une troisième scène obtenue via le capteur Landsat 8 OLI-TIRS le 03/05/2015. Ces trois scènes ne présentent aucune nébulosité pouvant affecter leurs qualités informationnelles. Les caractéristiques techniques des images mobilisées sont illustrées dans le tableau qui suit (tableau VII-8).

| Image | Capteur | Date | Bandes | Nébulosité | RMSE (m) | Rés. spatiale (m) |
|---------|--------------------|------------|-------------|------------|----------|-------------------|
| Image 1 | Landsat 5 TM | 23-04-1985 | 1-2-3-4-5-7 | 0 | 7 345 | 30 |
| Image 2 | Landsat 7 ETM+ | 24-04-2000 | 1-2-3-4-5-7 | 0 | 4 028 | 30 |
| Image 3 | Landsat 8 OLI-TIRS | 12-05-2015 | 2-3-4-5-6-7 | 0 | 8 433 | 30 |

Tableau VII-8 : Caractéristiques des images Landsat utilisées (Touggourt)

Les documents de références utilisés sont : trois images Geotiff acquises aussi via l'USGS, correspondant aux mêmes dates d'acquisition des images classifiées, deux plans parcellaires des années 2000 et 2014, ainsi que des scènes historiques de Google Earth.

VII.6.2. Prétraitement et normalisation des images

De la même manière comme pour les deux cas précédant, les images sélectionnées pour cette étude (collection de niveaux L1TP) sont géométriquement autorectifiées et géocodées préalablement avant leurs diffusions par l'USGS, selon le système de référencement géographique WGS 84, zone 31 Nord. L'estimation standard d'erreur RMSE (Rout Mean Square Error) a révélé un niveau négligeable d'erreur (moins de 0,28 pixel). La zone d'étude est extraite à travers une fenêtre de découpe incluant l'actuel périmètre urbain ainsi que son proche environnement périurbain. Elle est incluse entre les longitudes ($6^{\circ}1'5,57''$ et $6^{\circ}12'43,56''$ Est) et les latitudes ($33^{\circ}2'55,8''$ et $33^{\circ}10'6,9''$ Nord). Ainsi, un calibrage radiométrique, consistant à convertir les radiances des images en réflectances, a été effectué avec correction atmosphérique de type TOA et soustraction des objets sombres (non attribués) en appliquant le modèle DOS1.

Un rehaussement des images est ensuite appliqué afin d'améliorer leurs qualités et de faciliter leurs interprétations visuelles. Une composition colorée en fausses couleurs a été maintenue avec la

combinaison des bandes (4-3-2) pour les images TM et ETM+ et (5-4-3) pour celle de Landsat 8 (figure VII-15).

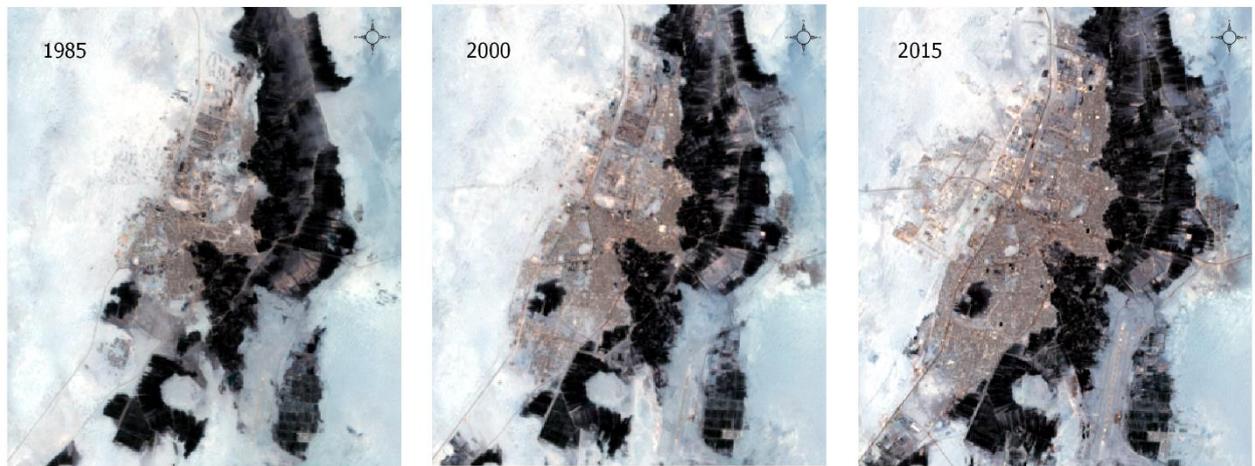


Figure VII-15 : Compositions en fausses couleurs des images utilisées (1985 – 2000 – 2015)

Auteur à partir d'une imagerie USGS

VII.6.3. Résultats et interprétation

VII.6.3.1. Validation de la classification

Les cartes thématiques obtenues sont illustrées dans la figure (Figure VII-16). Elles correspondent respectivement aux années 1985, 2000 et 2015. Les matrices de confusion générées pour ces trois cartes ont montré un niveau satisfaisant de précision, aussi bien pour la précision globale et la précision des classes, notamment celles des surfaces urbanisées et celle de la palmeraie. L'indice de Kappa (K_{hat}) a ainsi montré un niveau de précision assez acceptable avec les valeurs 0.90, 0.86 et 0.93 pour les années 1985, 2000 et 2015 respectivement (tableau VII-9).

| Type d'évaluation | 1985 | 2000 | 2015 |
|--|-------|-------|-------|
| Précision globale (%) | 94,50 | 90,24 | 96,46 |
| Précision classe « surface urbanisée » (%) | 94,10 | 90,62 | 96,00 |
| Précision classe « palmeraie » (%) | 93,20 | 91,80 | 95,46 |
| Indice K_{hat} | 0,90 | 0,86 | 0,93 |

Tableau VII-9 : Précision de la classification des trois images 1985, 2000 et 2015 (Touggourt)

VII.6.3.2. La cartographie du changement : un net étalement des surfaces bâties

Les cartes obtenues sont illustrées dans la figure qui suit (Figure VII-16).

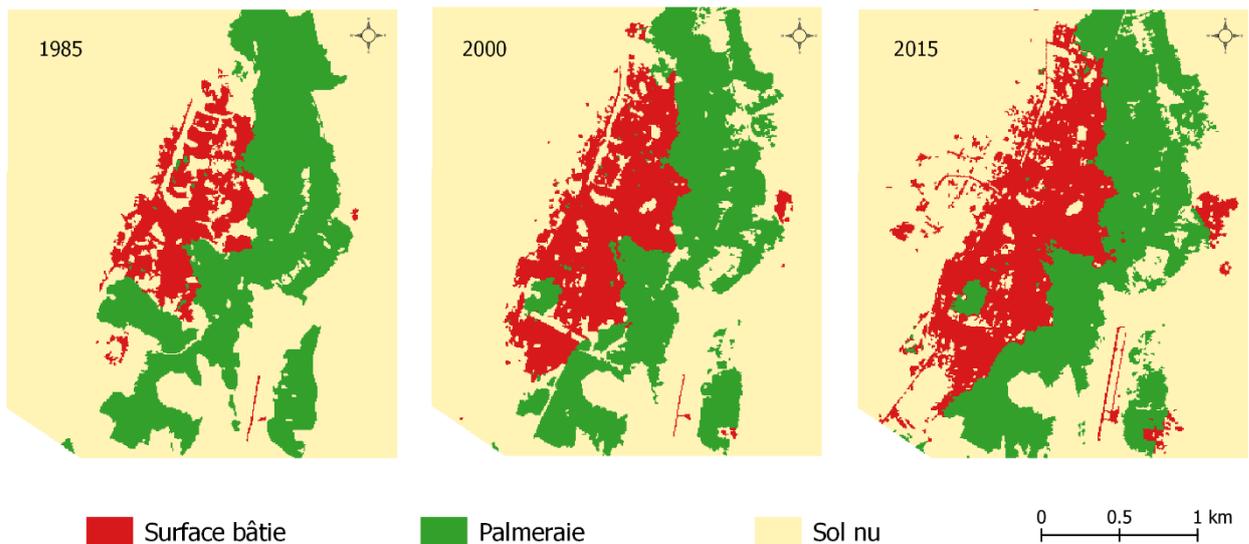


Figure VII-16 : Évolution spatiotemporelle de la ville de Touggourt entre 1985 et 2015

L'observation des cartes multitemporelle illustrées dans la figure ci-dessus (figure VII-16) révèle une importante croissance du tissu urbain. Cette croissance du bâti est en partie au détriment de la palmeraie, particulièrement les parcelles situées à proximité des zones urbaines. Entre les deux périodes d'étude, les extensions urbaines ont enregistré un changement de mode de croissance. Pendant la période (1985 – 2000), la tache du bâti a suivi une logique continue dans son évolution, vers le nord et vers le sud. Il s'agit là d'une urbanisation linéaire en parallèle avec la route nationale n° 03. Lors de cette croissance, la palmeraie a subi un processus de grignotage de ses parcelles et parfois même de conversion complète de quelques fragments comme c'est le cas des quartiers Ennasr et El-Moustakbal ainsi que la partie est de la cité Ain Sahara au sud de ville. Entre 2000 et 2015, la croissance spatiale de la ville a marqué l'évolution des classes d'occupation et d'utilisation du sol. Cette croissance a suivi deux types d'évolution. En continu par densification des interstices urbains au sein de la ville, et en discontinu au-delà de limites urbaines. Les nouvelles extensions urbaines sont opérées d'une part à l'ouest de la RN° 03 (cité El-Moustakbal), cette nouvelle zone urbanisée va recevoir la grande partie des programmes de logements et d'équipements ; d'autre part, à l'est de la palmeraie avec l'apparition puis l'extension du quartier Sidi Mahdi. Quant à la palmeraie, cette composante oasisienne a globalement enregistré un recul de surface à l'image des oasis précédentes, mais avec moins d'ampleur. Toutefois, une remarquable avancée du bâti traversant le centre de la palmeraie (palmeraie de Chemoura) est à noter. À cours ou à moyen terme, et avec le même rythme d'évolution, ce processus pourrait amener à la fragmentation complète de la palmeraie.

Les variations quantitatives en matière d'occupation et d'utilisation du sol sont illustrées dans le tableau suivant (tableau VII-10). Les résultats obtenus montrent deux tendances différentes caractérisant les classes d'occupation et d'utilisation du sol avec variation d'ampleur entre les périodes d'études.

| | Surface (ha) | | | 1985 - 2000 | | | 2000-2015 | | |
|------------------|--------------|---------|---------|-------------|-------|--------|-----------|-------|--------|
| | 1985 | 2000 | 2015 | +/- (ha) | % | Év/an | +/- (ha) | % | Év/an |
| Bâti | 890,64 | 1538,64 | 2094,39 | 648,00 | 72,76 | 43,2 | 555,75 | 36,12 | 37,05 |
| Palmeraie | 2700,18 | 2487,33 | 2586,51 | -212,85 | -7,88 | -14,19 | 99,18 | 3,99 | 6,61 |
| Sol nu | 7812,81 | 7377,66 | 6722,73 | -435,15 | -5,57 | -29,01 | -654,93 | -8,88 | -43,66 |

Tableau VII-10 : Évolution surfacique des classes d'occupation et d'utilisation du sol (Touggourt)

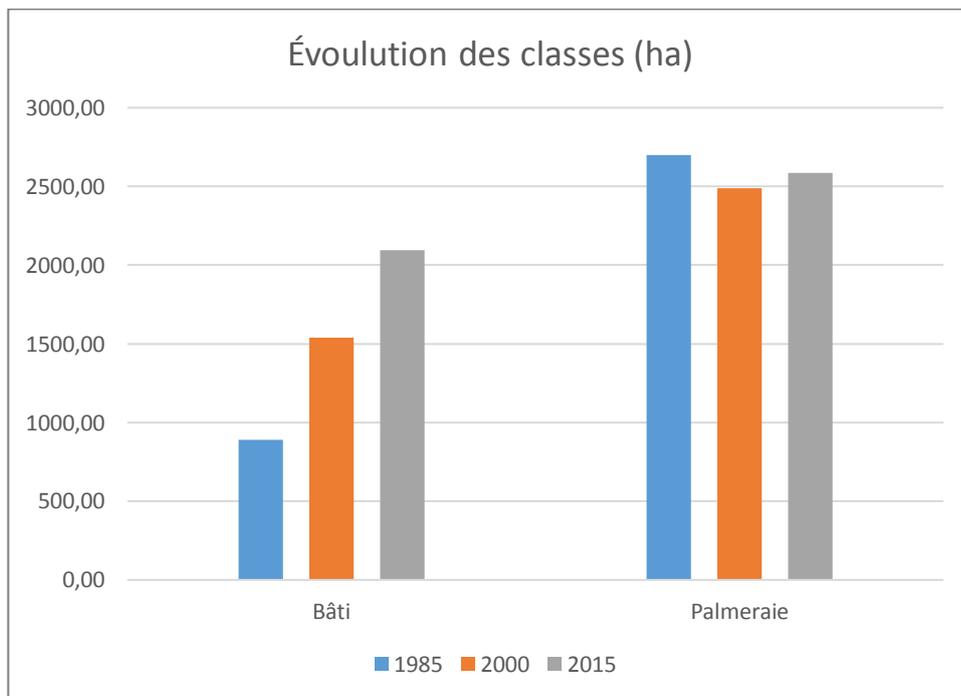


Figure VII-17 : Évolution surfacique des classes UOS de l'oasis de Touggourt

Le premier intervalle d'étude est marqué par une nette croissance de la classe du bâti. Cette classe a gagné une surface estimée à 648 ha. Elle est passée de 890.64 ha en 1985 à 2094.39 ha en 2000, soit un taux de croissance estimée à 72.76 %. En revanche, la palmeraie a enregistré une perte de surface qui s'est diminuée de 2700.18 ha en 1985 à 2487.33 ha en 2000, soit une perte de 212.85 ha pendant

15 ans, ce qui équivaut un pourcentage de 7.88 % de perte. Les sols nus se sont ainsi diminués de 7812.81 ha en 1985 vers 7377.66 ha en 2000 (figure VII-17 et VII-18).

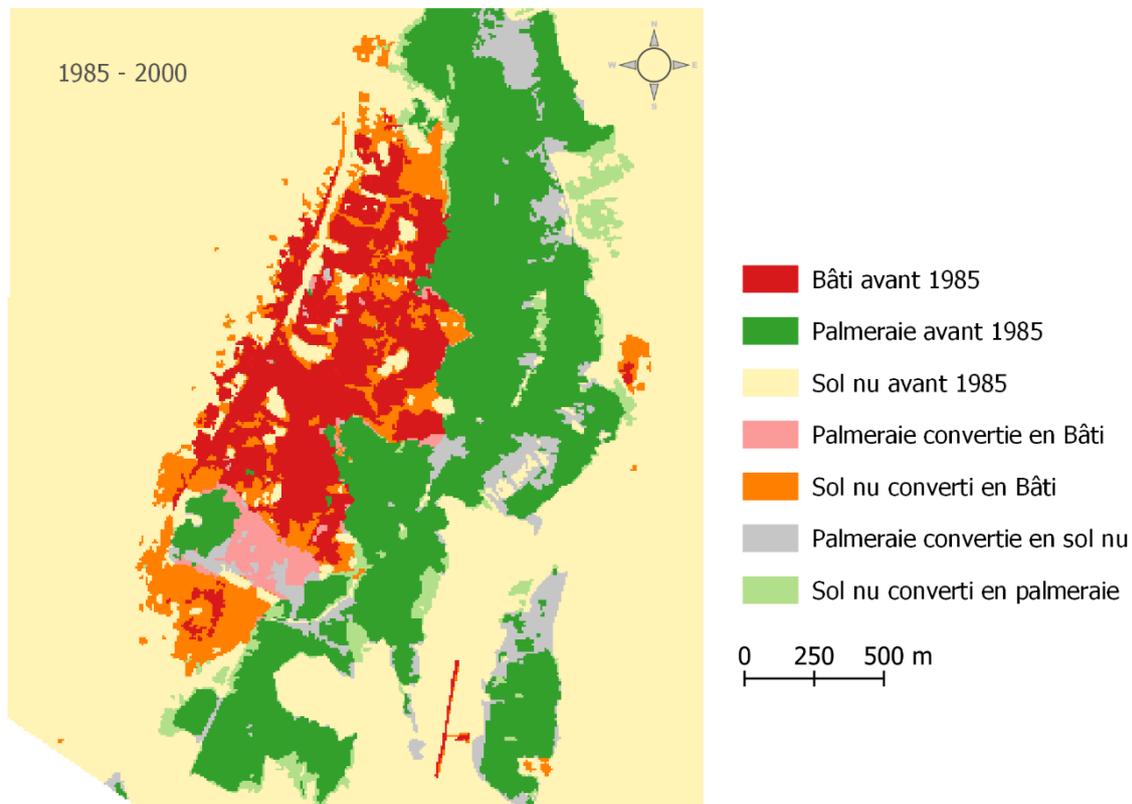


Figure VII-18 : Le changement de l'UOS de l'oasis de Touggourt entre 1985 et 2000

Lors de la seconde période (figure VII-19), la croissance de la classe du Bâti demeure la plus marquante. Entre 1985 et 2015, les zones urbanisées ont augmenté leurs surfaces de 1538.64 ha à 2094.39 ha, soit une croissance de 555.75 ha, c'est-à-dire un pourcentage de 36.12 %, contre 72.76 % de croissance pendant la première période, un ralentissement d'ampleur de la croissance est donc à souligner. La palmeraie, quant à elle, elle a récupéré une partie de sa surface perdue entre 1985 et 2000. Sa surface s'est augmentée de 2487.33 ha en 2000 pour se remonter à la surface de 2586.51 ha en 2015, soit un regain de surface égale à 99.18 ha. La classe du Sol nu a logiquement continué sa diminution de surface à la faveur des autres classes. Elle a perdu un cumul de surface de l'ordre de 654.93 ha entre 2000 et 2015 pour passer d'une surface de 7377.66 en 2000 pour se diminuer à 6722.73 ha en 2015.

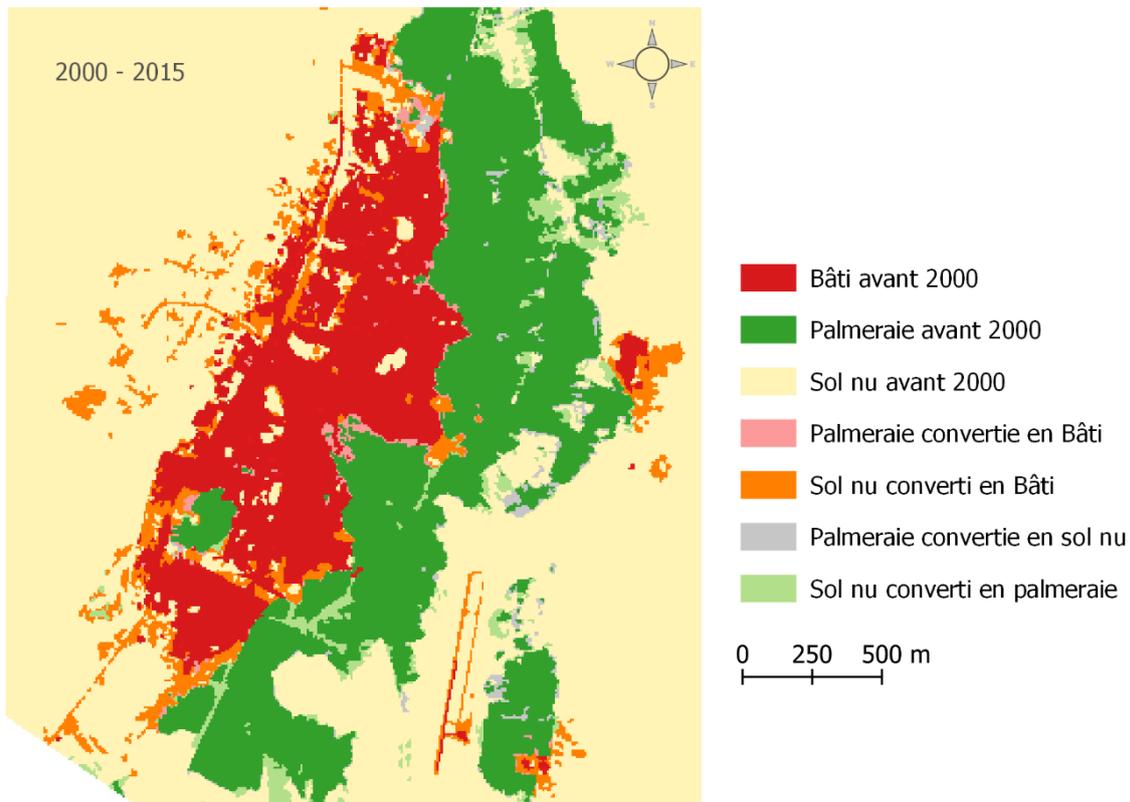


Figure VII-19 : Le changement UOS de l'Oasis de Touggourt entre 2000 et 2015

VII.6.3.3. Un étalement en franchissement des barrières physiques : Discussion

Sur toute la période d'étude, la classe du bâti a enregistré une augmentation importante de sa surface. Elle est passée de 890.64 ha en 1985 à 1538.64 ha en 2000 pour atteindre 2094.39 ha en 2015. Une variance de rythme de croissance est constatée avec un gain de surface estimé à 648 ha pendant la première période contre un gain reculé à 555.75 ha durant la deuxième période. Ce ralentissement de gain de surfaces est principalement lié, en plus des extensions résidentielles et d'infrastructures, à la création d'une large zone d'activité et de l'aéroport, ce qui a spatialement contribué à l'amplification de la croissance de la tache du bâti pendant cette première période. Par ailleurs, la palmeraie a un processus varié entre les deux périodes d'étude. Entre 1985 et 2000, cette classe a perdu 212.85 ha de sa surface. Mais et en revanche, un regain de surface estimé à 6.61 ha est enregistré au profit de la palmeraie. Cette surface a pu être récupérée à la suite des travaux de sauvetage des palmeraies à travers le projet de drainage mis en place pendant la même période d'étude (figure VII-20).

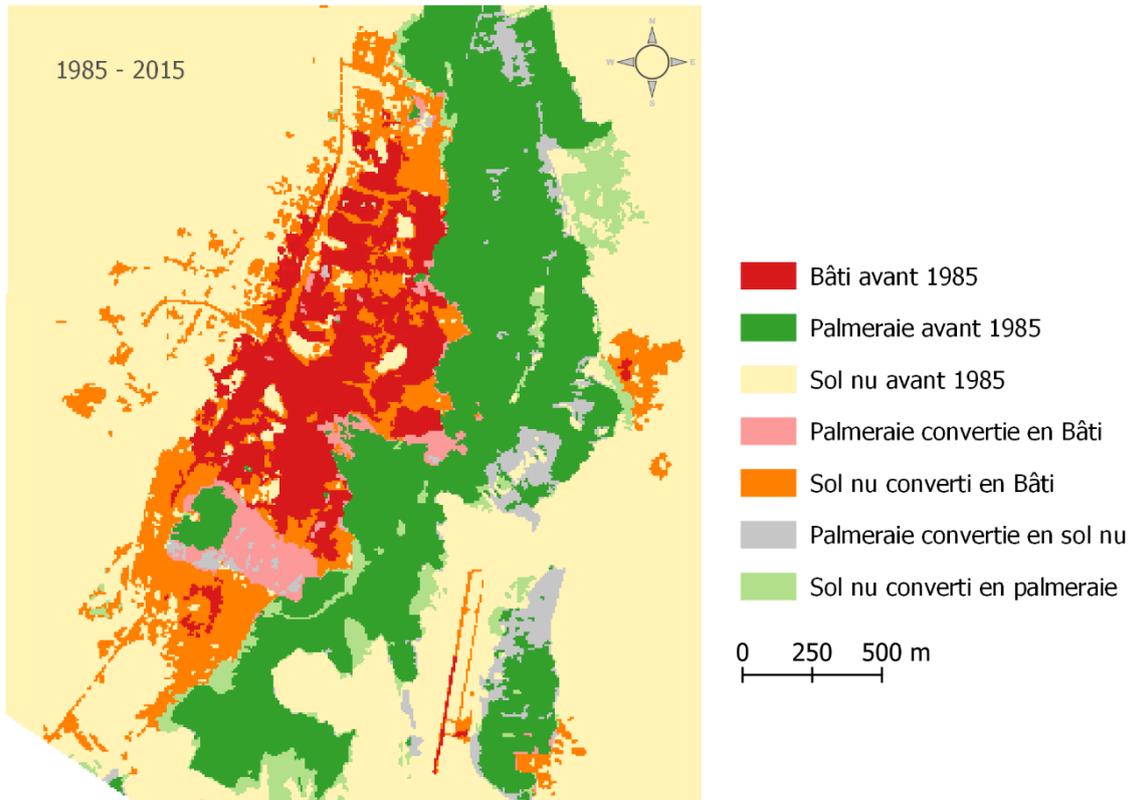


Figure VII-20 : Évolution de l'UOS entre 1985 et 2015 : carte de synthèse

VII.7. Synthèse : des traits morphologiques communs, mais avec des ampleurs distinguées

Sur toute la période d'étude, les trois grandes villes du Bas-Sahara algérien ont toutes enregistré une extraordinaire croissance de leurs taches urbaines contre un net recul des palmeraies. Des traits communs réunissant l'évolution spatiale de ces trois villes peuvent être révélés (figure VII-21).



Figure VII-21 : Évolution spatiotemporelle des villes de Biskra, Ouargla et Touggourt (1985 – 2015)

Le premier élément de commun est que les extensions urbaines ont toutes franchi les limites physiques et naturelles définies depuis leurs fondations. Pour Biskra, on trouve l'Oued de Biskra à l'ouest et la palmeraie au sud ; à Ouargla, ce sont la *sebkra* et les palmeraies entourant l'ancienne ville en demi-cercle ; Touggourt, quant à elle, est enserré entre la palmeraie à l'est et la RN° 03 à l'ouest. L'urbanisation actuelle est en train de s'opérer pratiquement au-delà de ces limites « oasiennes ». Il s'agit là donc d'un report de l'urbanisation, dont la forme urbaine produite tend à avoir une morphologie fragmentée. Cette forme s'est traduite par la création d'une nouvelle ville à Ouargla (Hai En-Nasr), l'intégration d'autres territoires communaux périphériques comme à Biskra qui a intégré les communes de Chetma à l'est et El-Hadjeb à l'ouest, et l'apparition de nouvelle zone urbanisée à l'ouest de la RN° 03 à Touggourt (Hai El Moustakbal).

Un deuxième trait de commun caractérisant les trois villes oasiennes est l'achèvement du phénomène de conurbation. Ces trois villes constituent actuellement, pour chacune d'elles, un ensemble d'agglomérations qui se sont parvenu à être spatialement jointes pour former un seul tissu bâti. Les extensions successives du tissu urbain de Biskra ont abouti à atteindre l'agglomération de Chetma, les quatre agglomérations constituant l'oasis de Ouargla se sont réunies pour former une seule entité morphologique qui est celle du Grand Ouargla, pareillement à Touggourt d'où les anciennes agglomérations « Ksouriennes » (Touggourt, El Nezla, Tebesbest, et Ezouia El Abidia) se sont jointes à la suite de leurs croissances en continu pour former l'actuel Grand Touggourt. Administrativement, ces conurbations ont conduit à la gestion intercommunale et à la mise en place des plans intercommunaux d'aménagement et d'urbanisme, dont la planification des extensions urbaines sont inscrites dans des logiques supracommunales.

Un troisième trait de commun à soulever correspond aux remarquables reculs des palmeraies. La végétation urbaine a perdu d'importantes surfaces au sein des périmètres urbains aux profits des surfaces bâties qui se sont propagées de manière accélérée et même incontrôlée. Ce recul a pris plusieurs formes : en grignotant les palmeraies avoisinantes comme c'est le cas de Ouargla et Touggourt, ou en traversant ces « trames » vertes pour les morceler (fragmenter), notamment à Ouargla, ou même en éliminant la bonne partie : là, on parle d'une conversion paysagère presque totale qui se rapporte au cas du Biskra. Malgré que la perte surfacique des grandes trames oasiennes soit constatée sur les trois oasis, les ampleurs se diffèrent entre ces villes. La palmeraie de Biskra est la plus touchée, étant donné que son espace est quasiment envahi par les constructions spontanées, quoique quelques petits fragments persistent jusqu'à nos jours. La palmeraie de Ouargla, avec moins d'ampleur par rapport à celle de Biskra, a subi une autre forme de dégradation. Le franchissement

progressif des surfaces bâties à l'intérieur de la palmeraie a eu comme conséquence le morcellement de cet espace originellement constitué d'un seul fragment compact, pour le rendre fragmenté en plusieurs taches déconnectées. La palmeraie de Touggourt est la moins atteinte par rapport à celles des cas précédents. Mais elle n'est pas à l'abri quant aux dynamiques de conversion spatiale apportées par l'urbanisation, compte tenu des résultats descriptifs de la détection du changement (DC).

Le quatrième élément de commun qu'on a pu constater se rapporte à l'accélération du rythme de croissance pendant la seconde période d'étude. L'avancée de la frange urbaine était plus marquée entre 2000 et 2015 par rapport à la période (1985 – 2000). Cela peut s'expliquer par deux facteurs principaux : d'un côté, l'amplification de grands programmes de logements et d'infrastructure en réponse à la pression démographique croissante ; d'un autre côté, la propagation des quartiers résidentiels spontanés, notamment à la fin des années 90 à la suite des conditions sécuritaires exceptionnelles qu'a connu le pays pendant cette période. Cette accélération d'urbanisation était cependant moins estimée par les responsables locaux. Les documents d'aménagement et d'urbanisme se trouvent souvent moins adaptés à l'avancement rapide des programmes de développement urbain et se trouvent parfois aussi non prises en considération quant aux choix des sites dédiés aux nouvelles implantations, ce qui a négativement contribué à l'altération des paysages oasiens originels distinguant ces villes.

Par surcroît, l'analyse quantitative a révélé des particularités individualisant l'évolution spatiale de chacune de ces trois villes oasiennes (figure VII-22). L'ampleur de l'étalement des tissus urbains est plus marquée à Biskra avec un taux de croissance des surfaces bâties estimé à 447.26 %, soit une multiplication par 4.5 fois de la surface urbanisée pendant 30 ans, suivie par Ouargla qui a enregistré un pourcentage de croissance égale à 258.75 %, soit une multiplication par 3.6 fois. La ville de Touggourt vient en dernier lieu avec un taux d'accroissement spatial de l'ordre de 135.16 %, c'est-à-dire une multiplication par 2.4 fois pendant la même période d'étude.

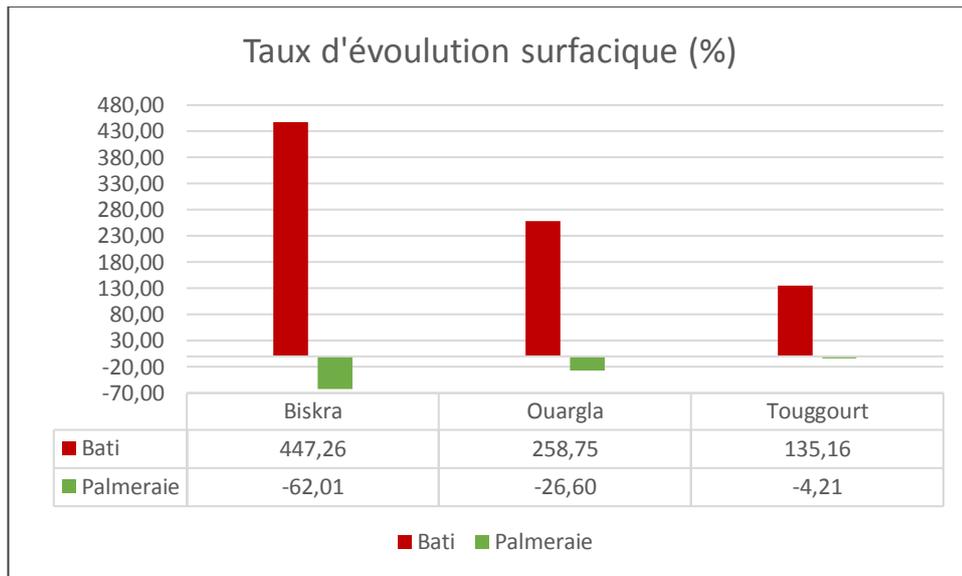


Figure VII-22 : Ampleurs d'évolution spatiale pour les villes de Biskra, Ouargla et Touggourt

L'évolution des palmeraies a ainsi suivi la même logique et le même ordre d'ampleur, mais de décadence différenciée. Les pertes de surfaces agricoles se manifestent plus à Biskra, puis à Ouargla et au final à Touggourt. La palmeraie de Biskra a perdu une part de 62 % de sa surface, contre une perte de 26.60 % à Ouargla et 4.20 % à Touggourt.

L'étalement des zones bâties est plus amplifié à Biskra et à Ouargla par rapport à Touggourt. Cet écart nettement remarqué revient principalement à la différence de statuts politico-économiques que présente chacune de ces villes. Les villes de Biskra et Ouargla, étant chefs-lieux de wilaya et accumulant également plusieurs opportunités économiques, sont plus attractives d'investissements et de population, ce qui a contribué à subir plus d'amplification en matière de croissance spatiale. À ce titre, la ville de Biskra, étant donné qu'elle est historiquement distinguée par un nombre de population plus élevé ainsi que par sa position géographique de carrefour d'échange et de contact, se trouve la plus marquée par l'étalement de sa tache urbaine en même temps que sa palmeraie soit la plus touchée par cet étalement spatial.

Conclusion

La cartographie du changement spatiotemporel des classes UOS et la détection du changement ont permis de révéler les tendances de croissance caractérisant l'évolution de chaque type d'occupation du sol. Pour les trois villes, les surfaces urbanisées ont considérablement gagné de surfaces en dépits des classes des palmeraies et en franchissant en même temps les limites naturelles et physiques définissant originellement l'espace oasien pour chaque oasis. Des éléments communs de description

ont pu être révélés à l'issue d'une lecture analogique de la cartographie synthétique de l'évolution des trois oasis. Les taches urbaines se sont pratiquement évoluées dans une double logique : en conurbation pour intégrer les différentes agglomérations secondaires, et en éclatement au-delà des limites naturelles pour déclencher des processus d'urbanisation « reportée ».

Quant aux palmeraies, ces bandes vertes ont toutes subi des franchissements de leurs espaces, mais avec des ampleurs différentes. L'impact de l'avancée des surfaces bâties est plus accentué à Biskra et à Ouargla. Cette différence d'impact peut être justifiée par la différence des statuts économiques et administratifs que présente chaque ville.

Ce volet d'investigation nous a montré l'importance de la télédétection spatiale et des techniques de cartographie et de calcul de changement dans le suivi et la compréhension de l'étalement rapide des villes oasiennes, et qui offrent également l'opportunité d'actualiser l'état de l'occupation et d'utilisation du sol : une information nécessaire dans toute action de gestion et d'aménagement de l'espace oasien.

Chapitre VIII. Quantification et métriques spatiales des formes d'urbanisation caractérisant les grandes villes du Bas-Sahara algérien : application des métriques paysagères

Introduction

La mesure des éléments de composition et de structure que présentent les paysages est une pensée connue en écologie du paysage. Elle permet, à travers la confrontation aux indices de référence, la description et la qualification des formes paysagères autant dans des approches statiques que diachroniques. La qualification des transformations spatiotemporelles affectant les paysages est permise à travers le suivi de métriques paysagères. C'est dans cette optique que l'analyse des villes de notre corpus d'étude sera entamée et fera l'objet de ce dernier chapitre. En se basant sur la cartographie spatiotemporelle générée précédemment via la classification (chapitre VII), nous essayerons en premier lieu de calculer les métriques paysagères sélectionnées pour cette étude à chaque étape d'évolution, pour se procéder par la suite à la mise en valeur des changements affectant les paysages oasiens afin de pouvoir mettre en valeur l'impact de l'étalement spatial des tissus urbains de ces villes.

La démarche suivie dans ce chapitre, comme pour le chapitre précédant, est structurée en deux étapes. Nous essayerons en premier temps d'étudier chaque ville prise séparément pour par la suite entamer l'analyse comparative de l'ensemble des trois villes. L'objectif principal est d'essayer de caractériser et d'évaluer les formes spatiotemporelles produites à la suite de l'avancée excessive de la frange urbaine révélée notamment par la détection du changement et l'analyse statistique vues précédemment (chapitres XII et VIII).

VIII.1. Sélection des métriques

VIII.1.1. Rappel sur la typologie et l'utilité des métriques paysagères

VIII.1.1.1. Les métriques de surfaces et de bordures

Cette catégorie d'indices représente une large série de mesures qui traitent les tailles des « patches » et la quantification de leurs bordures. Ces métriques s'appuient pratiquement sur les mêmes modèles de base d'évaluation en raison de la similarité de leurs méthodes de calcul. La surface d'une telle parcelle présentant une mosaïque passagère peut être l'une des informations les plus utiles que peut contenir ce paysage. En plus qu'elle est à la base de calcul de plusieurs indices, la surface elle-même des taches présente une propriété importante pouvant conditionner l'équilibre et le fonctionnement

écologique des paysages. À titre d'exemple, l'épanouissement de telle ou telle biodiversité peut dépendre aux conditions de surface incluse entre un minimum et maximum à garantir. Il est à noter que les indices surfaciques décrivent plutôt la composition du paysage que sa configuration. Pour décrire la composition d'un paysage, il est fondamental de faire le recours aux indices surfacique, notamment l'indice (CA⁴⁰) représentant la surface des classes d'occupation du sol et l'indice (PLAND⁴¹) représentant les pourcentages dont elle occupe chacune de ces classes par rapport à l'ensemble du paysage. Ces deux indices peuvent renseigner sur le niveau de présence d'un fragment donné et de son importance. Ils renseignent aussi sur la dominance ou, au contraire, la pénurie d'une classe d'occupation du sol. Dans une approche diachronique, le suivi des moyennes de surfaces aide à ressortir la tendance spatiotemporelle caractérisant une tache d'habitat, entre agrégation ou fragmentation par exemple. La diminution des moyennes des surfaces des fragments appartenant à la même classe d'occupation du sol peut signifier la fragmentation de cette classe. Un autre indice est aussi communément utilisé pour compléter la description des paysages. Il s'agit du nombre de taches (NP⁴²). Cet indice reflète l'abondance ou la rareté d'une composante paysagère. Étant donné que la surface moyenne est directement liée à la surface totale des taches et à leurs nombres, l'interprétation de cet indice n'a de pertinence qu'en corrélation avec ses éléments de mesure. Ainsi, la prise en compte seulement de l'un de ces indices peut amener à une description incomplète du paysage. Il est donc important d'opter pour la combinaison de ces trois indices afin de pouvoir compléter l'analyse.

VIII.1.1.2. Les descripteurs de configuration : indices d'agrégation

La configuration spatiale d'un paysage se rapporte à la manière dont les taches sont disposées dans le paysage. Elle peut être abordée à travers la description de leurs distributions, la quantification de leur dispersion et leur agglomération et la mesure du niveau d'isolement ou connexion de ces taches d'habitat. Les indices d'agrégation permettent la qualification de ces propriétés spatiales. L'indice d'agrégation (AI) est souvent utilisé pour mesurer le niveau d'agrégation ou fragmentation d'un ensemble de taches à une échelle de classe ou de paysage. L'indice de forme du paysage (LSI⁴³) est aussi un autre indice indiquant, compte tenu de son mode de calcul, la complexité morphologique des taches. Il peut également décrire la compacité ou l'éclatement d'un paysage donné : une grande valeur de LSI signifie une tendance de dispersion des taches et vice-versa. Le niveau d'isolement ou de connexion des fragments peut être déterminé à travers le calcul de la distance euclidienne des

⁴⁰ Class area

⁴¹ Percentage of landscape

⁴² Number of patches

⁴³ Landscape shape index

fragments les plus proches (ENN_MN⁴⁴). Cet indice est souvent employé en écologie du paysage en raison de la logique simple de son calcul. Les distances ici se réfèrent au calcul géométrique des lignes droites les plus courtes reliant les taches appartenant à la classe concernée.

VIII.1.2. Les métriques maintenues

La configuration spatiale caractérisant les paysages oasiens des villes de Biskra, Ouargla et Touggourt peut être abordée à travers la mesure des éléments décrivant leurs compositions comme le nombre de fragments constituant le paysage, leurs tailles moyennes, leurs formes, leurs agrégations (ou fragmentations). En vue de mettre en exergue les évolutions urbaines en rapport avec l'évolution des palmeraies, deux classes ont été ciblées : le bâti et la végétation urbaine. À partir des trois cartes thématiques générées par la classification et en tenant compte de l'échelle d'étude qui est celle de la tâche urbaine, six indices spatiaux ont été sélectionnés pour entamer cette analyse. Ces indices sont décrits comme suivant (Aguéjdad et Hubert-Moy, 2016 ; McGarigal et al., 2012 ; Skupinski et al., 2009) :

VIII.1.2.1. Le nombre de fragments NP (Number of Patch)

Cet indice indique le nombre d'entités constituant le paysage (la mosaïque). Le suivi de cet indice permet de savoir s'il y a apparition ou disparition de certains fragments durant une période donnée. Il peut ainsi refléter le changement de la composition de chaque classe étudiée.

VIII.1.2.2. La portion occupée dans le paysage (PLAND)

Cet indice se rapporte à la part surfacique occupée par une classe d'occupation du sol. C'est un indice pouvant indiquer la dominance dans la composition du paysage.

VIII.1.2.3. L'indice du plus large fragment LPI (Larget Patch Index)

Pour une classe donnée, cet indice de forme correspond à la portion occupée par le plus grand fragment. Le calcul de cette métrique peut indiquer le niveau de dominance des plus larges fragments des différentes classes. LPI se rapprochant à la valeur 0, cela signifie que le fragment le plus large de la classe concernée est minime dans la constitution du paysage. Par contre, LPI = 100, ce fragment, dans ce cas, occupe la totalité du paysage.

VIII.1.2.4. La taille moyenne des fragments AREA_MN

La surface moyenne des tâches appartenant à la même classe, mesurée en hectare (ha). Le calcul combiné de cet indice avec celui du nombre de fragments NP permet de rendre compte du niveau de

⁴⁴ Euclidean nearest neighbor distance

fragmentation des entités appartenant à la même classe. Ainsi, le suivi de ces deux indices conduit à ressortir la tendance spatiotemporelle caractérisant l'évolution d'une classe d'occupation et d'utilisation du sol.

VIII.1.2.5. La distance euclidienne des fragments les plus proches (ENN_MN)

C'est un indicateur de configuration servant à mesurer la connectivité dans le paysage. La mesure de cette métrique « intra-fragments » permet d'évaluer le niveau de voisinage caractérisant les fragments de la même classe.

VIII.1.2.6. L'indice de forme du paysage LSI (Landscape Shape Index)

Cet indice correspond au rapport du total des bordures (m) entre fragments au total de la surface du paysage (formule 4). La compacité (ou la fragmentation dans le cas inverse) d'un paysage peut être évaluée à travers cet indice ainsi que sa complexité géométrique. La valeur minimale de cet indice ($LSI = 1$) signifie une compacité maximale ; le paysage dans ce cas est constitué d'un seul fragment carré. En revanche, une valeur plus grande pour cet indice indique que le paysage est plus fragmenté ou les formes des fragments tendent à devenir plus complexes.

VIII.1.2.7. L'indice d'agrégation (AI)

C'est un indice synthétique de configuration décrivant l'organisation et la disposition des fragments d'une classe d'occupation du sol donnée. La mesure de cet indice permet de révéler le niveau de compacité (agrégation) ou d'isolement des fragments composant une classe paysagère. La valeur de (AI) varie entre 0 et 100 %. AI tend vers l'augmentation, la classe concernée tend vers la compacité et inversement.

VIII.1.3. Récapitulation : tableau de synthèse

La description et l'interprétation des métriques sélectionnées pour cette analyse sont synthétisées dans le tableau qui suit (tableau VIII-1).

| Métrique | Formule | Intervalle | Interprétation |
|------------------------|--|-----------------------------|---|
| NP (unités) | $NP = n_i$ n_i : nombre de fragments composant la classe i | $NP \geq 1$ | NP est un indice de composition reflétant l'abondance ou la rareté d'une des composantes du paysage $NP \geq 0$ |
| PLAND (%) | $PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$ P_i : la proportion occupée dans le paysage par la classe i a_{ij} : l'aire (m ²) des fragments ij A : la surface totale (m ²) | $0 \leq PLAND \leq 100$ | Le calcul de PLAND permet de visualiser la composition de la mosaïque paysagère. Le suivi diachronique de cet indice aide à mettre en valeur l'impact du changement spatiotemporel de l'occupation du sol. |
| LPI (%) | $LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} (100)$ a_{ij} : aire d'un fragment ij (m ²) A : aire totale du paysage (m ²) | $0 \leq LPI \leq 100$ | LSI se rapprochant de 0 quand le plus grand fragment est extrêmement minime dans le paysage. LPI = 100 quand le paysage est constitué d'un seul fragment et que ce fragment occupe la totalité du paysage. |
| AREA_MN (ha) | $AREA_MN = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n_i}$ x_{ij} : surface totale des fragments constituant la même classe i n_i : nombre de taches composant la classe i | $AREA_MN > 0$ | Cet indice, corrélé avec le nombre de fragments NP permet d'avoir une première visualisation de la fragmentation du paysage. AREA_MN tend vers la diminution, le paysage tend à être plus fragmenté. |
| ENN_MN (m) | $ENN_MN = h_{ij}$ h_{ij} : distance (m) du fragment le plus proche voisin de même type | $ENN_MN \geq 0$ | ENN_MN augmente, la connectivité diminue. Cet indice est souvent corrélé avec d'autres mesures comme le nombre de taches (NP) et la taille moyenne des fragments AREA_MN. |
| LSI (%) | $LSI = \frac{0.25 \sum_{k=1}^m e_{ik}^*}{\sqrt{A}}$ a_{ij} : longueur totale de bordures entre fragments de classe i et k (m) A : aire totale du paysage (m ²) | $LSI \geq 1$, sans limites | LSI = 1 quand il s'agit d'un paysage constitué d'un seul fragment de forme carré. LSI augmente avec l'augmentation de l'irrégularité des fragments ou tout simplement l'augmentation de leurs bordures. |
| AI (%) | $AI = \left[\frac{g_{ii}}{\max^{\rightarrow} g_{ii}} \right] (100)$ g_{ij} : nombre de d'arêtes adjacentes des fragments de la classe i $\max^{\rightarrow} g_{ii}$: nombre maximum d'arêtes adjacentes des fragments de la classe i | $0 \leq AI \leq 100$ | AI = 0, cela signifie que les fragments ne sont pas connectés et la classe ciblée est extrêmement fragmentée. AI tend vers l'augmentation signifie que la classe tend à la compacité. AI = 100, la classe concernée est constituée d'un seul fragment intégralement compacte. |

Tableau VIII-1 : Description et interprétation des métriques paysagères sélectionnées

D'après (Aguéjdad et Hubert-Moy, 2016 ; McGarigal et al., 2012 ; Skupinski et al., 2009)

VIII.2. Résultats et interprétations

Les cartes thématiques générées à l'issue de la classification supervisée sont confrontées aux descripteurs paysagers, dans le but de mettre en valeur l'impact de l'évolution des surfaces bâties sur les écosystèmes oasiens en essayant de comparer les résultats correspondant à chaque période et leurs traductions spatiales aux résultats des autres périodes.

La démarche suivie consiste à exposer et à commenter en premier lieu les résultats des indicateurs surfaciques, puis l'évolution des indicateurs de distance et en dernier lieu les indices synthétiques de configuration. L'analyse sera couronnée en fin de compte par une lecture globale en mettant en exergue les comportements de la totalité des indices des différentes villes à fin de pouvoir révéler les tendances globales caractérisant l'évolution de l'ensemble des paysages oasiens constituant notre corpus d'étude.

VIII.2.1. Biskra : deux tendances nettement opposées

VIII.2.1.1. Évolution des indicateurs surfaciques (NP, PLAND, LPI)

Les résultats de calcul des métriques surfaciques sont illustrés dans la figure qui suit (figure VIII-1).

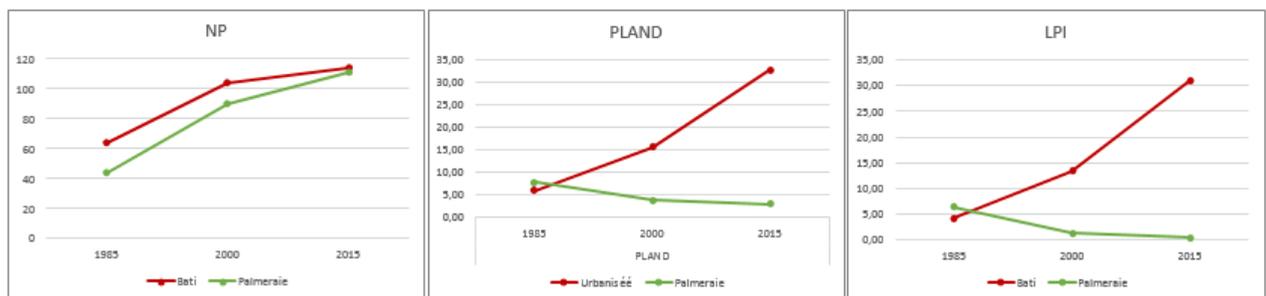


Figure VIII-1 : Évolution des indicateurs surfaciques pendant la période 1985 - 2015 (Biskra)

Le nombre de fragments s'est augmenté autant pour les deux classes, mais avec tendances opposées en matière d'évolution surfacique et de configuration spatiale. Pour la classe du bâti, les fragments constituant cette classe ont passé de 64 éléments en 1985 à 104 en 2000 pour atteindre 114 en 2015. Cette croissance s'est accompagnée d'une augmentation continue de la portion occupée par la tache du bâti représentée par l'indice PLAND, et de l'indice de plus grand fragment LPI. L'évolution de PLAND s'est manifestée par l'augmentation de ses valeurs qui sont passées de 6.00 % en 1985 à 15.71 % en 2000 pour atteindre une portion dominante en 2015 avec un pourcentage estimé à 32.82 %. LPI a quasiment enregistré la même tendance de croissance. Les valeurs enregistrées durant cette période sont 4.26, 13.35 et 31.07 respectivement pour les années 1985, 2000 et 2015.

Concernant la deuxième classe, celle de la végétation urbaine, le nombre de fragments s'est aussi augmenté durant cette période. Cette classe a compté 44 entités en 1985, 90 en 2000 et 111 en 2015. Néanmoins, une décroissance des valeurs des deux indices PLAND et LPI est nettement remarquée. Ce qui révèle une tendance opposée. La portion occupée par la palmeraie a enregistré une diminution de 7.8 % en 1985 à 3.86 % en 2000. En 2015, cette portion s'est ainsi diminuée pour marquer la valeur la plus minimale estimée à 2.96 %. La même cadence a ainsi caractérisé l'indice du plus grand fragment LPI. Les valeurs marquant cette métrique sont considérablement diminuées avec passage de 6.36 % en 1985 à 1.32 % en 2000 pour ne présenter qu'une valeur de 0.41 % en 2015, une portion assez minimale pour un paysage d'origine oasienne (figure VIII-1).

VIII.2.1.2. Évolution des indicateurs de distance

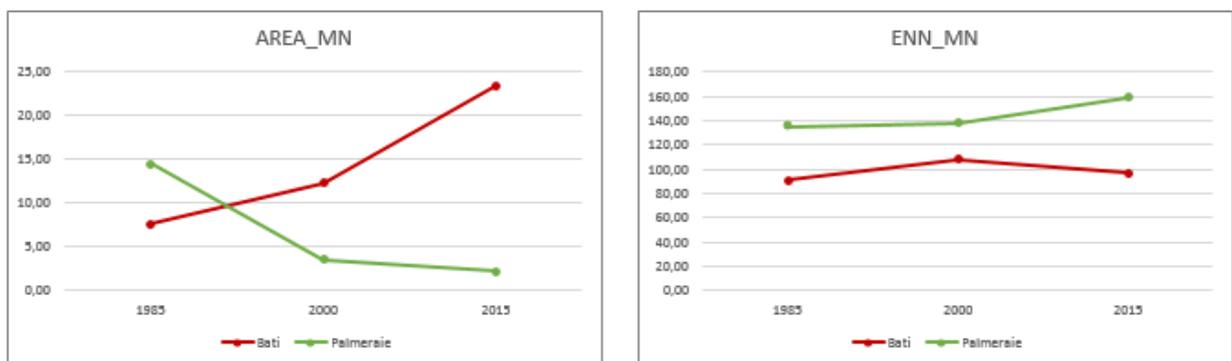


Figure VIII-2 : Évolution des indicateurs d'espacement entre fragments (1985 -2015)

Les diagrammes illustrés ci-dessus (figure VIII-2) montrent aussi deux tendances opposées. La tâche du bâti a enregistré une remarquable croissance de sa taille moyenne représentée par AREA_MN. Elle est passée de 7.63 ha en 1985 à 12.30 ha en 2000 pour atteindre une valeur maximale égale à 23.45 ha en 2015, tandis que l'indice ENN_MN relatif aux distances minimales entre les fragments voisins a enregistré une tendance relativement stable avec légères variations mais dans deux sens opposés : entre 1985 et 2000, la distance minimale s'est augmentée de 90.74 m à 107.80. Entre 2000 et 2015, la valeur de cet indice s'est diminuée pour se retourner à 96.79 m. Cette variation montre que la tâche du bâti a suivi deux modes de croissances. Au cours de la première période, entre 1985 et 2000, les extensions urbaines se sont opérées en mode davantage discontinue par rapport à l'ancien tissu. Mais à partir de l'an 2000, le mode d'extension continue est le plus caractéristique.

En revanche, une tendance de décroissance marque nettement la taille moyenne des taches appartenant à la classe de la palmeraie. Durant la période d'étude, AREA_MN s'est notablement reculé. Il s'est chuté de 14.43 ha à 3.49 ha entre 1985 et 2000 pour marquer sa valeur minimale en 2015 qui est de l'ordre de 2.17 ha. Cette décroissance de l'indice AREA_MN s'est accompagnée par

une augmentation de la distance moyenne représentée par l'indice ENN_MN qui est passé de 135.11 m en 1985 à 137.91 m en 2000 pour atteindre 158.99 m en 2015. La diminution de la taille moyenne des taches constituant la palmeraie AREA_MN, d'une part, et l'augmentation de leur distance minimale fait ressortir que la classe de la palmeraie a subi un processus de fragmentation spatiale traduit par un morcellement progressif de sa surface suivi d'une conversion continue de cet espace agricole.

VIII.2.1.3. Évolution des indicateurs de configuration

Sur le plan morphologique, les résultats relatifs aux mesures des indices LSI et AI sont illustrés dans les diagrammes qui suit (figure VIII-3) :

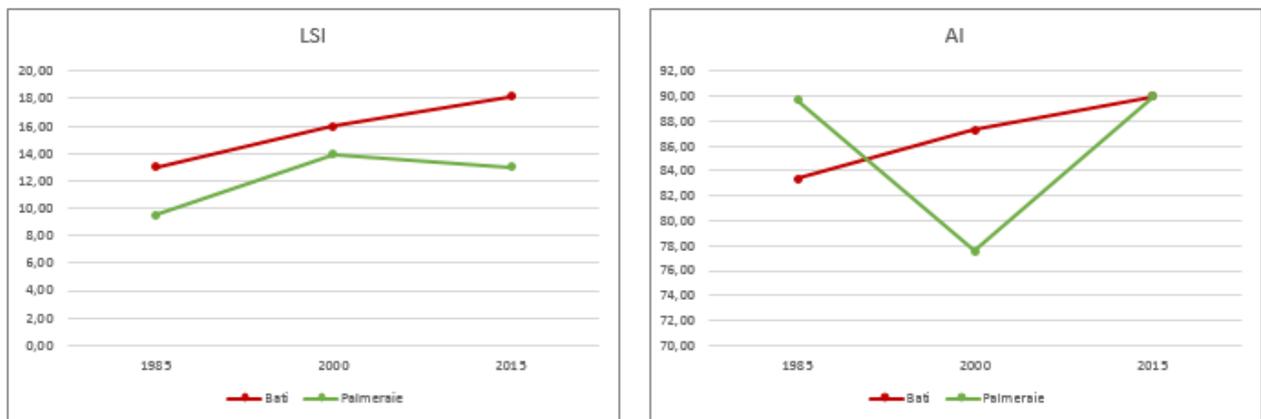


Figure VIII-3 : Évolution des indices synthétiques de configuration (Biskra)

Les diagrammes illustrés dans la figure précédente (figure VIII-3) montrent l'évolution des deux indices de configuration paysagère : l'indice de forme du paysage LSI et l'indice d'agrégation AI. La première lecture de ces deux diagrammes permet de remarquer deux comportements quasiment différents. Pour la classe du Bâti, les deux indices LSI et AI montrent pratiquement la même allure d'évolution. L'augmentation de l'indice de forme du paysage signifie que la forme des fragments constituant le tissu bâti tendent à être géométriques plus complexe, les bordures tendent à être plus allongées et donc plus d'irrégularité morphologique. L'augmentation progressive de l'indice d'agrégation AI traduit une tendance vers la compaction de la macroforme urbaine. En 1985, le tissu urbain de Biskra était plus fragmenté avec une valeur égale à 83.39, mais les extensions urbaines qui sont opérées en remplissant la partie éloignée notamment au niveau du quartier d'El-Alia à l'est de la ville ont minimisé les distances entre fragments, ce qui a permis à l'indice AI de passer à la valeur de 87.28 en 2000 et d'atteindre même un niveau de 89.98 en 2015.

Par ailleurs, la classe de la palmeraie est marquée par deux tendances différentes. En premier temps, entre 1985 et 2000, l'indice LSI a enregistré une augmentation de sa valeur avec un passage de 9.52 à 13.92, tandis que l'indice d'agrégation AI s'est diminué avec une chute de sa valeur qui est passée de 98.70 en 1985 à 77.59 en 2000. Dans un second temps, entre 2000 et 2015, ces deux indices ont inversé leurs tendances. L'indice LSI s'est légèrement diminué pour enregistrer une valeur de 13.05, alors que l'indice AI a enregistré un gain de valeur pour passer à 89.98. Ces résultats montrent que durant la première période la palmeraie a pris, d'un côté, une tendance de fragmentation traduite par la diminution de son indice d'agrégation, d'un autre côté, un morcellement de ces taches qui peut s'expliquer par l'augmentation des bordures irrégulières indiquée par l'augmentation de l'indice LSI. Pendant la deuxième période, et avec la stabilisation du nombre des taches (77 unités), le morcellement de cet espace s'est stabilisé par rapport à la première période ce qui traduit l'augmentation de l'indice AI pour accéder à la valeur de 89.98. On peut constater que la fragmentation de la palmeraie a été plus accentuée durant la première période, et qu'au cours de la seconde période, cette fragmentation n'était plus significative à la suite de l'épuisement presque total de celle-ci.

Deux tendances opposées sont observées. Une croissance spatiale assez remarquable de la classe du bâti avec croissance du nombre de fragments urbains accompagnés d'une importante augmentation de leurs tailles moyennes signifiant de ce fait un processus d'étalement spatial de la frange urbaine avec un rythme plus accentué durant la période (2000 - 2015). En revanche, la végétation urbaine a enregistré un processus inverse. L'augmentation du nombre de fragments accompagnée d'une diminution des tailles moyennes indique un morcellement et un recul de la palmeraie qui est plus amplifiée entre 1985 et 2000. Le suivi combiné des deux indices LPI et LSI a révélé que le trait majeur caractérisant l'extension spatiale de la ville de Biskra est le mode continu du bâti (traduis par l'augmentation continue de l'indice LPI). L'effet de cette croissance sur la palmeraie est constaté négatif, compte tenu de l'augmentation de l'indice de forme du paysage LSI, la diminution de la taille du plus grand fragment LPI ainsi que la surface convertie par le bâti mesurée dans la comparaison post-classification.

VIII.2.2. Ouargla : des tendances variées entre les deux périodes d'études

VIII.2.2.1. Évolution des indicateurs surfaciques (NP, PLAND, LPI)

Les images qui suivent (figures VIII-4, VIII-5, VIII-6) illustrent l'évolution paysagère de l'oasis de Ouargla.

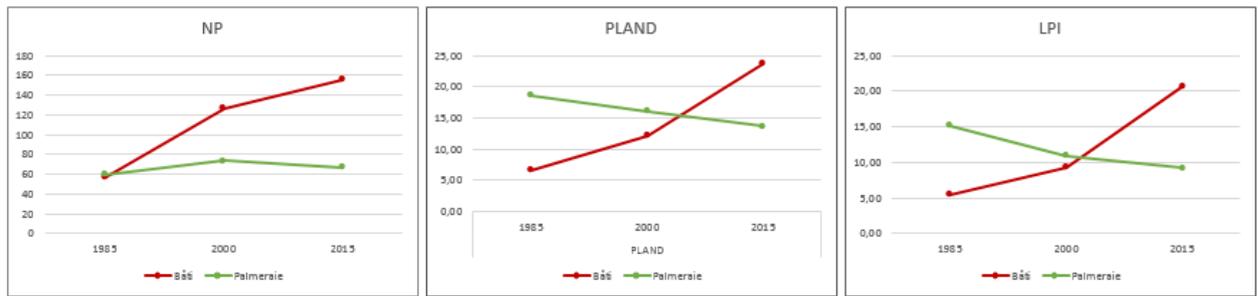


Figure VIII-4 : Évolution des indicateurs surfaciques (NP, PLAND, LPI) caractérisant l'oasis de Ouargla entre 1985 et 2015

La lecture des diagrammes illustrés dans la figure précédente (figure VIII-4) met en valeur deux tendances quasiment contradictoires. Les fragments urbanisés ont considérablement augmenté leur nombre, mais avec variation de rythmes entre les deux intervalles d'étude. Entre 1985 et 2000, NP s'est augmenté de 57 unités à 127 unités avec un gain de 122.81 %. Entre 2000 et 2015, NP s'est accru à 155 fragments avec augmentation de 22.21 %, donc moins de gain par rapport à la première période. Une tendance similaire a caractérisé les deux autres indices de composition PLAND et LPI. La taille moyenne de cette classe s'est considérablement accrue avec un rythme plus accéléré au cours de la deuxième période. Statistiquement, PLAND s'est évolué de 6.00 % en 1985 à 12.19 % en 2000 pour atteindre un pourcentage de 23.67 % en 2015, un gain de 84.73 % enregistré durant la première période, contre un gain plus important caractérisant la seconde période qui est de l'ordre de 94.20 %. En concomitance de cette évolution, l'indice du plus grand fragment urbain s'est notablement augmenté avec plus d'accentuation durant la deuxième période à l'image de PLAND. LPI est passé de 5.53 en 1985 à 9.28 en 2000 avec un taux d'évolution égale à 40.47 %. En 2015, LPI a enregistré une valeur de 20.63 avec un gain plus important estimé à 122.29 %.

La palmeraie de Ouargla est caractérisée par une tendance opposée à celle de la tache urbaine. Le nombre de taches NP s'est augmenté entre 1985 et 2000 avec un passage de 60 à 74 unités. Mais la portion occupée par ces taches PLAND s'est remarquablement décrie en chutant de 18.62 % à 16.07 % de pourcentage. De la même manière pour l'indice LPI qui s'est diminué de 15.21 en 1985 à 10.86 en 2000. Ces comportements indiquent que la palmeraie a connu un processus de morcellement et de conversion de sa surface. Le morcellement s'est traduit par l'augmentation du nombre de taches constituant la palmeraie ; la conversion s'est ainsi indiquée par la diminution de la portion occupée dans le paysage Ouargli. Entre 2000 et 2015, NP s'est reculé de 74 à 67 unités : une perte de 10 fragments. PLAND et LPI ont ainsi suivi la même tendance de décroissance, avec une diminution de 16.07 % en 2000 à 13.66 % en 2015 pour PLAND et de 10.86 en 1985 à 9.18 en 2015 pour LPI. La décroissance simultanée des indices NP, PLAND et LPI montre bien que la palmeraie

a subi un recul progressif du en conséquence des conversions continues de ses surfaces suite à l'étalement du tissu bâti.

VIII.2.2.2. Évolution des indicateurs de distance

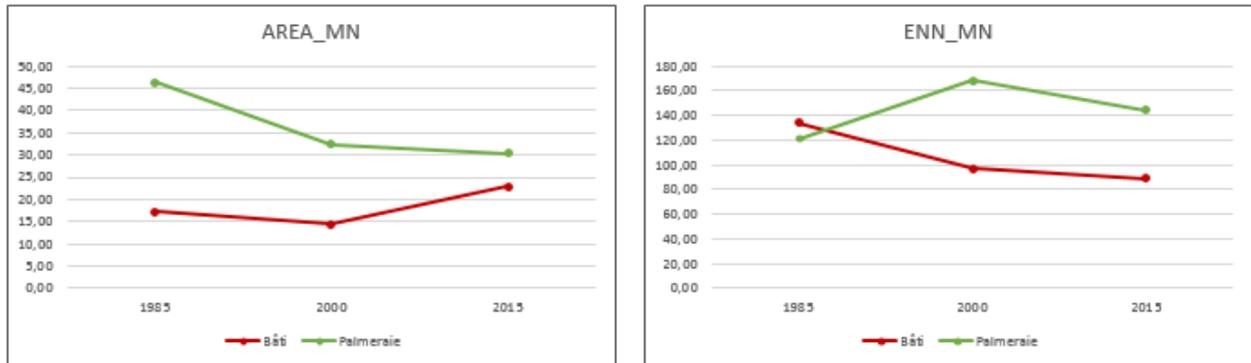


Figure VIII-5 : Évolution des indicateurs de distances entre fragments (Ouargla)

L'évolution des tailles moyennes et des distances euclidiennes a révélé des tendances variées aussi bien pour les surfaces bâties que pour la palmeraie (figure VIII-5). La classe du bâti a montré deux évolutions différentes entre les deux intervalles d'étude. En même temps que la taille moyenne marque une légère décroissance au cours de la première période avec des valeurs diminuant de 17.30 ha en 1985 à 14.35 ha en 2000, les fragments urbains marquent aussi une diminution de leur distance minimale qui est passée de 133.93 m en 1985 à 97.09 m en 2000. Cela signifie que la croissance de la tache urbaine est matérialisée par l'apparition de nouveaux tissus bâtis, mais en contiguïté des zones urbaines existantes. Donc de nouveaux petits fragments urbains ont conduit à la diminution de la taille moyenne AREA_MN avec un mode de densification de ces aires urbaines qui sont en cours de croissance. Une projection spatiale de ces résultats sur les cartes thématiques permet de mieux appréhender ces dynamiques d'évolution spatiotemporelle. Entre 1985 et 2000, la croissance de la tache urbaine s'est principalement opérée en continuité avec la ville-centre : vers le sud en conurbation avec l'agglomération de Ain El-Beida, et vers le nord et le nord-ouest en envahissant la palmeraie ; ce qui a conduit à la diminution de la distance minimale au sein du périmètre urbain. Par contre, l'indice AREA_MN a changé de tendance au cours de la seconde période d'évolution. La taille moyenne des fragments urbains est augmentée pour enregistrer une valeur de 22.83 ha en 2015, tandis que la distance minimale ENN_MN a continué sa diminution pour marquer une distance minimale de l'ordre de 88.67 m en 2015 : un ralentissement de rythme par rapport à la première période est donc à constater. Afin de pouvoir mieux interpréter ces résultats, on est ainsi appelé à revenir aux cartes thématiques. L'augmentation du nombre de taches NP accompagnée en même temps d'une augmentation de leur taille moyenne AREA_MN et d'une diminution de leur distance

minimale ENN_MN montre que la croissance du tissu urbain est caractérisée, d'une part, par l'apparition de nouveaux fragments urbains, donc en mode éclaté, et d'autre part, par la densification des espaces interstitiels traduite par la réduction des distances interfragments. Le recours à l'analyse cartographique aide à visualiser ces résultats. Deux traits majeurs caractérisent la croissance spatiale de la ville de Ouargla entre 2000 et 2015. D'une part, une croissance en discontinu au-delà des limites naturelles (la sebkha et la palmeraie), notamment au niveau de la nouvelle ville (Hai En-Nasr) et des quartiers périphériques spontanés. Il s'agit là d'un éclatement du tissu urbain. D'autre part, des extensions en continu avec le tissu existant amenant à l'achèvement des conurbations des quatre agglomérations constituant l'intercommunalité de Ouargla à savoir Ouargla chef-lieu, Ain El-Beida, Sidi Khouiled et Said Otba.

En revanche, la palmeraie a connu une décroissance continue de son indice AREA_MN mais avec variation de cadence entre les deux périodes d'étude. La taille moyenne caractérisant la classe végétale s'est chuté de 46.38 ha à 32.46 ha entre 1985 et 2000 avec 13.92 % de taux de perte. En 2015, la valeur de cet indice était de l'ordre de 30.48 ha avec une petite perte estimée à 1.97 % : AREA_MN s'est relativement stabilisée entre 2000 et 2015. L'indice de distance minimale entre fragments voisin ENN_MN est marqué par deux sens d'évolution : une première période d'augmentation des valeurs de cet indice entre 1985 et 2000 d'où ENN_MN est passée de 120.85 m à 168.17 m ; puis, une seconde période de diminution de valeur d'où cet indice a pu atteindre 144.29 m de distance en 2015. Ces résultats indiquent que durant la première période la palmeraie de Ouargla a subi des dynamiques de morcellement de son espace, traduites en concomitance par l'augmentation du nombre de taches NP qui est passée de 57 à 127 taches, la diminution de leurs tailles moyennes AREA_MN et l'augmentation de la distance minimale reliant ces taches de végétation représentée par l'indice ENN_MN. Néanmoins, la seconde période d'étude s'est caractérisée par un ralentissement de la chute de la taille moyenne et un rapprochement de distance minimale, suite au ralentissement de l'augmentation du nombre de taches NP, indiquant de ce fait le ralentissement du processus de fragmentation de la palmeraie entre 2000 et 2015.

VIII.2.2.3. Évolution des indicateurs de configuration

Les résultats enregistrés par les indices synthétiques de configuration sont illustrés dans la figure suivante (figures VIII-6).



Figure VIII-6 : Évolution des indicateurs de configuration (Ouargla)

La lecture diachronique de l'indice d'agrégation AI des deux classes d'occupation du sol, celle du bâti et celle de la palmeraie, fait ressortir que ces deux classes ont suivi deux tendances différentes. Les valeurs mesurées pour la première classe, celle de la tache urbaine, révèlent deux évolutions différentes : une diminution de l'agrégation qui est passée de 90.31 % à 87.32 % entre 1985 et 2000, suivie par une augmentation de la valeur de celle qui s'est élevée à 90.48 % en 2015. La diminution de l'indice AI entre 1985 et 2000 signifie que les extensions spatiales effectuées durant cette première période n'étaient pas en contiguïté avec l'existant (en éloignement), ce qui a conduit à la réduction de la compacité de cette ville. Par contre, à partir de l'année 2000, cet indice a pris un sens ascendant indiquant de ce fait que la croissance spatiale tend vers la compaction de la ville. Une tendance traduite par l'apparition de plusieurs conurbations et la densification de la nouvelle ville à l'ouest de la ville. L'indice de forme du paysage LSI a connu une évolution de sa valeur mais avec deux allures différentes. Une importante augmentation enregistrée entre 1985 et 2000 avec un passage de 11.02 à 18.19 et un taux d'évolution égale à 65.04 %. En 2015, la valeur de cet indice était de l'ordre de 19.76 avec un taux d'évolution estimé à 8.67 % : un taux moins important par rapport à la première période. Ce changement de rythme d'évolution traduit un changement de propriété morphologique entre les deux intervalles d'études. En premier lieu, et en même temps que la compacité diminue, les bordures urbaines tendent à être plus allongées avec plus d'irrégularités géométriques. Puis, et en second lieu, au moment où la compacité de la ville commence à gagner plus de valeur, l'irrégularité des bordures commence à être plus stable avec une légère variation de LSI entre 2000 et 2015. La superposition de ces résultats avec l'analyse cartographique permet de faire ressortir que l'éclatement du périmètre urbain, au-delà des limites physiques, ainsi que son interpénétration spatiale avec les palmeraies, explique cette tendance ascendante d'irrégularité des bordures et de la complexité géométrique des formes urbaines produites.

À l'encontre de la classe du bâti, la palmeraie a enregistré une relative décroissance de son indice d'agrégation, mais en continue durant toute la période d'étude. Les valeurs de AI se sont diminuées de 94.54 % en 1985 à 93.72 % en 2000 pour se chuter à la valeur de 91.76 % en 2015. En accompagnement de l'évolution de cet indice, l'indice de forme du paysage LSI a ainsi enregistré une augmentation de sa valeur durant la même période d'étude, dont les valeurs mesurées sont 10.54, 11.19 et 13.30 respectivement pour les années 1985, 2000 et 2015. L'augmentation continue des valeurs de l'indice d'agrégation AI et de l'indice de forme du paysage LSI montrent que la palmeraie de Ouargla a été soumise à un processus de fragmentation spatiale de son espace. Les trois tendances suivantes : augmentation du nombre du fragment NP, diminution de la taille moyenne des fragments constituant cet espace agro-oasien, et augmentation de l'indice d'agrégation AI mettent bien en valeur l'impact de l'étalement des surfaces bâties sur la palmeraie. Le retour à la cartographie thématique multitemporelle affirme ces interprétations en visualisant la localisation des espaces agricoles convertis par le bâti (Figure VIII-6).

VIII.2.3. Touggourt : franchissement et fragmentation partielle de la palmeraie en cours

VIII.2.3.1. Évolution des indicateurs surfaciques (NP, PLAND, LPI)

La confrontation de l'évolution spatiotemporelle de la ville de Touggourt aux métriques paysagères a révélé des tendances distinguées par rapport à Biskra et Ouargla.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures qui suivent (figure VIII-7, VIII-8, VIII-9).

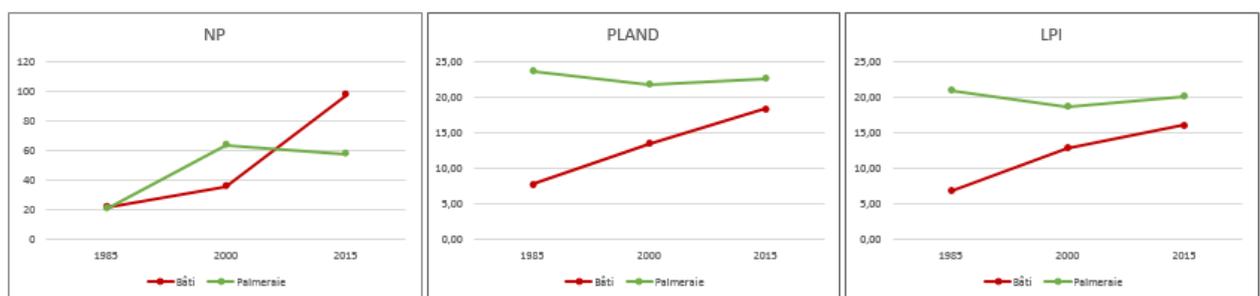


Figure VIII-7 : Évolution des indicateurs surfaciques caractérisant la ville de Touggourt entre 1985 et 2015

La lecture des diagrammes précédents fait ressortir que les deux classes, celle du bâti et celle de la palmeraie, ont suivi deux tendances opposées. Pour la classe du Bâti, le nombre des fragments NP a connu une croissance continue sur toute la période d'étude, mais avec un rythme plus accéléré pendant la seconde période. Entre 1985 et 2000, le nombre de fragments urbains s'est évolué de 22

à 36 unités avec un gain de 14 nouveaux fragments. En 2015, NP a atteint un nombre de 98 unités marquant un gain de 62 nouveaux fragments entre 2000 et 2015 : une croissance plus importante que celle enregistrée entre 1985 et 2000. Les deux indices PLAND et LPI ont de même enregistré des augmentations relativement régulières de leurs valeurs. La portion occupée par le bâti est passée de 7.81 % en 1985 à 13.49 % en 2000 pour atteindre un pourcentage de 18.34 % en 2015. L'indice du plus grand fragment LPI, quant à lui, a ainsi marqué la même évolution. Entre 1985 et 2000, la valeur de cet indice est augmentée de 6.87 % à 12.84 %. En 2015, LPI a marqué la valeur de 16.12 %.

Par ailleurs, la classe de la palmeraie a été marquée par une tendance opposée. Le nombre de taches NP a connu deux sens opposés d'évolution : une croissance durant la première période succédée par une légère décroissance au cours de la seconde période. Entre 1985 et 2000, le nombre de taches est passé de 21 à 64 unités. En 2015, NP s'est retourné au nombre de 58 unités. Pendant que NP augmente entre 1985 et 2000, les deux métriques PLAND et LPI diminuent. La portion occupée par les fragments appartenant à la palmeraie représentée par PLAND s'est diminuée de 23.68 % à 21.81 % ; l'indice du plus grand fragment agricole s'est aussi diminué de 21.05 % à 18.66 %. Entre 2000 et 2015, avec la relative diminution du nombre de fragments NP, PLAND et LPI marquent un gain de valeurs. PLAND est passé de 21.81 % à 22.68 % alors que LPI s'est augmenté de 18.66 % à 20.13 %. Ces résultats montrent que la palmeraie de Touggourt a suivi deux processus différents. Une première phase de perte progressive de surface suivie par deuxième phase de récupération de surfaces apparemment interstitielles.

VIII.2.3.2. Évolution des indicateurs de distance



Figure VIII-8 : Évolution des indicateurs de distances AREA_MN et ENN_MN (Touggourt)

La taille moyenne des fragments de la classe du bâti montre deux tendances différentes : une stabilité relative caractérisant la première période suivie par une allure décroissante au cours de la seconde période. En 1985 et 2000, l'indice AREA_MN a enregistré les mesures suivantes : 40.48 ha et 42.74 ha ; en 2015, cet indice s'est chuté vers la moyenne de 23.37 ha, une perte assez importante de surface

moyenne. L'indice ENN_MN montre aussi deux tendances opposées : une augmentation de la distance minimale entre fragments urbains, puis une tendance de rapprochement remarquée durant la deuxième période. Les valeurs enregistrées entre 1985 et 2000 varient entre 193.92 m et 227.43 m, tandis qu'en 2015 la valeur de cet indice s'est chutée vers 104.64 m. On remarque qu'avec l'augmentation du nombre des fragments urbains entre 1985 et 2000, la taille moyenne demeure relativement stable. Cela signifie que l'extension du tissu urbain durant cette période était principalement en continuité avec l'existant, la notable croissance de l'indice LPI vue précédemment consolide cette interprétation. L'augmentation de la distance minimale, en revenant aux cartes thématiques correspondantes, peut s'expliquer par l'apparition de petits nouveaux quartiers au sud-est influençant de ce fait cette augmentation. Entre 2000 et 2015, la tendance urbaine s'est complètement inversée : une amplification de la croissance du nombre de fragments (de 36 à 98 unités) accompagnée d'une diminution de la taille moyenne AREA_MN et de la distance minimale ENN_MN. Ces mesures signifient que durant cette deuxième période, le mode discontinu est caractéristique de l'étalement de la tache urbaine de la ville de Touggourt. L'analyse spatiotemporelle des cartes thématiques correspondantes nous permet d'identifier ces deux tendances d'évolution urbaine. Les extensions spatiales étaient principalement en continuité vers le nord et vers le sud et par densification des espaces intermédiaires. Par la suite, ces extensions ont suivi un mode majoritairement discontinu vers l'ouest en franchissant la route nationale n° 03.

La palmeraie de Touggourt a ainsi connu une variation de tendances. Entre 1985 et 2000, AREA_MN a enregistré un recul remarquable avec diminution de sa valeur qui est chutée de 128.58 ha à 38.86 ha. Entre 2000 et 2015, cet indice a, en revanche, pris un sens positif d'évolution témoigné par la valeur enregistrée en 2015 qui était de l'ordre de 44.60 ha. L'indice ENN_MN est marqué par une tendance de diminution de ces valeurs. Il est passé de 230.19 m en 1985 à 176.24 m en 2000 pour enregistrer 135.95 m de distance en 2015. Ce qu'on peut retenir de ces résultats est que la palmeraie a en premier temps subi un processus de morcellement traduit par l'augmentation du nombre de fragments accompagnée par une chute de leur taille moyenne. En second temps, entre 2000 et 2015, cet espace agricole a pratiquement sauvé sa part avec un petit gain de récupération de quelques surfaces intérieures dont la réduction des valeurs de la distance minimale entre ces fragments agricoles en fait signification (figure VIII-8).

VIII.2.3.3. Évolution des indicateurs de configuration

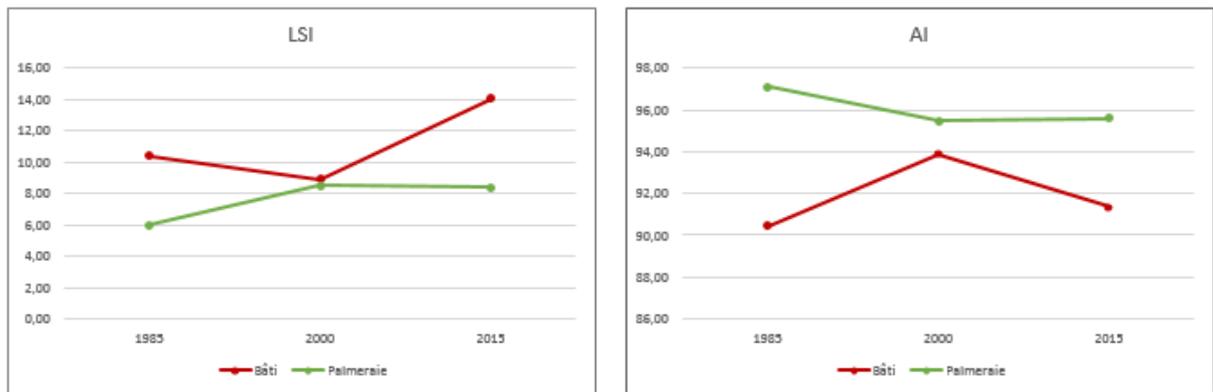


Figure VIII-9 : Évolution des indicateurs de configuration (Touggourt)

L'indice synthétique d'agrégation AI a aussi suivi deux tendances opposées. Entre 1985 et 2000, cet indice a enregistré une augmentation de sa valeur qui est passée de 90.46 % à 93.88 %. En revanche, une tendance de diminution s'est manifestée durant la seconde période d'étude. L'indice AI s'est diminué pour atteindre un niveau d'agrégation égale à 91.35 % en 2015. L'indice de forme du paysage a également eu deux allures différentes. Il a marqué une diminution de valeur entre 1985 et 2000 (de 10.39 à 8.92) puis une augmentation avec une valeur de 14.07 mesurée en 2015. D'après ces résultats, il ressort que l'évolution de la tache urbaine de la ville de Touggourt a suivi en premier temps une tendance de densification traduite par l'augmentation de l'indice de l'agrégation et la diminution de l'allongement des bordures ainsi traduite par le recul de l'indice LSI. Par la suite, une tendance vers l'éclatement morphologique est devenue caractéristique au cours de la seconde période d'étude. Cette tendance est indiquée par la diminution des valeurs de l'indice d'agrégation AI et l'augmentation des valeurs de l'indice de forme du paysage LSI.

Les résultats correspondant à la classe de la palmeraie montrent que cette classe a suivi en premier temps une évolution tendant vers l'agrégation, suivie par une période de stabilisation de la compacité de cette classe de végétation. Entre 1985 et 2000, l'indice d'agrégation AI s'est diminué de 97.10 % à 95.47 %. En 2015, cet indice a enregistré une valeur de 91.35 %. L'indice de forme du paysage LSI a aussi montré deux tendances différentes durant les mêmes périodes. La valeur de cet indice s'est augmentée de 5.98 à 8.48 entre 1985 et 2000 pour rester à la valeur de 8.37 en 2015. Ces résultats font révéler que la palmeraie de Touggourt a connu une première période de morcellement indiqué par la diminution de l'indice AI et l'augmentation de l'irrégularité des taches que l'augmentation de l'indice LSI le montre. En second lieu, la palmeraie a relativement gardé sa compacité avec une légère évolution des deux indices AI, qui s'est retourné à la valeur 95.61 %, et LSI qui s'est légèrement abaissé à la valeur 8.37 en 2015 (figure VIII-9).

VIII.3. Synthèse : lecture d'ensemble

VIII.3.1. Évolution des surfaces urbanisée

À fin de pouvoir ressortir la tendance globale caractérisant l'ensemble des oasis constituant notre corpus d'étude, une analyse comparative des métriques correspondant aux différentes villes a été entamé. Les résultats sont illustrés dans les figures qui suivent (figures VIII-10 et VIII-11).

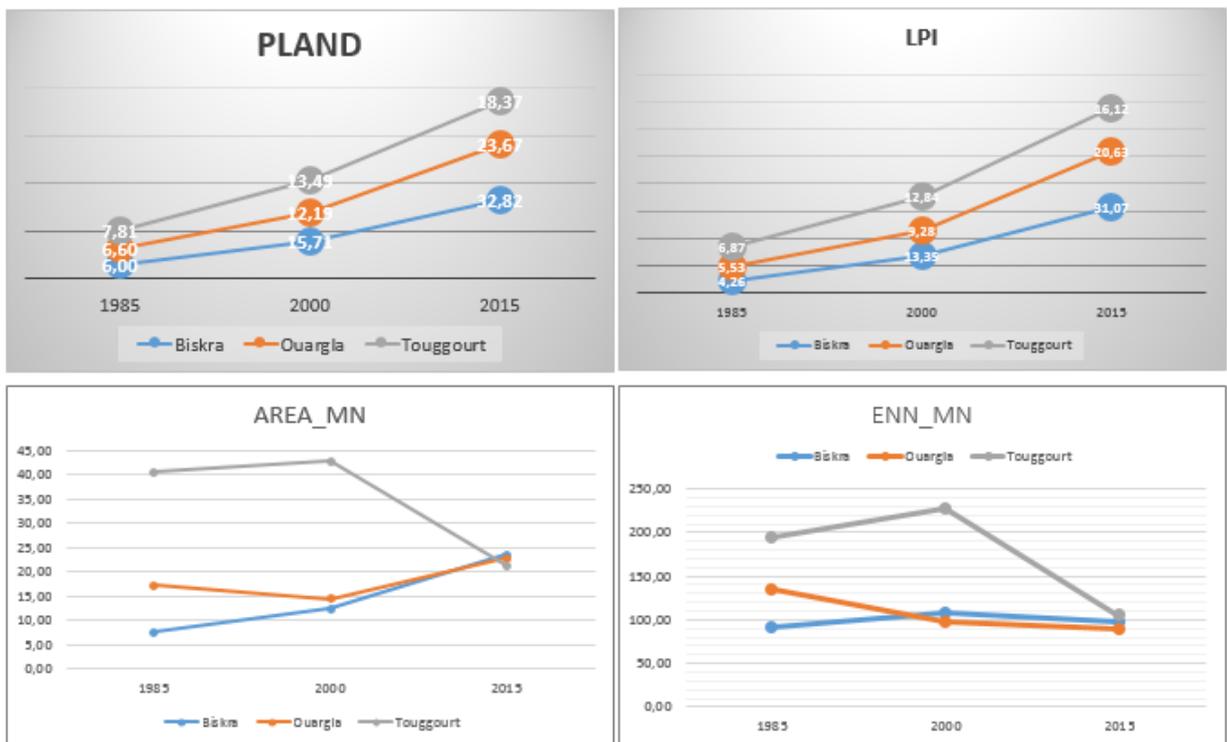


Figure VIII-10 : Comportement des métriques de composition et de distribution spatiales des fragments urbains pour l'ensemble des trois villes

On remarque que les trois villes ont toutes suivi la même tendance de croissance spatiale de la classe du bâti. Les deux indices de composition PLAND et LPI ont marqué des évolutions assez importantes aussi bien pour les trois villes, avec plus d'ampleur enregistrée à Biskra dont PLAND a atteint le seuil de 32.82 % en 2015, suivi par Ouargla avec une portion de 23.67 % et enfin Touggourt avec 18.37 % de pourcentage enregistré dans la même année. La même remarque est à noter pour l'indice du plus grand fragment urbain LPI. La ville de Biskra est la plus marquée par cette évolution dont LPI est passée de 4.26 % à 32.42 % entre 1985 et 2015, puis vient la ville de Ouargla avec un passage de 5.53 % à 20.63 %, et enfin la ville de Touggourt avec un passage de 6.87 % à 16.12 % durant la même période.

Les deux indices de configuration AREA_MN et ENN_MN ont montré des tendances différentes distinguant l'évolution de chaque agglomération. La ville de Biskra a enregistré, d'une part, une

croissance continue de son indice AREA_MN avec plus d'ampleur entre 2000 et 2015, d'autre part, l'indice de distance minimale ENN_MN a marqué une période d'augmentation entre 1985 et 2000 suivie par une période de diminution de ces valeurs. Ce changement d'allure d'évolution signifie que le tissu urbain de la ville de Biskra a suivi deux modes principaux de croissance spatiale : une première période (1985 - 2000) caractérisée par un mode plutôt discontinu par rapport à la ville-centre succédée par une deuxième période (2000 - 2015) dont les extensions étaient davantage par densification, ce qui a conduit à l'achèvement d'une conurbation intégrant la localité de Chetma à l'est de ville. En ce qui concerne la ville de Ouargla, la lecture diachronique de ces deux indices révèle des évolutions différentes entre les deux périodes d'étude. Entre 1985 et 2000, AREA_MN marque une légère diminution en même temps que l'indice ENN_MN diminue ; entre 2000 et 2015, l'indice AREA_MN augmente pendant que l'indice de distance ENN_MN enregistre une relative stabilité. Cela indique que, en faisant aussi recours aux résultats cartographiques discutés précédemment, la ville de Ouargla a été en premier temps caractérisée par des extensions spatiales plutôt en continuité avec le tissu existant ou en proximité de ceci. En second temps, le mode de croissance discontinue est devenu plus caractéristique, qui s'est principalement opérée au-delà des limites naturelles (sebkha et palmeraies), notamment au niveau la ville nouvelle sur le plateau de Bamendil et aussi au niveau des quartiers spontanés périphériques. Quant à la ville de Touggourt, deux tendances différentes sont remarquées : une stabilité relative de l'indice AREA_MN accompagnée d'augmentation de l'indice de distance ENN_MN pendant la première période d'étude, et une décroissance simultanée des valeurs de ces deux indices au cours de la seconde période. En tenant compte de la notable croissance de l'indice du plus grand fragment LPI exposé précédemment, on peut constater qu'entre 1985 et 2000 le tissu bâti de Touggourt a suivi un mode davantage continu avec le tissu existant. En revanche, entre 2000 et 2015 cette tendance est quasiment renversée avec plus de privilèges aux extensions discontinues notamment au-delà des barrières physiques, la route nationale RN° 03 à l'ouest et de la palmeraie à l'est (figue VIII-10).

VIII.3.1.1. Les indices synthétiques de configuration AI et LSI

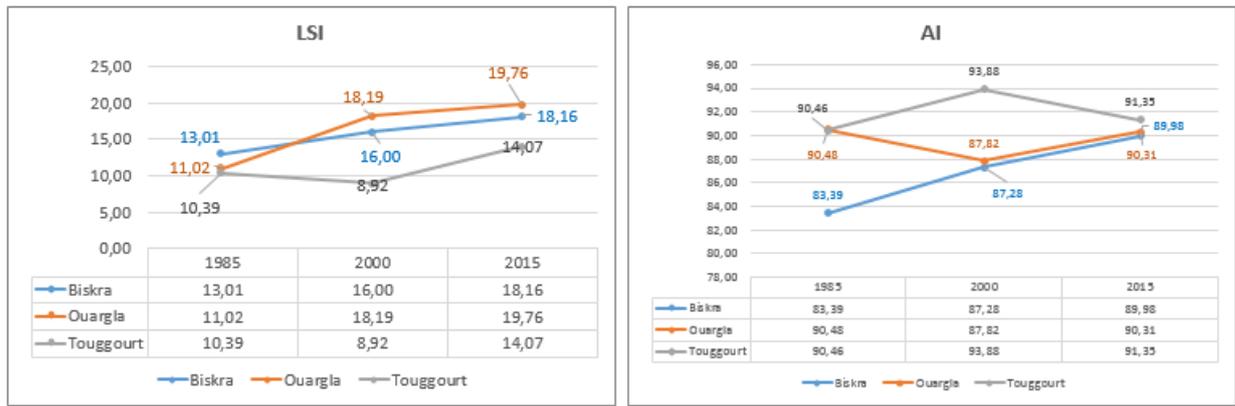


Figure VIII-11: Comportement des métriques de configuration spatiale des fragments urbains relatifs à l'ensemble des trois villes

Le suivi des deux indices synthétiques AI et LSI à travers la lecture des deux diagrammes illustrés ci-dessus (figure VIII-11) permet de remarquer que chaque ville est distinguée par des tendances variées. La ville de Biskra s'est distinguée par une augmentation régulière et en continu de ses indices d'agrégation AI et de forme du paysage LSI. Cela signifie qu'en 1985 le tissu urbain de cette ville était plus fragmenté avec l'apparition de nouvelles zones urbaines éloignées, notamment à El-Alia à l'est et au niveau de la zone d'activité au sud-ouest. À partir de cette date, la croissance spatiale est opérée en remplissant ces nouvelles zones d'extension, ce qui a conduit à l'augmentation progressive de la compacité morphologique du tissu urbain, traduite par la croissance des valeurs de l'indice d'agrégation AI. Quant à la ville de Ouargla, deux sens d'évolution sont à révéler. Entre 1985 et 2000, une période durant laquelle l'indice AI s'est diminué en même temps que l'indice LSI s'est augmenté, le tissu urbain avait une tendance vers l'éclatement avec l'apparition des nouvelles zones urbaines plus éloignées par rapport au tissu existant (notamment la nouvelle ville sur le plateau de Bamendil), ce qui a conduit à l'augmentation des valeurs des deux indices AI et LSI. Par contre, entre 2000 et 2015, l'augmentation de l'agrégation signifie que la densification des zones existantes était plus manifestantes. La lecture cartographique affirme cette tendance : les extensions urbaines sont opérées plutôt en densifiant la nouvelle ville et les quartiers résidentiels spontanés en périphérie de la ville. La troisième ville, celle de Touggourt, présente des tendances inversées par rapport à celle de Ouargla : une augmentation de l'indice AI, accompagnée d'une diminution de l'indice LPI durant la première période, puis une décroissance de l'indice AI accompagnée d'une augmentation de l'indice de forme LSI. Ce changement de sens d'évolution montre que la ville de Touggourt a connu deux formes de croissance spatiale. Entre 1985 et 2000, les extensions urbaines étaient davantage en continu avec le tissu existant. Cette forme d'évolution s'est traduite par l'achèvement de conurbation des agglomérations constituant le grand Touggourt, dont la croissance des valeurs de l'indice du plus grand fragment urbain LPI analysé précédemment le témoigne. Entre 2000 et 2015, une nouvelle

forme de croissance spatiale s'est manifestée. Il s'agit d'un mode d'extension discontinue franchissant, d'un côté, la RN° 03 à l'ouest et, de l'autre cote, la palmeraie à l'est.

VIII.3.2. Évolution des surfaces des palmeraies

Les palmerais ont toutes enregistré des déclinés de leurs espaces. Les résultats de la comparaison des différentes métriques sont visualisés dans les figures (VIII-12 et VIII-13).

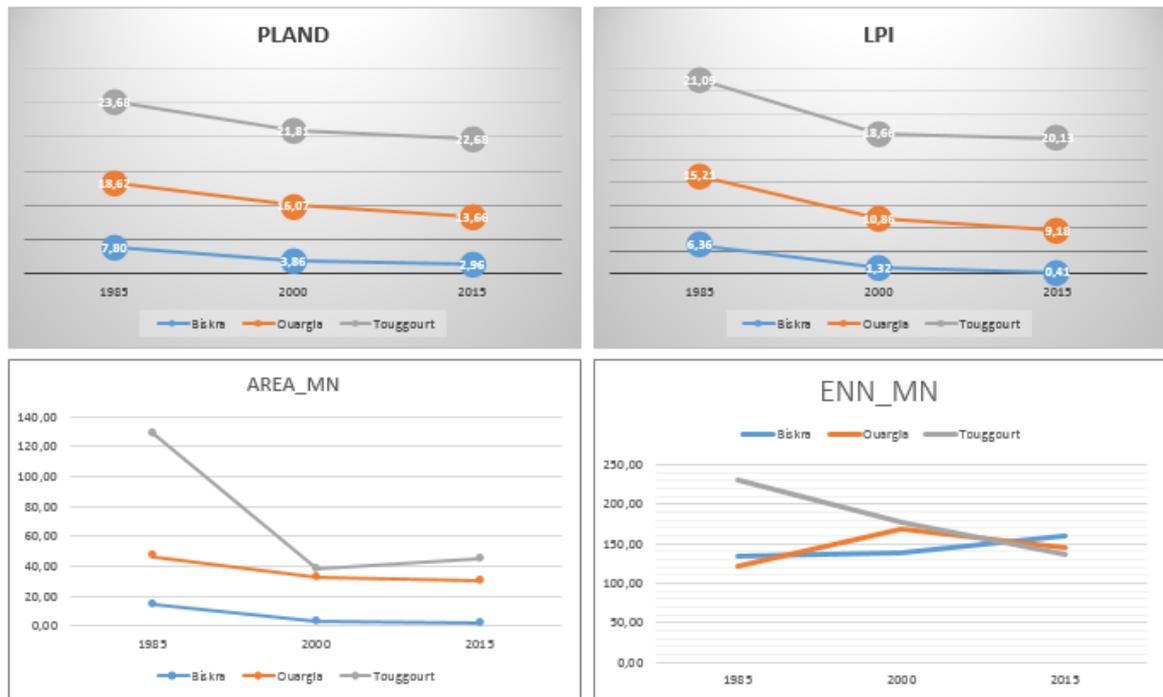


Figure VIII-12 : Comportement des métriques de composition et de distribution spatiales des fragments agricoles pour l'ensemble des trois oasis

À l'encontre de l'étalement des tissus urbains caractérisant les trois villes, les palmeraies ont toutes montré des tendances de déclinaison mais avec des allures différentes. Les métriques de composition paysagère PLAND e LPI révèlent que les trois palmeraies ont toutes subi des reculs surfaciques. En mettant en comparaison ces pertes de pourcentage occupé par les palmeraies, on trouve que celle de Biskra est la plus touchée avec un taux de perte estimé à 62.01 %, suivie par celle de Ouargla qui a perdu 26.60% de sa surface agricole, et enfin celle de Touggourt avec moins de perte estimée à 4.21 %. Le même ordre de perte est constaté pour les valeurs de l'indice du plus grand fragment agricole LPI. La palmeraie de Biskra montre plus de perte avec un taux de 93.48%, puis la palmeraie de Ouargla avec une perte de 39.64 %, et enfin la palmeraie de Touggourt qui n'a perdu que 4.36 %.

Les deux indices relatifs à la taille moyenne AREA_MN et la distance minimale ENN_MN mettent ainsi en valeur l'impact négatif de l'urbanisation sur les palmeraies mais avec des ampleurs différentes. Sur toute la période d'étude, la palmeraie de Biskra a connu une décroissance progressive

de sa taille moyenne (de 14.43 ha à 2.17 ha) et une augmentation de son indice de distance minimale (de 135.11 m à 158.99 m) indiquant de ce fait un processus de morcellement de fragmentation de cet espace agro-oasien, qui était plus accentué durant la première période (1985 – 2000). La palmeraie de Ouargla a connu un impact similaire mais avec allure et ampleur différentes. La taille moyenne AREA_MN s'est diminuée de 46.38 ha en 1985 à 30.48 ha en 2015, en même temps que la distance minimale ENN_MN s'est augmentée de 120.85 ha à 158.99 ha durant la même période. Cela montre que cette palmeraie a aussi subi un processus de fragmentation de son espace qui est ainsi plus significative durant la première période. La palmeraie de Touggourt semble moins touchée par la croissance du tissu urbain, étant donné qu'elle a relativement sauvegardé sa surface agricole (PLAND s'est légèrement varié de 23.68 % à 22.68 %). Mais la diminution de la taille moyenne AREA_MN, particulièrement entre 1985 et 2000, met en avant un processus de morcellement lié non seulement à l'avancée des zones urbaines mais à d'autres problèmes qui ont causé la dégradation de quelques surfaces agricoles à l'intérieur de la palmeraie⁴⁵.

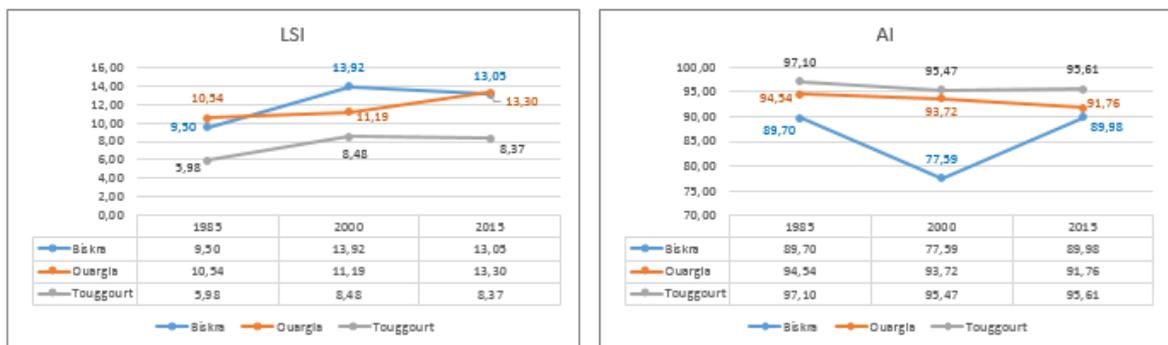


Figure VIII-13 : Comportement des métriques de configuration caractérisant les fragments agricoles de l'ensemble des trois oasis

Les résultats enregistrés par les deux indices synthétiques AI et LSI mettent bien en valeur les transformations paysagères induites par la croissance des surfaces bâties sur la configuration des palmeraies. Concernant la palmeraie de Biskra, l'indice AI a enregistré une chute assez remarquable d'agrégation entre 1985 et 2000 (de 89.70 % à 77.59 %), accompagnée d'une augmentation de l'irrégularité des bordures (la valeur de LSI est passée de 9.50 à 13.92) prouvant que cette palmeraie a subi des dynamiques de conversion et de morcellement de sa surface conduisant à la disparition d'une grande partie de cette composante paysagère. Il est à noter que ce processus de morcellement s'est ralenti entre 2000 et 2015 suite à la disparition presque totale de cette composante oasienne. Quant à la palmeraie de Ouargla, le processus de recul est similaire à celui de Biskra, mais avec

⁴⁵ Il s'agit là du problème de la remontée des eaux salées qui était catastrophique sur les palmeraies. Mais après la réalisation des drains, ces palmeraies ont pu regagner de surfaces (Côte, 1998a ; Idder et al., 2012).

moins d'ampleur et de forme différente. Cette palmeraie est marquée par une tendance continue de fragmentation sur toute la période d'étude, d'où l'indice AI est diminué de 94.54 % à 91.76 % et la valeur de l'indice LSI est passée de 10.54 à 13.30. La lecture cartographique de l'évolution de cet espace affirme ce constat. Une bonne partie de cette palmeraie a été envahie par les extensions urbaines notamment les quartiers de Said Otba, Ech Chot, Adjadja, El H'dab, etc. La palmeraie de Touggourt n'a pas échappé de cette tendance de fragmentation, mais toujours avec moins d'ampleur par rapport aux premiers cas. La fragmentation était plus remarquée pendant la période de 1985 à 2000, d'où la valeur de l'indice AI s'est diminuée de 97.10 % à 95.47 % et la valeur de l'indice LSI s'est augmentée de 8.95 à 8.48. Entre 2000 et 2015, cette palmeraie a relativement sauvé son agrégation suite à la récupération des surfaces interstitielles traduite à la fois par la diminution du nombre de fragments agricole (de 67 à 58 fragments) et la croissance de l'indice du plus grand fragment agricole LPI (de 18.66 % à 20.13 %).

Conclusion

La confrontation de la cartographie spatiotemporelle aux métriques paysagère a révélé deux tendances nettement opposées. Les métriques de composition ont montré une importante croissance des zones urbaines pour les trois villes, avec ampleur plus marquée à Biskra. La combinaison des métriques paysagères a permis de nuancer le comportement spatial de chaque ville. L'évolution des deux premières villes (Biskra et Ouargla) tendant actuellement vers la compaction de fragments existants, notamment dans les zones nouvellement urbanisées, après une première période de désagrégation d'où les extensions s'étaient davantage en discontinu. Quant à la ville de Touggourt, la tendance est inverse. La croissance spatiale de cette ville suit actuellement un mode discontinu au-delà de la RN° 3 et la palmeraie, après une première période de densification des tissus existants jusqu'à l'accomplissement de la conurbation formant actuellement le Grand Touggourt.

Quant à la classe des palmeraies, les résultats des métriques paysagères ont révélé des tendances nettement opposées à l'étalement des taches urbaines. Les palmeraies ont toutes subi des déclinaisons de surface et de compacité, mais avec des formes différentes. La combinaison des métriques a permis de mettre en valeur l'impact négatif de l'urbanisation excessive sur les palmeraies. La palmeraie de Biskra est la plus touchée, une grande part a été convertie par le bâti. La palmeraie de Ouargla est soumise à un processus de fragmentation pouvant amener à l'atténuation de la continuité écologique caractérisant cette bande vitale. La palmeraie de Touggourt, malgré qu'elle a moins de pertes de compacité et de continuité, n'est pas mise à l'écart. Un début de franchissement de sa surface est nettement remarqué aussi bien sur la cartographie spatiotemporelle qu'en combinant la lecture des comportements des métriques paysagères sur toute la période d'étude.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de recherche a été mené dans une perspective de mise en évidence des formes spatiotemporelles générées par l'étalement incontrôlé des grandes villes oasiennes du Bas-Sahara algérien, ainsi que la compréhension des mutations accompagnantes affectant les paysages oasiens. Les effets néfastes engendrés par l'étalement urbain sont à l'origine de la remise en cause de cette forme récente de développement urbain. Mais malgré cette stigmatisation totale par tous les acteurs, ce phénomène persiste et ne cesse de dominer les paysages urbains et périurbains. L'étalement urbain est un phénomène multidimensionnel et de nature diachronique, qui est essentiellement rattaché à des réalités spatiales assez complexes avec des formes très variées. Investir sur ce phénomène universel fait nécessairement appel aux approches multidisciplinaires qui permettent sa spatialisation et prennent en compte des forces motrices locales qui le poussent et qui se distinguent selon les contextes naturels et socioéconomiques.

La transcription du concept du développement soutenable dans le développement urbain par les aménageurs est envisageable à travers le remodelage des formes urbaines. À ce titre, la morphologie urbaine se présente comme une clé importante, étant qu'elle s'intéresse à la description des formes apparentes produites par la société. À la faveur de la vision multiscale qu'elle porte, elle aide à caractériser le profil de la ville d'un point de vue de soutenabilité urbaine. L'étude de l'étalement urbain n'est envisageable qu'à une échelle globale qui inclut l'ensemble de l'espace urbain avec son environnement immédiat, c'est donc l'échelle de la Macroforme. Il s'agit là d'une position « distanciée » qui permet de mieux visualiser l'insertion de la ville dans son milieu physique. Le suivi de la macroforme urbaine peut conduire à appréhender les éléments conditionnant la formation de la forme de la ville. D'une règle générale, la macroforme est façonnée par l'interaction de plusieurs facteurs de provenances naturelles et humaines. Le site, de par sa configuration géomorphologique et ses attributs géologiques, hydrologiques et climatiques est un élément déterminant de la macroforme urbaine. La configuration des axes de transport est aussi un second élément influençant l'évolution spatiotemporelle de la macroforme. Elle amène souvent à la formation successive des formes linéaires et digitées, suivant l'allongement des axes de transport. Un troisième facteur, d'ordre anthropique, aussi important et influence directement l'étalement de la macroforme urbaine, il s'agit des politiques et choix d'aménagement adoptés, c'est-à-dire les décisions volontaires du pouvoir.

Un regard historique permet de comprendre l'influence de ces éléments sur les formes de villes. Depuis son origine, les macroformes urbaines avaient des formes compactes bien délimitées et définies par le tracé des murs de rempart. Cette forme compacte a historiquement caractérisé la cité jusqu'à la révolution industrielle au XIX^e siècle. À partir de cette période, et suite à l'explosion

démographique et au progrès technique, les villes ont commencé de s'étaler au de-là des murs d'enceinte et avoir de nouvelles formes éclatées. De nouveaux problèmes ont accompagné la croissance non maîtrisée des villes industrielles, les plus aggravés étaient d'ordre sanitaire et sécuritaire, ce qui a amené à l'émergence de nouvelles tendances urbaines hygiénistes arguant l'amélioration des conditions de vie des habitants par la proposition de nouvelles formes comme celles des cités jardins qui consistent à planifier l'étalement des villes dans un cadre de vie plus adapté avec la nature. Depuis le début de la deuxième moitié du siècle dernier, l'étalement urbain demeure la forme la plus généralisée que portent les villes contemporaines. L'avènement du transport motorisé et les politiques foncières favorisant les périphéries lointaines en sont les principales forces motrices. Mais cette modalité de croissance spatiale n'était pas passive. Les coûts sociaux, économiques et environnementaux sont constatés assez lourds, ce qui a conduit à une remise en cause des modes d'aménagement et de repenser la planification spatiale du développement urbain en s'accommodant notamment avec les nouvelles conceptions du développement durable.

Si le consensus universel a donné avantage aux villes compactes comme référence de soutenabilité urbaine, les débats scientifiques et professionnels se consentent aussi qu'il n'existe pas une définition bien précise d'une forme urbaine durable, mais des formes qui répondent mieux aux impératives de la durabilité. Les formes étalées sont devenues défavorables compte tenu des inconvénients qu'elles présentent notamment la consommation excessive des espaces de potentialité agricole, l'allongement des distances motorisées en aggravant la pollution et l'émission des Gaz à Effet de Serre (GES), ainsi que l'accentuation de la ségrégation sociospatiale liée à la fragmentation des tissus urbains. Ces éléments critiques ont abouti à avantager les formes compactes qui sont moins consommatrices d'espace, moins énergivores avec moins de déplacements polluants, et permettant plus d'interaction sociale. Mais cette forme a cependant ses faiblesses, notamment en ce qui concerne l'intégration des espaces verts et naturels dans l'organisation spatiale de la ville. Ces espaces vitaux sont moins accessibles et souvent moins présents dans les tissus compacts. L'intégration des trames vertes dans ces différentes formes comme les corridors écologiques et les pénétrantes vertes semble nécessaire pour améliorer la qualité de vie dans les tissus entassés.

Le meilleur compromis qui est largement défendu et recommandé par les nouveaux mouvements urbanistiques, tels que le *Smart growth* et le *New Urbanism*, est d'opter pour le « polycentrisme compact » ou la « concentration décentralisée ». L'opportunité que porte ce modèle de développement spatial est, d'un côté, de favoriser la mixité sociale et les déplacements doux, d'un autre côté, il offre la possibilité d'augmenter l'accessibilité aux aménités naturelles à travers l'augmentation des bordures urbaines qui, par la même, permettent la création d'espaces vides aussi accessibles et en même temps favorables aux extensions urbaines. L'interaction de la ville avec son

environnement constitue un des enjeux essentiels que portent ces nouvelles tendances de soutenabilité urbaine.

Dans la même optique, la protection des environnements fragiles comme celles des milieux oasiens est considérée comme une nécessité primordiale à mettre en avant dans toute politique de soutenabilité saharienne, par la mise en place et d'une manière généralisée de dispositifs d'évaluation de l'impact des formes d'aménagement urbain proposées. À ce titre, l'écologie du paysage urbain offre un cadre conceptuel et méthodologique assez riche permettant l'appréhension et l'évaluation des transformations spatiales affectant les paysages et qui sont provoquées par l'étalement des surfaces urbanisées. L'approche écologique se penche sur le maintien de l'équilibre et des processus écologiques à travers la mise en œuvre de deux concepts principaux : la connectivité spatiale et la continuité des réseaux et corridors verts. C'est dans cette vision que se sont développées les politiques de protection et de valorisation de la biodiversité urbaines, notamment l'intégration des trames vertes et des corridors écologiques autant dans les nouveaux projets d'aménagement urbain que dans les opérations de reconstructions des tissus existants.

Le suivi et l'évaluation de l'étalement rapide et incontrôlé des villes oasiennes peuvent être envisagés à travers d'une part, une cartographie spatiotemporelle du changement, bien actualisée et, d'autre part, l'utilisation des métriques paysagères pour l'évaluation de ce changement. Ces deux méthodes se basent principalement sur la télédétection spatiale et les systèmes d'information géographiques. La généralisation des images satellitaires a apporté de considérables contributions aux études urbaines. Les images satellites, de par leurs visions larges et la richesse des informations spatiales qu'elles portent ainsi que leurs temporalités régulières, ont permis de surmonter les problèmes relatifs tant à la collecte de l'information sur l'utilisation du sol qu'à son actualisation. De plus, la nature numérique de ce type de support lui a donné la faveur d'être traitée par les SIG qui, quant à eux, ont offert la possibilité de diversifier les applications dans les différents domaines. La détection du changement (DC) est l'une des principales applications de la télédétection spatiale. Elle permet l'identification et la cartographie du changement à travers la comparaison multitudes des images satellitaires. Elle permet également la quantification et la description des surfaces changées et inchangées. L'approche par les métriques paysagères consiste à mesurer et évaluer les différents aspects caractérisant les structures paysagères à savoir la composition, la configuration et l'organisation spatiales.

C'est dans cette optique que nous avons essayé d'étudier les formes de la croissance spatiale des grandes villes du Bas-Sahara algérien. À fin d'appréhender les particularités géographiques et socioéconomiques de notre zone d'étude, nous avons essayé d'étudier le contexte global que présente

le Sahara et plus particulièrement le Sahara algérien. Ce très vaste territoire, avéré pendant longtemps hostile à la vie humaine, s'impose actuellement comme un territoire stratégique en raison des richesses fossiles et hydriques qu'il enferme. Mais, la configuration endoréique des dépressions oasiennes, additionnée aux particularités climatiques géomorphologiques, a fait des pays oasiens des milieux fragiles, dont l'équilibre écosystémique qui à persister pendant longtemps se trouve actuellement vulnérable aux bouleversements de provenances naturelles ou anthropiques.

Le suivi de l'urbanisation, en analysant les différents recensements de la population, a révélé que ce phénomène est plus accentué au Sud algérien. L'analyse a révélé également qu'au niveau du Sahara algérien, les dynamiques d'urbanisation demeurent plus marquées au Bas-Sahara et que les villes les plus peuplées sont celles de cette région. En plus de l'ancrage historique du fait urbain dans les pays Bas-Sahariens, les investissements en hydrocarbures et les politiques nationales favorisant l'urbain ont donné plus d'attractivité aux villes du Bas-Sahara, ce qui explique leurs essors démographiques qui sont essentiellement de nature urbaine. Cet essor démographique non maîtrisé a négativement influencé l'équilibre écosystémique oasien. De véritables problèmes sont actuellement posés, les plus manifestants sont la remontée des eaux salines de la nappe phréatique et le risque des inondations qui concerne l'ensemble de ces villes. La prise en compte de la fragilité des écosystèmes oasiens ainsi que l'équilibre caractérisant la composition de leurs paysages doivent être mis en avant dans toute mise en place de projet de soutenabilité oasienne.

Compte tenu de la fragilité du milieu et des problèmes spécifiques menaçant l'équilibre écosystémique de ces oasis, les effets de l'étalement des zones bâties sur la configuration oasienne ont été mis en évidence en essayant en premier lieu de comprendre les transformations d'occupation et d'utilisation effectuées sur ces territoires oasiens, à travers l'établissement d'une cartographie spatiotemporelle représentant et décrivant ces dynamiques de changement, pour par la suite tenter de mesurer et évaluer les formes paysagères produites en les confrontant aux métriques paysagères issues de l'écologie du paysage urbain.

Les résultats de la comparaison post-classification des scènes Landsat multitudes ont montré un important étalement des surfaces bâties contre un recul excessif des palmeraies, avec variation d'ampleurs d'évolution entre les deux intervalles d'étude (1985 - 2000) et (2000 - 2015). La croissance des surfaces bâties était plus accentuée pendant la seconde période, à l'encontre des palmeraies qui ont subi des pertes de surfaces plus remarquées dans la première période (1985 - 2000). La comparaison cartographique de l'évolution des trois villes du corpus d'étude a permis de ressortir des traits communs caractérisant leurs tendances spatiotemporelles. En ce qui concerne les surfaces bâties pour les trois villes, la croissance spatiale est caractérisée par l'éclatement des

extensions urbaines au-delà des limites physiques et naturelles définissant ces oasis depuis leurs genèses. Le deuxième caractère de commun est le couronnement du phénomène de conurbation urbaine à la suite des extensions successives des anciens Ksour et quartiers, pour par la suite former une seule grande agglomération. La ville de Biskra intègre actuellement deux communes limitrophes qui sont Chetma à l'est et El Hadjeb à l'ouest ; l'actuelle agglomération de Ouargla réunit quatre communes qui sont Ouargla centre, Ain Beida, Sidi Khouiled et Said Otba ; la ville de Touggourt rentre ainsi dans l'intercommunalité réunissant les communes de Touggourt, El-Nezla, Tebesbest, et Ezouia El-Abidia. Le suivi de l'évolution des macroformes urbaines a permis de visualiser et caractériser les formes spatiotemporelles produites à chaque étape d'évolution. Ces résultats nous amènent à confirmer notre première hypothèse qui correspond à un étalement des taches urbaines, compte tenu de l'achèvement des conurbations urbaines et du report des extensions spatiales au-delà des limites physiques des oasis prouvées à l'issue de la comparaison post-classification.

Les résultats de la détection du changement (DC) ont montré aussi un recul net des palmeraies. À l'intérieur des périmètres urbains, la végétation urbaine a perdu d'importantes surfaces « vitales » au profit des extensions bâties qui se sont propagées de manière accélérée et même incontrôlée. Différentes formes de conversion des surfaces végétales ont été révélées : soit en franchissant les palmeraies en leur provoquant des morcellements et donc fragmentation paysagère, comme c'est le cas de Biskra et Ouargla ; soit en grignotant les palmeraies avoisinantes comme à Touggourt ; soit par empiètement presque total comme à Biskra. Sur le plan quantitatif, les résultats de la cartographie spatiotemporelle ont montré que la croissance spatiale des surfaces bâties est plus amplifiée à Biskra et à Ouargla par rapport à Touggourt, avec plus d'ampleur à Biskra. La même logique et le même ordre sont constatés quant aux « trames vertes urbaines ». La palmeraie de Biskra est la plus touchée par les extensions du bâti, la majeure surface est convertie par le bâti et le reste se trouve quasiment morcelé. La palmeraie de Ouargla vient en second lieu, sa palmeraie est actuellement fragmentée par le bâti notamment à l'ouest (quartier Bouamar) et au nord (vers Said Otba). La palmeraie de Touggourt est la moins atteinte par rapport aux premiers cas, mais avec cette même logique d'évolution et à moyen terme, cette bande verte pourra être fragmentée notamment dans la partie centrale (les palmeraies de Sidi Ennas, Chemoura et Guettai). Cette disparité d'ampleur semble principalement liée aux statuts politico-économiques et aux poids démographiques que présente chaque ville.

Quant aux métriques paysagères, les résultats ont révélé deux tendances opposées caractérisant l'évolution des classes paysagères. D'un côté, les indices de composition NP, PLAND et LPI ont montré que la classe du Bâti a considérablement évolué pour les trois villes, avec plus d'ampleur enregistrée à Biskra dont la surface urbanisée représentée par PLAND a atteint une part dépassant

32 % de l'ensemble du paysage oasien (contre 6 % en 1985), suivi par Ouargla avec une part dépassant 24 % (contre 6 % en 1985) et, au final, Touggourt dont la surface bâtie a atteint une part de 18 % (contre 7 % en 1985). Mais la corrélation de ces résultats avec les indices de configuration AREA_MN et ENN_MN nous a permis de distinguer les modes de croissance. Le tissu urbain de la ville de Biskra a suivi deux formes principales de croissance : une logique plutôt discontinue par rapport au tissu central dominant la première période (1985 – 2000), suivi par une logique de densification en continu des nouveaux fragments urbains ce qui a abouti à la formation de conurbation intégrant l'agglomération de Chetma à l'est de la ville. La tache urbaine de la ville de Ouargla s'est caractérisée par des logiques inverses. Entre 1985 et 2000, les extensions urbaines étaient davantage en continuité ou en proximité du tissu existant. Entre 2000 et 2015 et à la suite de la saturation de la ville centre, en remplissant sa cuvette, les extensions urbaines se trouvent opérées en discontinuité, en franchissant les limites physiques (la *sebkha* et la palmeraie) pour être opérées sur le plateau de Bamendil à l'ouest (la ville nouvelle) et au-delà de la palmeraie avec la propagation des quartiers spontanés périphériques. Cette même logique de croissance a pratiquement caractérisé l'évolution de la tache urbaine de Touggourt. La croissance spatiale a en premier temps suivi un mode continu avec le tissu existant pour prendre, par la suite et en second temps, une forme éclatée au-delà de la RN° 03 avec l'apparition et la croissance des quartiers d'El Moustakbal à l'ouest de la ville comme nouvelle zone urbanisée.

D'un autre côté, les résultats des métriques synthétiques d'agrégation et de forme du paysage (AI et LSI) ont révélé des tendances ainsi distinguées. En ce qui concerne l'évolution morphologique de la ville Biskra, le suivi de ces deux indices a conduit à constater que la croissance spatiale de cette ville avait une tendance vers la compaction, et que le tissu urbain avait une morphologie moins agrégée (c'est à dire plus fragmentée) en 1985, période d'apparition des premières extensions urbaines notamment à El-Alia à l'est et au niveau de la zone d'activité au sud-ouest. À partir de cette période, c'était la densification des nouvelles zones urbanisées et le remplissage des interstices qui ont caractérisé la croissance spatiale de la ville-centre ce qui explique l'augmentation de la compacité morphologique indiquée par les deux indices AI et LSI. Quant à la ville de Ouargla, ces deux indices ont révélé deux comportements différents, ce qui nous a amenés à revenir à l'indice LSI (indice du plus grand fragment) et en même temps en correspondance avec la cartographie spatiotemporelle. Cette combinaison de résultats nous a permis de conclure que la tache urbaine de cette ville avait en premier temps une tendance de désagrégation (éclatement) traduite par l'apparition de la nouvelle ville (Hai En-Nasr) sur le plateau de Bamendil ainsi que les quartiers périphériques sur l'« arrière terrains » des palmeraies. En concomitance de cette désagrégation, la ville-centre (le plus grand fragment urbain) a continué de s'étendre en mode continu ce qui explique l'augmentation de l'indice

LSI. En second temps (2000 - 2015), la tache urbaine a pris une tendance d'agrégation (compaction) traduite par l'augmentation des deux indices AI et LSI. Au cours de cette seconde période, la croissance de la tache du bâti s'est effectuée par densification des zones existantes en mode continu ce qui a provoqué la fragmentation de la palmeraie et a permis en même temps la conurbation des différents fragments urbains. Les résultats correspondant à la ville de Touggourt ont montré des tendances inverses à celles de Ouargla. L'extension spatiale de cette ville a suivi en premier temps un mode plutôt continu indiquant de ce fait une première tendance d'agrégation paysagère, puis et en second temps, une deuxième tendance de désagrégation a pris place pour caractériser la croissance de la classe du Bâti pendant la deuxième période (200 - 2015).

Quant à la classe des palmeraies, les résultats des métriques paysagères ont révélé des tendances opposées à l'étalement de la classe du Bâti. Les palmeraies ont toutes subi des déclinaisons de surface et de compacité, mais avec des formes différentes. Les indices de composition (NP, PLAND et LPI) ont mis en valeur un recul assez remarquable des trois palmeraies, amis avec ampleurs différentes. La palmeraie de Biskra est la plus atteinte avec une perte dépassant les 62 % de surfaces, suivie par celle de Ouargla avec une perte de plus de 26 %, puis celle de Touggourt qui a perdu plus de 4 % de sa surface agricole. Les deux indices AREA_MN et ENN_MN ont pu montrer l'impact négatif de l'urbanisation sur leurs configurations. En accompagnement de la perte progressive de sa surface agricole, la palmeraie de Biskra a subi un morcellement excessif sur toute la période d'étude, mais plus d'accentuation pendant la première période (1985 – 2000). La palmeraie de Ouargla a pratiquement subi un processus similaire de morcellement le long de la période d'étude, mais avec plus d'accentuation pendant la période (1985 – 2000) d'où l'impact était plus significatif. La palmeraie de Touggourt semble moins atteinte par la fragmentation par rapport aux cas précédents, mais il paraît qu'elle a subi des perforations internes dues à d'autres facteurs de dégradation agricole.

Les résultats des métriques synthétiques de configuration (AI et LSI) ont pu révéler les transformations paysagères engendrées à la suite de l'étalement de la classe du bâti. À ce titre, la palmeraie de Biskra a été la plus impactée par l'avancée du Bâti avec une importante perte de surface et de compacité, dont la majeure partie a été enregistrée pendant la première période d'étude. La palmeraie de Ouargla a aussi subi une perte de compacité sur toute la période, amis avec une forme différente, comme c'est déjà montré dans l'analyse cartographique (chap. VII). La palmeraie de Touggourt est ainsi affectée par la fragmentation paysagère, mais avec moins d'impact. Cette palmeraie a relativement pu maintenir son niveau d'agrégation notamment pendant la seconde période d'étude (200 - 2015), d'où le plus grand fragment agricole a pu récupérer de surface à la suite des travaux de drainage et d'entretien effectués pendant cette période.

En somme, la lecture globale de l'évolution des métriques paysagères a permis de ressortir deux tendances quasiment opposées caractérisant les deux classes d'occupation du sol, celle des surfaces bâties et celle des palmeraies. Sur toute la période, la classe du Bâti s'est continuellement augmentée avec des configurations tendant davantage vers la compaction morphologique. Par contre, la classe des palmeraies a subi un recul progressif au profit des surfaces bâties, ce recul est traduit d'une part, par la perte de surfaces dans toutes les palmeraies, d'autre part, par l'augmentation des fragmentations spatiales qui était moins marquée à Touggourt. En confirmant notre seconde hypothèse de recherche, ces résultats montrent que les palmeraies ont subi des processus de conversions de surfaces et de fragmentation paysagère induite par l'étalement non maîtrisé des surfaces bâties.

Ainsi, ce travail de recherche a pu montrer l'importance de l'approche écologique pour la compréhension des effets de l'étalement incontrôlé des zones urbaines, notamment dans les milieux fragiles et particuliers comme les milieux oasiens. À ce titre, les méthodes quantitatives apportées par l'écologie du paysage urbain se manifestent comme moyen efficace permettant l'évaluation et la qualification des formes urbaines que portent les villes lors de leurs évolutions spatiales. La présente recherche a pu également montrer l'utilité de la télédétection spatiale et les systèmes d'information géographique comme moyen assez utile pour l'acquisition, le traitement et l'analyse de l'information spatiale. Les images satellitales se présentent ainsi comme un support assez riche permettant à la fois l'acquisition et la production de l'information nécessaire pour le suivi et la cartographie des transformations spatiotemporelles caractérisant les paysages urbains et périurbains. Dans une optique de soutenabilité urbaine, ces outils technologiques facilitent l'acquisition et l'interprétation de l'information actualisée sur l'occupation et l'utilisation du sol, ce qui les rend indispensables pour des décisions plus efficaces en matière d'aménagement et gestion urbaine.

Perspective de recherche

Dans une perspective plus large, cette démarche peut être reproduite pour étudier le phénomène dans les autres villes sahariennes et d'évaluer leurs modèles de développement urbain. À une échelle plus fine, au niveau des quartiers, cette approche peut amener à mesurer et à qualifier la végétation urbaine, une composante bioclimatique vitale à mettre en avant pour une soutenabilité de la ville saharienne.

BIBLIOGRAPHIE

- Aboelnour, M., et Engel, B. A. (2018). Application of Remote Sensing Techniques and Geographic Information Systems to Analyze Land Surface Temperature in Response to Land Use/Land Cover Change in Greater Cairo Region, Egypt. *Journal of Geographic Information System*, 10(01), 57-88. <https://doi.org/10.4236/jgis.2018.101003>
- Abu Ghurah, M., Kamarudin, M. K. A., Wahab, N. A., Umar, R., Nik Wan, N. A. F., Juahir, H., ... Hidayat, Y. (2018). Temporal change detection of land use/land cover using Gis and remote sensing techniques in South Ghor regions, Al-karak, Jordan. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*; 10(1S) 95-111. doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v10i1s.7>
- Acevedo, W., Taylor, J. L., Hester, D. J., Mladinich, C. S., et Glavac, S. (2006). Rates, trends, causes, and consequences of urban land-use change in the United States. Professional Paper (No. 1726). US Department of the Interior, USGS. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1726>
- Agejidad, R. (2009). *Etalement urbain et évaluation de son impact sur la biodiversité, de la reconstitution des trajectoires à la modélisation prospective. Application à une agglomération de taille moyenne: Rennes Métropole*. Thèse en géographie. Université Rennes 2.
- Agejidad, R., et 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. *Cybergeo* [En ligne], document 766. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27465>
- Aguilera, F., Valenzuela, L. M., et Botequilha-Leitão, A. (2011). Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 99(3-4), 226-238. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.10.004>
- Ahern, J. (2013). Urban landscape sustainability and resilience: the promise and challenges of integrating ecology with urban planning and design. *Landscape Ecology*, 28(6), 1203-1212. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9799-z>
- Al-doski, J., Mansor, S. B., et Shafri, H. Z. M. (2013). Change detection process and techniques. *Civil and Environmental Research*, 3(10), 37-45.
- Al-Hindi, K. F., et Till, K. E. (2001). (Re)placing the New Urbanism debates: toward an interdisciplinary research agenda. *Urban Geography*, 22(3), 189-201. <https://doi.org/10.2747/0272-3638.22.3.189>
- Albert, P. (2007). *L'apport des images satellites dans l'analyse comparée des espaces périurbains des métropoles du sud-ouest européen*. Thèse en géographie. Univ. Toulouz II - Le Mirail. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>
- Alberti, M. (2008). *Advances in urban ecology integrating humans and ecological processes in urban ecosystems*. Springer US. 366 p.
- Alberti, M., Booth, D., Hill, K., Coburn, B., Avolio, C., Coe, S., et Spirandelli, D. (2007). The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins. *Landscape and Urban Planning*, 80(4), 345-361. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.08.001>
- Alberti, M., et Waddell, P. (2000). An integrated urban development and ecological simulation model. *Integrated Assessment*, 1(3), 215-227. <https://doi.org/10.1023/A:1019140101212>
- Alkama, Dj. (2005a). Une forte micro-urbanisation. In M. Côte (Éd.), *La ville et le désert. Le Bas-Sahara algérien* (p. 41-56). Iremam-Karthala.
- Alkama, Dj. (2005b). *Pour une nouvelle approche d'urbanisation dans les régions arides et semi-arides. Cas du Bas-Sahara algériens*. Thèse de doctorat en Architecture. UMK Biskra. 242 p.
- Allain, R. (2010). Par de-là le bien et le mal : L'évaluation de la ville compacte. *URBIA*, (11), 43-75.
- Allain, R. (2004). *Morphologie urbaine : Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Paris: Armand Colin. 254 p.
- Anderson, J. R. (1976). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data* (Vol.

- 964). US Government Printing Office. 21 p.
- Andersson, E. (2006). Urban landscapes and sustainable cities. *Ecology and Society*, 11(1), 34. <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art34/>
- Andrew, M. E., Wulder, M. A., et Nelson, T. A. (2014). Potential contributions of remote sensing to ecosystem service assessments. *Progress in Physical Geography*, 38(3), 328-353. <https://doi.org/10.1177/0309133314528942>
- Antoni, J.-P. (2010). L'étalement urbain. In *La France en villes* (p. 164-176). Ellipses.
- APUR (Atelier Parisien d'Urbanisme). (2003). *Quelle forme urbaine pour quelle densité vécue?* Rapport d'étude APUR. <https://www.apur.org/sites/default/files/documents/4P10.pdf>
- Armand, M. (2016). Images satellitaires et planification des villes du Tiers-Monde. *Mondes en développement*, 44(175). <https://doi.org/10.3917/med.176.0169>
- Artmann, M., Inostroza, L., et Fan, P. (2019). Urban sprawl, compact urban development and green cities. How much do we know, how much do we agree? *Ecological Indicators*, 96, 3-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.059>
- Askri, H., Belmecheri, A., Benrabah, B., Boudjema, A., Boumendjel, K., Daoudi, M., Ghandriche, H. (1995). Geology of Algeria. *Well Evaluation Conference Algeria*, 1-93.
- AUCAME (Agence d'études d'Urbanisme de Caen-Métropole). (2008). *La notion de densité*. Caen. 4 p.
- Audirac, I., Shermyen, A. H., et Smith, M. T. (1990). Ideal Urban Form and Visions of the Good Life Florida's Growth Management Dilemma. *Journal of the American Planning Association*, 56(4), 470-482. <https://doi.org/10.1080/01944369008975450>
- Azioune, R., Tatar, H., et Nouaceur, Z. (2018). Pluies extrêmes et risque d'inondation dans la ville de Biskra (Algérie). *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre*, (48), 93-106. <http://revue.umc.edu.dz//index.php/d/article/view/2995>
- Azzedine, I. M., Boualem, B., et Hakima, I.-I. (2011). La palmeraie du Ksar d' Ouargla ; entre dégradation et réhabilitation. *Annales des Sciences et Technologie AST, univ. Ourgla*, 3(01), 12-20. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/6341>
- Bailly, A. (1977). *La perception de l'espace urbain: les concepts, les méthodes d'étude, leur utilisation dans la recherche urbanistique*. Centre de recherche d'urbanisme. 264 p.
- Ballais, J.-L. (2005a). Les villes sahariennes et les ressources en eau. In M. Cote (Éd.), *La ville et le désert. Le Bas-Sahara algérien* (p. 73-93). Iremam-Karthala.
- Ballais, J.-L. (2005b). Les villes sahariennes et les risques naturels. In M. Côte (Éd.), *La ville et le désert. Le Bas-Sahara algérien* (p. 59-71). Paris - Aix-en-Provence: Iremam-Karthala.
- Ban, Y. (2016). Multitemporal Remote Sensing: Current Status, Trends and Challenges BT - Multitemporal Remote Sensing: Methods and Applications. In Y. Ban (Éd.), *Multitemporal Remote Sensing Methods and Applications* (p. 1-18). https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_1
- Ban, Y., et Yousif, O. (2016). Change Detection Techniques: A Review. In Y. Ban (Éd.), *Multitemporal Remote Sensing Methods and Applications* (p. 19-43). https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_2
- Barcelo, M., et Trépanier, M.-O. (1999). *Les indicateurs d'étalement urbain et de développement durable en milieu métropolitain*. INRS-Urbanisation.
- Barlow, J., Gardner, T. A., et Araujo, I. S. (2007). Quantifying the Biodiversity Value of Tropical Primary, Secondary, and Plantation Forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(47), 18555-18560.
- Barnsley, M. J., et Barr, S. L. (2000). Monitoring urban land use by earth observation. *Surveys in Geophysics*, 21(2-3), 269-289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1006798328429>
- Barr, S., et Barnsley, M. (1997). A region-based, graph-theoretic data model for the inference of second-order

- thematic information from remotely-sensed images. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(6), 555-576. <https://doi.org/10.1080/136588197242194>
- Barrué-Pastor, M., et Muxart, T. (1992). Le géosystème : nature « naturelle » ou nature « anthropisée » ? In M. Jollivet (Éd.), *Sciences de la nature, sciences de la société* (p. 259-266). <https://doi.org/10.4000/books.editions-cnrs.4187>
- Batty, M., Besussi, E., et Chin, N. (2003). *Traffic, urban growth and suburban sprawl*. USL website: http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper70.pdf
- Baudot, Y. (1997). L'influence de la résolution effective des données télédéteectées sur les possibilités d'analyse des milieux urbains complexes. *Télédétection des milieux urbains et périurbains, Actes des 6ièmes Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF/UREF, 2-5 octobre 1995*, 3-13. Montréal: AUPELF-UREF.
- Bechtel, B. (2011). Multitemporal Landsat data for urban heat island assessment and classification of local climate zones. *2011 Joint Urban Remote Sensing Event*, 129-132. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2011.5764736>
- Bechtel, B., et Daneke, C. (2012). Classification of Local Climate Zones Based on Multiple Earth Observation Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4), 1191-1202. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2189873>
- Belguidoum, S. (2002). Urbanisation et urbanité au Sahara. *Méditerranée*, 99(3), 53-64. <https://doi.org/10.3406/medit.2002.3261>
- Belguidoum, S. (2005). La restructuration de l'espace urbain : de la cité à la ville. In M. Cote (Éd.), *La ville et le désert. Le Bas-Sahara algérien* (p. 235-251). Karthala Éditions.
- Bendjelid, A., Brûlé, J.-C., Fontaine, J., Kouzmine, Y., et Ormaux, S. (2018). Introduction. Mutations sahariennes. *Les Cahiers d'EMAM. Études sur le Monde Arabe et la Méditerranée*, (30). <https://doi.org/DOI:10.4000/emam.1476>
- Bensaad, A. (2011). *L'eau et ses enjeux au Sahara*. <https://hal.inria.fr/hal-01571193v1>
- Benson, B. J., et MacKenzie, M. D. (1995). Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters. *Landscape Ecology*, 10(2), 113-120. <https://doi.org/10.1007/BF00153828>
- Berberoglu, S., et Akin, A. (2009). Assessing different remote sensing techniques to detect land use/cover changes in the eastern Mediterranean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(1), 46-53. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2008.06.002>
- Bernard, A. (1937). *Géographie universelle. Afrique septentrionale et occidentale*. Paris: Armand Colin.
- Bessy, P. (2000). Les formes récentes de la croissance urbaine. *Economie et Statistique*, (336), 35-52. <https://doi.org/https://doi.org/10.3406/estat.2000.7509>
- Bhatta, B. (2010). *Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data*. Springer Science & Business Media.
- Bianchin, A., et Bravin, L. (2008). Remote sensing and urban analysis. *International Conference on Computational Science and Its Applications*, 300-315. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69839-5_23
- Bisson, J. (2003). *Mythes et réalités d'un désert convoité : le Sahara*. L'Harmattan. 479 p. p.
- Biswas, A. (s. d.). *The spatial evaluation of sustainability in urban growth : measurement , analysis and approach for south – east region of Kolkata , India*. 1-8.
- Blair, R. B., et Launer, A. E. (1997). Butterfly diversity and human land use: Species assemblages along an urban gradient. *Biological Conservation*, 80(1), 113-125. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(96\)00056-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0006-3207(96)00056-0)
- Boccardo, P., Borgogno, M. E., Tonolo, F. G., et Lingua, A. (2004). Orthorectification of high resolution satellite images. *ISPRS 35th congress*, 30-35. <http://hdl.handle.net/2318/103885>

- Bochet, B. (2007). Débat ville étalée-ville compacte: la réponse des projets lausannois. *Revue économique et sociale*, 65(4), 95-108.
- Bonaiuto, M., Fornara, F., et Bonnes, M. (2003). Indexes of perceived residential environment quality and neighbourhood attachment in urban environments: a confirmation study on the city of Rome. *Landscape and Urban Planning*, 65(1), 41-52. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00236-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00236-0)
- Bonn, F. (Dir). (1998). *Précis de télédétection - Volume 2 : Applications thématiques*. Presses de l'Université du Québec. 633 p.
- Bouammar, B. (2010). *Le développement agricole dans les régions sahariennes. Etude de cas de la région de Ouargla et de Biskra*. Thèse en Science économiques. Univ. Ourgla.
- Bouchahm, N., Chaib, W., Drouiche, A., Zahi, F., Hamzaoui, W., Salemkour, N., ... Djabri, L. (2013). Caractérisation et cartographie des sites de remontée dans la région de l'Oued Righ (Bas Sahara algérien). *J Algérien des Régions arides*, NS. 76-88.
- Bouinot, J. (2006). Efficience économique des formes urbaines: compacité avec des tours comparée à l'étalement urbain. *Géographie, économie, société*, 8(4), 481-487. <https://doi.org/10.3166/ges.8.481-487>
- Boukhemis, K., Haham, D., et Zeghiche, A. (1990). Croissance urbaine et mutations socio-économiques dans l'Est algérien. *Annales de géographie*, 99(554), 458-470. <https://doi.org/https://doi.org/10.3406/geo.1990.20987>
- Boumaraf, B. (2013). *Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallée de Oued Righ, Sahara Nord Oriental Algérie*. Thèse de doctorat en Géographie. Université de Reims Champagne-Ardenne. <http://www.theses.fr/2013REIML002/document>
- Boumedine, R. S. (2013). *L'urbanisme en Algérie, échec des instruments ou instruments de l'échec*. Alger: es alternatives urbaines. 227 p.
- Bourgeois, M. (2015). *Impacts écologiques des formes d'urbanisation : modélisations urbaines et paysages*. Thèse de doctorat en Géographie et aménagement des territoires. Univ. Franche-Comte. <http://www.theses.fr/2015BESA1029/document>
- Bouselsal, B., et Kherici, N. (2014). Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement: cas de la région d'El-Oued (SE Algérie). *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 10(3). 161-170. <https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/view/109709>
- Bouzaher L. S. (2015). *Un aménagement durable par un projet écotouristique Cas des ksour de la micro région des Ziban. Le redressement d'un circuit écotouristique*. Thèse de doctorat en Architecture. UMK-Biskra. <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/1393>
- Bouzahzah, F. (2015). *Dynamique urbaine et nouvelle centralité cas de Biskra –Algérie*. Thèse de doctorat en aménagement du territoire. Univ. Constantine. <https://bu.umc.edu.dz/theses/amenagement/BOU6810.pdf>
- Brahimi, F. Z. (1994). L'habitat spontané Du milieu rural Algérien et rapport aux plans d'urbanisme cas de la région Algéroise. Mémoire de Magister, EPAU, Alger.
- Bramley, G., et Power, S. (2009). Urban Form and Social Sustainability: The Role of Density and Housing Type. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(1), 30-48. <https://doi.org/10.1068/b33129>
- Bravard, J.-P., et Garcier, R. (2014). Qu'est-ce qu'une Oasis? réflexions géographiques sur un objet-limite. In G. Tallet, Zivie-Coche. *Le Myrthe et la Rose. Mélanges offerts à Françoise Dunand*, Presses Universitaires de Montpellier, pp.305-323, 2014. {halshs-01255403}
- Breuste, J., Niemelä, J., et Snep, R. P. H. (2008). Applying landscape ecological principles in urban environments. In *Landscape Ecology* (Vol. 23). <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9273-0>
- Breuste, J., et Qureshi, S. (2011). Urban sustainability, urban ecology and the Society for Urban Ecology (SURE). *Urban Ecosystems*, 14, 313-317. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0186-3>
- Brown, M. A., Southworth, F., et Sarzynski, A. (2009). The geography of metropolitan carbon footprints.

- Policy and Society*, 27(4), 285-304. <https://doi.org/10.1016/j.polsoc.2009.01.001>
- Brueckner, J. K., Thisse, J.-F., et Zenou, Y. (1999). Why is central Paris rich and downtown Detroit poor?: An amenity-based theory. *European Economic Review*, 43(1), 91-107. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0014-2921\(98\)00019-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0014-2921(98)00019-1)
- Brûlé, J.-C., et Fontaine, J. (1988). *L'Algérie, volontarisme étatique et aménagement du territoire*. Alger: OPU. 248 p.
- Brûlé, J. C. (2004). Une carte des espaces vécus: vers une cartographie d'espaces de référence identitaire. In A. Bendjelid & J.-C. Brûlé (Éd.), *Aménageurs et aménagés en Algérie: héritages des années Boumediene et Chadli* (p. 298-307). Paris: L'Harmattan.
- Brundtland, G. H. (1987). *Notre Avenir à Tous*. Rapport de la commission nationale sur l'Environnement et le développement. ONU. Genève. 458 p.
- Burchell, R. W., Lowenstein, G., Dolphin, W. R., Galley, C. C., Downs, A., Seskin, S., ... Moore, T. (2002). *Costs of sprawl--2000*. TCRP. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_74-a.pdf
- Burchell, R. W., Shad, N. A., Listokin, D., Phillips, H., Downs, A., Seskin, S., ... Gall, M. (1998). *The costs of sprawl-revisited*. Washington: National Academies Press. 276 p.
- Burel, F., et Baudry, J. (1996). *Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*. Paris: Tec & Doc. 362 p.
- Burton, E., Jenks, M., et Williams, K. (2003). *The compact city: a sustainable urban form?* Routledge. 362 p.
- Buyantuyev, A., et Wu, J. (2012). Urbanization diversifies land surface phenology in arid environments: Interactions among vegetation, climatic variation, and land use pattern in the Phoenix metropolitan region, USA. *Landscape and Urban Planning*, 105(1), 149-159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.12.013>
- Buyantuyev, A., Wu, J., et Gries, C. (2010). Multiscale analysis of the urbanization pattern of the Phoenix metropolitan landscape of USA: Time, space and thematic resolution. *Landscape and Urban Planning*, 94(3), 206-217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.10.005>
- Byrne, G. F., Crapper, P. F., et Mayo, K. K. (1980). Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 10(3), 175-184. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(80\)90021-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(80)90021-8)
- Calthorpe, P. (1993). *The next American metropolis: Ecology, community, and the American dream*. New York: Princeton architectural press. 175 p.
- Camagni, R., Gibelli, M. C., et Rigamonti, P. (2002a). Forme urbaine et mobilité : les coûts collectifs des différents types d'extension urbaine dans l'agglomération milanaise. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, février(1), 105-139. <https://doi.org/10.3917/reru.021.0105>
- Camagni, R., Gibelli, M. C., et Rigamonti, P. (2002b). Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics*, 40(2), 199-216. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(01\)00254-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-8009(01)00254-3)
- Cao, C., et Lam, N. S.-N. (1997). Understanding the scale and resolution effects in remote sensing and GIS. *Scale in remote sensing and GIS*, vol 57, 72 p.
- Cao, X. (Jason), Mokhtarian, P. L., et Handy, S. L. (2009). The relationship between the built environment and nonwork travel: A case study of Northern California. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(5), 548-559. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2009.02.001>
- Capot-Rey, R. (1953). *Le Sahara français*. Paris: PUF. 465 p.
- CCT. (2005). *Notions fondamentales de télédétection*. CCT. 266 p. https://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_f.pdf
- CE. (2001). *Manuel des concepts relatifs aux systèmes d'information sur l'occupation et l'utilisation des sols*.

- CE. Luxembourg. 110 p.
- CETE de l'Ouest. (2002). *La densité, concept, exemples et mesures*. Rapport CETE. <http://www.certu.fr/>
- Charlot, S., Hilal, M., et Schmitt, B. (2009). La périurbanisation renforce-t-elle la ségrégation résidentielle urbaine en France? *Espace populations sociétés*. *Space populations societies*, (2009/1), 29-44. <https://doi.org/https://doi.org/10.4000/eps.3556>
- Chatain, M., Poujade, V., et Laurore, L. (1994). L'apport des données satellites dans les projets d'infrastructures de communication. *Bulletin du Comité français de cartographie*, (142-43), 29-31.
- Chaume, R., Champaud, J., Cherel, J.-P., Tissandier, C., Barret, E., Atkinson, A., et Muscat, G. (1993). *Croissance urbaine, environnement et imagerie satellite*. ORSTOM-CEE. 301 p.
- Cehma, A. (2011). Le sahara en Algérie, situation et défis. Colloque : *L'effet du Changement Climatique sur l'élevage et la gestion durable des parcours dans les zones arides et semi-arides du Maghreb*, Univ. Ouargla. 14-21. <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/2532>
- Chen, J., Gong, P., He, C., Pu, R., et Shi, P. (2003). Land-use/land-cover change detection using improved change-vector analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(4), 369-379. <https://doi.org/https://doi.org/10.14358/PERS.69.4.369>
- Cherigui, A.-N. (2012). les énergies du futur en Algérie: Sécurité, Enjeux et Perspectives. *Ecole d'été, Université Joseph Fourier de Grenoble*. http://maghrebeurope.ceth.fr/Project_Maghreb-Europe.pdf
- Chevalier, A. (1953). Le Sahara vu par les chercheurs scientifiques. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, (369-370), 281-285. <https://doi.org/10.3406/jatba.1953.6603>
- Clergeau, P. (2007). *Une écologie du paysage urbain*. Apogée. 136 p.
- Clifton, K., Ewing, R., Knaap, G., et Song, Y. (2008). Quantitative analysis of urban form: a multidisciplinary review. *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, 1(1), 17-45. <https://doi.org/10.1080/17549170801903496>
- CNES. (2002). *L'urbanisation et les risques naturels et industriels en Algérie : Inquiétudes actuelles et futures*. Rapport CNES. <http://www.cnes.dz/cnes/wp-content/uploads/Rapport-sur-l'urbanisation-et-les-risques-naturels-et-industriels-en-Algerie.pdf>
- Collet, C., et Caloz, R. (2001). *Précis de télédétection: traitements numériques d'images de télédétection*. Vol 3. Presses de l'Université du Québec. 386 p.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Congalton, R. G., et Green, K. (2008). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices* (2nd éd.). Boca Raton: CRC press. 200 p.
- Congedo, L. (2016). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.0.1.1*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>
- Congedo, L., et Macchi, S. (2015). The demographic dimension of climate change vulnerability: exploring the relation between population growth and urban sprawl in Dar es Salaam. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 13(Complete), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.12.002>
- Congedo, L., et Munafò, M. (2014). Urban Sprawl as a Factor of Vulnerability to Climate Change: Monitoring Land Cover Change in Dar es Salaam. In *Climate Change Vulnerability in Southern African Cities: Building Knowledge for Adaptation*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00672-7_5
- Connell, J. H. (1978). Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs. *Science*, 199(4335), 1302 LP - 1310. <https://doi.org/10.1126/science.199.4335.1302>
- Connors, J. P., Galletti, C. S., et Chow, W. T. L. (2013). Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona. *Landscape Ecology*, 28(2), 271-283. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9833-1>
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., et Lambin, E. (2004). Review Article Digital change

- detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9), 1565-1596. <https://doi.org/10.1080/0143116031000101675>
- Cote, M. (1996). *L'Algérie*. Paris: Armand Colin. 253 p.
- Côte, M. (1993). *L'Algérie ou l'Espace retourné*. Media plus. 362 p.
- Côte, M. (1998a). Des oasis malades de trop d'eau? *Secheresse*, 9(2), 30-123. http://www.persee.fr/doc/medit_0025-8296_2002_num_99_3_3253
- Côte, M. (1998b). Dynamique urbaine au Sahara. *Insaniyat / إنسانيات*, 92-85 (5), <https://doi.org/10.4000/insaniyat.11818>
- Côte, M. (2005). L'urbanisation aujourd'hui au Bas-Sahara. In M. Côte (Éd.), *La ville et le désert. Le Bas-Sahara algérien* (p. 13-26). Iremam-Karthala.
- Côte, M. (2012). *Signatures sahariennes: terroirs & territoires vus du ciel*. AMU: Presses universitaires de Provence. 308 p p.
- Côte, M. (2014). *Le Sahara : Barrière ou pont ?* AMU: Presses universitaires de Provenances. 158 p.
- Da Cunha, A. (2005). Régime d'urbanisation, écologie urbaine et développement urbain durable: vers un nouvel urbanisme. In A. Da Cunha, P. Knoepfel, J.-P. Leresche et S. Nahrath (Éds), *Enjeux du développement urbain durable*. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 13-37.
- Dai, X. L., et Khorram, S. (1999). Remotely sensed change detection based on artificial neural networks. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 65, 1187-1194.
- Dall'O', G., Galante, A., et Torri, M. (2012). A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy and Buildings*, 48, 211-219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.034>
- Daumas, E. (1845). *Le Sahara algérien: études géographiques, statistiques et historiques sur la région au sud des établissements français en Algérie*. Paris: Fortin, Masson et cie. 339 p.
- De la Barrera, F., Reyes-Paecke, S., et Banzhaf, E. (2016). Indicators for green spaces in contrasting urban settings. *Ecological Indicators*, 62, 212-219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.027>
- Décamps, H. (2004). L'écologie du paysage ou l'ambition paysagère de l'écologie. *La Lettre de l'IFB*, 5, 2p.
- Dechaicha, A. (2013). *L'étalement urbain et les contraintes physiques et naturelles Cas d'étude : La ville de Bou Saâda*. Mémoire de Magistère. UMK Biskra. biskra.dz/528/1/1_etalement_urbain_et_les_contrainte_physiques_et_naturelles.pdf
- Dechaicha, A., et Alkama, Dj. (2020). A spatio-temporal cartography and landscape metrics of urbanization patterns in algerian low-sahara. the case of ouargla city. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 12(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.4314/jfas.v12i3.16>
- Deelstra, T. (1998). *Towards Ecological Sustainable Cities: Strategies, Models and Tools BT - Urban Ecology* (J. Breuste, H. Feldmann, & O. Uhlmann, Éd.). https://doi.org/10.1007/978-3-642-88583-9_2
- DeFries, R., Karanth, K. K., et Pareeth, S. (2010). Interactions between Protected Areas and Their Surroundings in Human-Dominated Tropical Landscapes. *Biological Conservation*, 143(12), 2870-2880.
- Deng, C., et Wu, C. (2012). BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments. *Remote Sensing of Environment*, 127, 247-259. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.009>
- Deng, J. S., Wang, K., Deng, Y. H., et Qi, G. J. (2008). PCA-based land-use change detection and analysis using multitemporal and multisensor satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(16), 4823-4838. <https://doi.org/10.1080/01431160801950162>
- Desailly, B. (2005). Ville et environnement. *Environnement et Sociétés*. Scéren-CRDP Midi-Pyrénées, 219-227. <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00753511>

- Dessus, B. (2002). Choix énergétiques, choix de développement. *Revue EcoRev*, (10).
- Dewidar, K. H. . (2004). Detection of land use/land cover changes for the northern part of the Nile delta (Burullus region), Egypt. *International Journal of Remote Sensing*, 25(20), 4079-4089.
- Dijst, M. (1997). Spatial policy and passenger transportation. *Netherlands journal of housing and the built environment*, 12(1), 91-111. <https://doi.org/10.1007/BF02502625>
- Ding, C., Knaap, G. J., et Hopkins, L. D. (1999). Managing urban growth with urban growth boundaries: A theoretical analysis. *Journal of Urban Economics*, 46(1), 53-68.
- Doi, K., Kii, M., et Nakanishi, H. (2008). An Integrated Evaluation Method of Accessibility, Quality of Life, and Social Interaction. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(6), 1098-1116. <https://doi.org/10.1068/b3315t>
- Donnay, J.-P. (1999). Use of Remote Sensing Information in Planning. In J. Stillwell, S. Geertman, & S. Openshaw (Éd.), *Geographical Information and Planning: European Perspectives* (p. 242-260). https://doi.org/10.1007/978-3-662-03954-0_13
- Donnay, J.-P., Barnsley, M. J., et Longley, P. A. (2000). Remote sensing and urban analysis: a research agenda. In P. A. Longley (Éd.), *Remote sensing and urban analysis: GISDATA 9* (p. 3-18). London/New York: CRC press.
- Donnay, J.-P., Barnsley, M. J., et Longley, P. A. (2003). *Remote sensing and urban analysis: GISDATA 9*. London/New York: CRC Press.
- Donnay, J.-P., et Nadasdi, I. (1992). Usage des données satellitaires de hautes résolution en modélisation urbaine : application à l'agglomération de Maastricht. *Acta Geographica Lovaniensa*, 33, 659-669.
- Dousset, B., Gourmelon, F., et Mauri, E. (2007). Application of satellite Remote Sensing for Urban Risk Analysis: a case study of the 2003 extreme heat wave in Paris. *2007 Urban Remote Sensing Joint Event*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/URS.2007.371849>
- Dresch, J. (1939). Structure et relief du Sahara. *L'Information Géographique*, 3(3), 111-114. <https://doi.org/10.3406/ingeo.1939.4909>
- Dresch, J. (1982). *Géographie des régions arides*. Paris: P.U.F. 280 p.
- Dreschler-Fischer, L., Drewniok, C., Lange, H., et Schroder, C. (1993). A knowledge-based approach to the detection and interpretation of changes in aerial images. *Proceedings of IGARSS '93 - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 159-161 vol.1. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1993.322510>
- Dridi, H., Bendib, A., et Kalla, M. (2015). Analysis of urban sprawl phenomenon in Batna city (Algeria) by remote sensing technique. *Analele Universităţii din Oradea, Seria Geografie*, (2). <http://istgeorelint.uoradea.ro/Reviste/Anale/anale.htm>
- DU, P., Li, X., Cao, W., Luo, Y., et Zhang, H. (2010). Monitoring urban land cover and vegetation change by multi-temporal remote sensing information. *Mining Science and Technology (China)*, 20(6), 922-932. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60308-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60308-2)
- Du, P., Liu, P., Xia, J., Feng, L., Liu, S., Tan, K., et Cheng, L. (2014). Remote Sensing Image Interpretation for Urban Environment Analysis: Methods, System and Examples. *Remote Sensing*, 6(10), 9458. <https://doi.org/10.3390/rs6109458>
- Dubief, J. (1953). Ruissellement superficiel au Sahara. *Colloque CNRS XXV (Alger, 1951)*, 303-315.
- Dubief, Jean. (1963). *Le climat du Sahara* (Vol. 2). Université d'Alger, Institut de recherches sahariennes. 298 p.
- Dubost, D. (1989). L'oasis : mythe agricole et réalités sociales. *Cahiers de la Recherche Développement*, (22), 28-43. http://cahiers-recherche-developpement.cirad.fr/revue/notice_fr.php?dk=428018
- Dubost, D. (1991). *Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes*. Thèse de doctorat en Géographie. Université de Tours.

- Dubost, D. (1992). Aridité, agriculture et développement : le cas des oasis algériennes. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 3(2), 85-96.
- Dumont, M., et Hellier, E. (2010). Les nouvelles périphéries urbaines. Formes, logiques et modèles de la ville contemporaine. In *Lectures, Publications reçues*. Presses universitaires de Rennes (coll. Espace et Territoires). 218 p.
- Dunn, C. P., Sharpe, D. M., Guntenspergen, G. R., Stearns, F., et Yang, Z. (1991). Methods for analyzing temporal changes in landscape pattern. In M.G. Turner et R. H. Gardner (Éd.), *Quantitative methods in landscape ecology: the analysis and interpretation of landscape heterogeneity* (Vol. 82, p. 173-198). New York: Springer-Verlag.
- Dureau, F., et Weber, C. (1995). *Télédétection et systèmes d'information urbains*. Paris: Anthropos. 398 p.
- ECFRPC (East Central Florida Regional Planning Council). (2001). *Envisioning and Planning Wildlife Friendly Communities*. http://patternspin.com/fh/FLwildlife_mnl_Ch3_final2_low.pdf
- EEA. (2005). *The European Environment. State and outlook 2005*. Luxembourg,.
- EEA. (2014). *Adaptation of transport to climate change in Europe*. <https://www.eea.europa.eu/publications/adaptation-of-transport-to-climate>
- Elson, M. J. (1986). *Green belts: conflict mediation in the urban fringe*. London: Butterworth-Heinemann. 304 p.
- Enault, C. (2003). *Vitesse, accessibilité et étalement urbain : analyse et application à l'aire urbaine dijonnaise*. Thèse de doctorat en Géographie Univ. Bourgogne. <http://www.theses.fr/2003DIJOL007/document>
- Engel-Cox, J. A., Hoff, R. M., et Haymet, A. D. J. (2004). Recommendations on the Use of Satellite Remote-Sensing Data for Urban Air Quality. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(11), 1360-1371. <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10471005>
- Engel-Cox, J. A., Holloman, C. H., Coutant, B. W., et Hoff, R. M. (2004). Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. *Atmospheric Environment*, 38(16), 2495-2509. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.039>
- Estoque, R. C., Murayama, Y., et Myint, S. W. (2017). Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of The Total Environment*, 577, 349-359. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.195>
- Ewing, R., Bartholomew, K., Winkelman, S., Walters, J., et Anderson, G. (2008). Urban development and climate change. *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, 1(3), 201-216. <https://doi.org/10.1080/17549170802529316>
- Fan, C., et Myint, S. (2014). A comparison of spatial autocorrelation indices and landscape metrics in measuring urban landscape fragmentation. *Landscape and Urban Planning*, 121, 117-128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.10.002>
- Fischesser, B., et Dupuis-Tate, M.-F. (2017). *Le guide illustré de l'écologie*. Delachaux (2éd). 352 p.
- Fischler, R. (2003). *Vers un nouvel urbanisme pour de nouveaux quartiers: revue des nouveaux courants nord-américains en urbanisme et aménagement et de leurs possibilités d'application à Montréal: rapport*. Service du Développement économique et urbain, Office de l'Habitation. Montréal. http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/plan_urbanisme_fr/media/documents/etude_nouvel_urbanisme.pdf
- Fisher, P. F., et Pathirana, S. (1993). The ordering of multitemporal fuzzy land-cover information derived from landsat MSS data. *Geocarto International*, 8(3), 5-14. <https://doi.org/10.1080/10106049309354415>
- Flouriot, J. (1995). études urbaines. In F. Dureau & C. Weber (Éd.), *et Système d'Information Urbain* (p. 219-240). Paris: Anthropos.
- Fontaine, J, et Flitti, M. (2010). L'évolution de la population du Sahara algérien de 1954 à 1998. In A.

- Bendjelid (Éd.), *Villes d'Algérie, formation, vie urbaine et aménagement* (p. 105-125). Oran: CRASC.
- Fontaine, Jacques. (2005). Infrastructures et oasis-relais migratoires au Sahara algérien. *Annales de Géographie*, 114(644), 437-448. <https://doi.org/10.3406/geo.2005.21256>
- Forel, F. A. (1892). *Le Léman: monographie limnologique* (Vol. 1). Whitefish: Kessinger Publishing (Ed. 2010). 562 p.
- Forman, R. T., et Forman, R. T. T. (1995). *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press. 217 p.
- Forman, R. T. T. (1981). Interaction among landscape elements: a core of landscape ecology. *Perspectives in landscape ecology*, 35-48.
- Forman, R. T. T., et Godron, M. (1986). *Landscape Ecology*. Wiley New York. 640 p.
- Forster, B. C. (1985). An examination of some problems and solutions in monitoring urban areas from satellite platforms. *International Journal of Remote Sensing*, 6(1), 139-151. <https://doi.org/10.1080/01431168508948430>
- Fournier, J. (2015). Géographie et écologie du paysage. In R. Mathevet & L. Godet (Éd.), *Pour une géographie de la conservation. Biodiversités, Natures & Sociétés* (L'Harmattan, p. 229-242). https://www.researchgate.net/publication/279970326_Geographie_et_ecologie_du_paysage
- Frankhauser, P. (2005). La morphologie des tissus urbains et périurbains à travers une lecture fractale. *Revue géographique de l'Est*, 45(3-4), 145-160. <http://journals.openedition.org/rge/268>
- Frankhauser, P., Houot, H., Tannier, C., et Vuidel, G. (2007). Approche fractale de l'urbanisation - Méthodes d'analyse d'accessibilité et simulations multi-échelles. *1th World Conference on Transportation Research - Septièmes rencontres francophones Est-Ouest de socio-économie des transports*, 21. Berkeley, Californie, États-Unis.
- Franklin, J. F. (1988). Structural and functional diversity in temperate forests. *Biodiversity. National Academy Press, Washington, DC*, 166-175.
- Frey, H. (2003). *Designing the city: towards a more sustainable urban form*. Taylor & Francis. 160 p.
- Furberg, D. (2014). Satellite Monitoring of Urban Growth and Indicator-based Assessment of Environmental Impact. Mémoire de Master en Environnement et Planification urbaine. KTH Royal Institute of Technology. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:770995/FULLTEXT01.pdf>
- Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M. R., Wolman, H., Coleman, S., et Freihage, J. (2001). Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and measuring an elusive concept. *Housing Policy Debate*, 12(4), 681-717. <https://doi.org/10.1080/10511482.2001.9521426>
- Gamba, P., et Dell'Acqua, F. (2016). *Change Detection in Urban Areas: Spatial and Temporal Scales BT - Multitemporal Remote Sensing: Methods and Applications* (Y. Ban, Éd.). https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_3
- Ganasri, B. P., Raju, A., et Dwarakish, G. S. (2013). Different Approaches for Land Use Land Cover Change Detection: A Review. *RRJET*, 2(3S). <https://www.researchgate.net/publication/282854976>
- Geist, H. (2006). Land cover changes. In G. Helmut (Éd.), *Our Earth's Changing Land: an encyclopedia of land-use and land-cover change* (p. 792). Greenwood Press.
- Geoghegan, J., Wainger, L. A., et Bockstael, N. E. (1997). Spatial landscape indices in a hedonic framework: an ecological economics analysis using GIS. *Ecological Economics*, 23(3), 251-264. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00583-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00583-1)
- Geurs, K. T., et van Wee, B. (2006). Ex-post Evaluation of Thirty Years of Compact Urban Development in the Netherlands. *Urban Studies*, 43(1), 139-160. <https://doi.org/10.1080/00420980500409318>
- Ghosh, A., Mishra, N. S., et Ghosh, S. (2011). Fuzzy clustering algorithms for unsupervised change detection in remote sensing images. *Information Sciences*, 181(4), 699-715. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ins.2010.10.016>

- Gillham, O. (2002). *The limitless city: a primer on the urban sprawl debate*. Washington: Island Press. 328 p.
- Gilpin, M., Hanski, I., et Gilpin, M. (1991). *Metapopulation dynamics: empirical and theoretical investigations*. London: London (UK) Academic Press. 340 p.
- Girard, M.-C., et Girard, C.-M. (2010). *Traitement des données de télédétection-2e éd.: Environnement et ressources naturelles*. Dunod. 576 p.
- Giri, C. P. (2012). *Remote Sensing of Land Use and Land Cover: Principles and Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Gobster, P. H., Nassauer, J. I., Daniel, T. C., et Fry, G. (2007). The shared landscape: what does aesthetics have to do with ecology? *Landscape Ecology*, 22(7), 959-972. <https://doi.org/10.1007/s10980-007-9110-x>
- Golledge, R. G. (1995). Primitives of Spatial Knowledge BT - Cognitive Aspects of Human-Computer Interaction for Geographic Information Systems. In T. L. Nyerges, D. M. Mark, R. Laurini, & M. J. Egenhofer (Éd.), *Cognitive aspects of human-computer interaction for Geographic Information Systems* (p. 29-44). https://doi.org/10.1007/978-94-011-0103-5_4
- Gong, C., Yu, S., Joesting, H., et Chen, J. (2013). Determining socioeconomic drivers of urban forest fragmentation with historical remote sensing images. *Landscape and Urban Planning*, 117, 57-65. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.04.009>
- Gong, P., Marceau, D. J., et Howarth, P. J. (1992). A comparison of spatial feature extraction algorithms for land-use classification with SPOT HRV data. *Remote Sensing of Environment*, 40(2), 137-151. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90011-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90011-8)
- Gong, P., Wang, J., Yu, L., Zhao, Y., Zhao, Y., Liang, L., ... Chen, J. (2013). Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7), 2607-2654. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.748992>
- Grafmeyer, Y., et Joseph, I. (1984). *L'école de Chicago. Naissance de l'écologie urbaine*. Aubier. 378 p.
- Griffiths, P., Linden, S. van der, Kuemmerle, T., et Hostert, P. (2013). A Pixel-Based Landsat Compositing Algorithm for Large Area Land Cover Mapping. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(5), 2088-2101. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2228167>
- Grivot, F., Bisson, J., et Rognon, P. (1978). Robert Capot-Rey (1897-1977): Trente ans de géographie saharienne. *Annales de géographie*, 87(479), 59-77. <https://doi.org/10.3406/geo.1978.17800>
- Grubler, A., Bai, X., Buettner, T., Dhakal, S., Fisk, D. J., Ichinose, T., ... Schulz, N. B. (2012). Urban energy systems. In GEA Writing Team (Éd.), *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future* (p. 1307-1400). <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/10067/>
- Guelton, S., et Navarre, F. (2010). Les coûts de l'étalement urbain : urbanisation et comptes publics locaux. *Flux*, 79-80(1-2), 34-53. <https://doi.org/10.3917/flux.079.0034>
- Guérois, M. (2003). *Les formes des villes européennes vues du ciel: une contribution de l'image CORINE à la comparaison morphologique des grandes villes d'Europe occidentale*. Thèse de doctorat en Géographie. (Paris 1). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00004303/document>
- Guo, G., Wu, Z., Xiao, R., Chen, Y., Liu, X., et Zhang, X. (2015). Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. *Landscape and Urban Planning*, 135, 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.007>
- Gupta, P., Christopher, S. A., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y., et Kumar, N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 40(30), 5880-5892. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.016>
- Gustafson, E. J. (1998). Quantifying Landscape Spatial Pattern: What Is the State of the Art? *Ecosystems*, 1(2), 143-156. <https://doi.org/10.1007/s100219900011>

- Haines-Young, R., Green, D. R., et Cousins, S. H. (2003). *Landscape ecology and geographical information systems*. London: CRC Press. 298 p.
- Halitim, A. (2011). L'aridoculture et le développement durable. *Algerian journal of arid environment*, 1(1), 3-9. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/6658>
- Halleux, J.-M. (2007). L'étalement urbain en Europe: un défi environnemental ignoré. *La Libre Belgique*, 35. <http://hdl.handle.net/2268/65001>
- Halleux, J.-M., Brück, L., et Mairy, N. (2002). La périurbanisation résidentielle en Belgique à la lumière des contextes suisse et danois: enracinement, dynamiques centrifuges et régulations collectives. *Belgeo. Revue belge de géographie*, (4), 333-354. <https://doi.org/https://doi.org/10.4000/belgeo.16086>
- Hamdi-Aissa, B., et Girard, M. C. (2004). Apport des données satellitales pour l'évaluation de l'impact sur l'environnement du risque salinisation dans l'écosystème désertique (cuvette de Ouargla, Algérie). *X^{ème} journée scientifique du réseau de télédétection de l'AUF, Géorisque et télédétection, Ottawa*, 177-180.
- Hamidi, S., et Ewing, R. (2014). A longitudinal study of changes in urban sprawl between 2000 and 2010 in the United States. *Landscape and Urban Planning*, 128, 72-82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.04.021>
- Hammache, S. (2015). Retour sur une expérience de terrain: les nouveaux pôles urbains à Ouargla. In : *Les mutations de la ville saharienne—Approches croisées sur le changement social et les pratiques urbaines*. Colloque. Univ. Ouargla.
- Han, L., Zhou, W., Li, W., et Li, L. (2014). Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities. *Environmental Pollution*, 194, 163-170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.022>
- Hanafi, A., et Alkama, D. (2017). Role of the urban vegetal in improving the thermal comfort of a public place of a contemporary Saharan city. *Energy Procedia*, 119, 139-152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.061>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., et Moore, R. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850-853.
- Hanski, I., et Gilpin, M. (1991). Metapopulation dynamics: brief history and conceptual domain. *Biological Journal of the Linnean Society*, 42(1-2), 3-16. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1991.tb00548.x>
- Harouadi, F., Mahmah, B., Belhamel, M., Chader, S., M'Raoui, A., et Etievant, C. (2007). Les potentialités d'exploitation d'hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro-maghrébin Partie I: Phase d'étude d'opportunité et de faisabilité. *Revue des Energies Renouvelables*, 10(2), 181-190. http://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v010_n2_resume_3.pdf
- Harris, L. D. (1985). *Conservation corridors: a highway system for wildlife* (ENFO 11, Éd.). Florida Conservation Foundation, Environmental Information Center. 10 p.
- Hassan, M. M. (2017). Monitoring land use/land cover change, urban growth dynamics and landscape pattern analysis in five fastest urbanized cities in Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 7, 69-83. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2017.07.001>
- Hegazy, I. R., et Kaloop, M. R. (2015). Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(1), 117-124. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2015.02.005>
- Herold, M., Couclelis, H., et Clarke, K. C. (2005). The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(4), 369-399. <https://doi.org/10.1016/J.COMPENVURBSYS.2003.12.001>
- Herold, M., Goldstein, N. C., et Clarke, K. C. (2003). The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 286-302. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00075-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00075-0)

- Herold, M., Roberts, D. A., Gardner, M. E., et Dennison, P. E. (2004). Spectrometry for urban area remote sensing—Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing of Environment*, 91(3), 304-319. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.013>
- Herold, M., Scepan, J., et 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. <https://doi.org/10.1068/a3496>
- Hoffhine Wilson, E., Hurd, J. D., Civco, D. L., Prisloe, M. P., Arnold, C., Wilson, E. H., ... Arnold, C. (2003). Development of a geospatial model to quantify, describe and map urban growth. *Remote sensing of environment*, 86(3), 275-285. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00074-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00074-9)
- Howard, E. (1898). *Garden city of tomorrow* (Traduction). Paris: Dunod, coll. Aspects de l'urbanisme. 125 p.
- Howarth, P. J., et Wickware, G. M. (1981). Procedures for change detection using Landsat digital data. *International Journal of Remote Sensing*, 2(3), 277-291. <https://doi.org/10.1080/01431168108948362>
- Huang, J., Lu, X. X. X., et Sellers, J. M. (2007). A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 82(4), 184-197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.010>
- Hubert-Moy, L. (2004). *Occupation du sol et télédétection: de l'inventaire à la modélisation prédictive*. Mémoire HDR. Université de Rennes 2.
- Hudson, W. E. (Ed. . (1991). *Landscape Linkages and Biodiversity: Defenders of Wildlife*. Island Press. 175 p.
- Hugerot, T., Astrade, L., Ployon, E., et Gauchon, C. (2017). Reconstituer les trajectoires paysagères par photo-interprétation semi-automatisée et télédétection : géohistoire d'un cône de déjection torrentiel en vallée de Maurienne (Savoie). *VertigO*, 17(2). <https://doi.org/10.4000/vertigo.18620>
- Huseynov, E. F. oglu. (2011). Planning of sustainable cities in view of green architecture. *Procedia Engineering*, 21, 534-542. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2048>
- Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., et Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80, 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006>
- Idder, T., Idder, A., Cheloufi, H., Benzida, A., Khemis, R., et Moguedet, G. (2013). La surexploitation des ressources hydriques au Sahara algérien et ses conséquences sur l'environnement. *TSM*, (5), 31-39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/tsm/201305031>
- Idder, Tahar, Idder, A., et Mensous, M. (2012). Chapitre 15. Les conséquences écologiques d'une gestion non raisonnée des eaux agricoles dans les oasis du Sahara algérien. In C. Aspe (Ed.), *De l'eau agricole à l'eau environnementale* (p. 209). <https://doi.org/10.3917/quae.aspe.2012.01.0209>
- Iddrisu, I., et Bhattacharyya, S. C. (2015). Sustainable Energy Development Index: A multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 513-530. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.032>
- IFEN. (2006). *Les territoires*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/environnement>
- Im, J., et Jensen, J. R. (2005). A change detection model based on neighborhood correlation image analysis and decision tree classification. *Remote Sensing of Environment*, 99(3), 326-340. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.09.008>
- Inkoom, J. N., Frank, S., Greve, K., Walz, U., et Fürst, C. (2018). Suitability of different landscape metrics for the assessments of patchy landscapes in West Africa. *Ecological Indicators*, 85, 117-127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.031>
- IPCC, C. C. (2014). Synthesis Report. Contribution of working groups I. In *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

- Ishii, S., Tabushi, S., Aramaki, T., et Hanaki, K. (2010). Impact of future urban form on the potential to reduce greenhouse gas emissions from residential, commercial and public buildings in Utsunomiya, Japan. *Energy Policy*, 38(9), 4888-4896. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.022>
- Issa, S. M., et Al Shuwaihi, A. (2011). Analysis of LULC changes and urban expansion of the resort city of Al Ain using remote sensing and GIS. *Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images (Multi-Temp)*, 2011 6th International Workshop on the, 245-248. IEEE.
- Jabareen, Y. R. (2006). Sustainable urban forms: Their typologies, models, and concepts. *Journal of planning education and research*, 26(1), 38-52.
- Jaeger, J., Schwarz-von Raumer, H.-G., Esswein, H., Müller, M., et Schmidt-Lüttmann, M. (2007). Time series of landscape fragmentation caused by transportation infrastructure and urban development: a case study from Baden-Württemberg, Germany. *Ecology and Society*, 12(1).
- Jaglin, S. (2010). Étalement urbain, faibles densités et « coûts » de développement. Introduction. *Flux*, 79-80(1-2), 6-15. <https://doi.org/10.3917/flux.079.0006>
- Jat, M. K., Garg, P. K., et Khare, D. (2008). Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10(1), 26-43. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2007.04.002>
- Jensen, J. R. (2000). Remote sensing of urban landscape. In J. R. Jensen (Éd.), *remote sensing of the environment: An earth resource perspective* (p. 406-470). New Jersey: Prentice Hall (1st Ed).
- Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: an Earth Resource Perspective*. New Jersey: Prentice Hall.
- Jensen, J. R., et Lulla, K. (1987). Introductory digital image processing: A remote sensing perspective. *Geocarto International*, 2(1), 65. <https://doi.org/10.1080/10106048709354084>
- Jensen, R., Gatrell, J., Boulton, J., et Harper, B. (2004). Using Remote Sensing and Geographic Information Systems to Study Urban Quality of Life and Urban Forest Amenities. *Ecology and Society*, 9(5).
- Jha, c. S., et Unni, N. V. M. (1994). Digital change detection of forest conversion of a dry tropical Indian forest region. *International Journal of Remote Sensing*, 15(13), 2543-2552. <https://doi.org/10.1080/01431169408954265>
- Ji, W., Ma, J., Twibell, R. W., et Underhill, K. (2006). Characterizing urban sprawl using multi-stage remote sensing images and landscape metrics. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(6), 861-879. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2005.09.002>
- Jokimäki, J., et Suhonen, J. (1993). Effects of urbanization on the breeding bird species richness in Finland: a biogeographical comparison. *Ornis Fennica*, 70, 71-77.
- Jones, R. (1996). *The New Urbanism: Hope or Hype for American Communities?* (Vol. 63). V2. University of Michigan Library. 36 p.
- Jouve, J., et Jouve, P. (2012). Les oasis du Maghreb, des agro-écosystèmes de plus en plus menacés. Comment renforcer leur durabilité? *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 62(62), 113-121. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01222196/>
- Kalyani, P., et Govindarajulu, P. (2013). A multi-scale urban analysis using remote sensing and GIS. *Geoinformatica: An International Journal (GIJ)*, 3(1), 373-379.
- Kane, K., Connors, J. P., et Galletti, C. S. (2014). Beyond fragmentation at the fringe: A path-dependent, high-resolution analysis of urban land cover in Phoenix, Arizona. *Applied Geography*, 52, 123-134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.05.002>
- Kareiva, P. (1990). Population dynamics in spatially complex environments: theory and data. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 330(1257), 175-190.
- Kassah, A. (1998). Eau et développement agricole au Sahara maghrébin : enjeux, conflits et arbitrages. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 9(2), 95-102.

- Kaza, N. (2013). The changing urban landscape of the continental United States. *Landscape and Urban Planning*, 110, 74-86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.10.015>
- Kenworthy, J., et Laube, F. (2001). *Millenium Cities Database for Sustainable Transport*. Rapport (UITP) <https://www.uitp.org/public-transport-sustainable-mobility>
- Kerle, N., Janssen, L. L. F., et Huurneman, G. C. (2004). Principles of remote sensing. In *ITC, Educational textbook series* (Vol. 2). 250 p.
- Khorram, S., van der Wiele, C. F., Koch, F. H., Nelson, S. A. C., et Potts, M. D. (2016a). Data Acquisition. In S. Khorram, C. F. van der Wiele, F. H. Koch, S. A. C. Nelson, & M. D. Potts (Éd.), *Principles of Applied Remote Sensing* (p. 21-67). https://doi.org/10.1007/978-3-319-22560-9_2
- Khorram, S., van der Wiele, C. F., Koch, F. H., Nelson, S. A. C., et Potts, M. D. (2016b). *Remote Sensing: Past and Present BT - Principles of Applied Remote Sensing* (S. Khorram, C. F. van der Wiele, F. H. Koch, S. A. C. Nelson, & M. D. Potts, Éd.). https://doi.org/10.1007/978-3-319-22560-9_1
- KIEFFER, E., et SERRADJ, A. (2013). La télédétection au service des études urbaines: expansion de la ville de Pondichéry entre 1973 et 2009. *Géomatique-Expert*, 12(2013), 95.
- Klein, I., Gessner, U., et Kuenzer, C. (2012). Regional Land Cover Mapping and Change Detection in Central Asia Using MODIS Time-Series. *Applied Geography*, 35(1-2), 219-234.
- Klemas, V. V. (2001). Remote Sensing of Landscape-Level Coastal Environmental Indicators. *Environmental Management*, 27(1), 47-57. <https://doi.org/10.1007/s002670010133>
- Kong, F., Yin, H., et Nakagoshi, N. (2007). Using GIS and landscape metrics in the hedonic price modeling of the amenity value of urban green space: A case study in Jinan City, China. *Landscape and Urban Planning*, 79(3), 240-252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.02.013>
- Kong, F., Yin, H., Nakagoshi, N., et James, P. (2012). Simulating urban growth processes incorporating a potential model with spatial metrics. *Ecological Indicators*, 20, 82-91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.02.003>
- Kouzmine, Yael. (2012). *Le Sahara algérien. Intégration nationale et développement régional*. Paris: L'Harmattan. 344 p.
- Kouzmine, Yaël, et Fontaine, J. (2018). Démographie et urbanisation au Sahara algérien à l'aube du XXI^e siècle. *Les Cahiers d'EMAM. Études sur le Monde Arabe et la Méditerranée*, (30). <https://doi.org/10.4000/emam.1426>
- Krummel, J. R., Gardner, R. H., Sugihara, G., O'Neill, R. V, et Coleman, P. R. (1987). Landscape Patterns in a Disturbed Environment. *Oikos*, 48(3), 321-324. <https://doi.org/10.2307/3565520>
- Kühn, M. (2003). Greenbelt and Green Heart: separating and integrating landscapes in European city regions. *Landscape and Urban Planning*, 64(1), 19-27. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00198-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00198-6)
- Kweon, B.-S., Ellis, C. D., Leiva, P. I., et Rogers, G. O. (2010). Landscape Components, Land Use, and Neighborhood Satisfaction. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(3), 500-517. <https://doi.org/10.1068/b35059>
- Kyttä, M., Broberg, A., Tzoulas, T., et Snabb, K. (2013). Towards contextually sensitive urban densification: Location-based softGIS knowledge revealing perceived residential environmental quality. *Landscape and Urban Planning*, 113, 30-46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.01.008>
- Lacoste, Y. (1986). Quelques réflexions sur les problèmes géopolitiques du Sahara. *Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée*, (41-42), 283-290. <https://doi.org/DOI:10.3406/remmm.1986.2463>
- Lacoste, Y. (1990). Oasis. In *Encyclopaedia Universalis*. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/oasis/>
- Lacoste, Y. (2011). Sahara, perspectives et illusions géopolitiques. *Hérodote*, 142(3), 12-41. <https://doi.org/10.3917/her.142.0012>
- Lagabrielle, E. (2003). *Télédétection des changements et SIG: application à l'étude de l'évolution des modes*

- d'occupation des sols à La Réunion entre 1989 et 2002*. Rapport. SILAT. 47 p.
- Landis, J. R., et Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Landis, J., et Zhang, M. (1998). The Second Generation of the California Urban Futures Model. Part 1: Model Logic and Theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25(5), 657-666. <https://doi.org/10.1068/b250657>
- Lausch, A., et Menz, G. (1999). Bedeutung der Integration linearer Elemente in Fernerkundungsdaten zur Berechnung von Landschaftstrukturmassen. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 185-194.
- Le Houérou, H.-N. (1990). Définition et limites bioclimatiques du Sahara. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 1(4), 246-259.
- Le Néchet, F. (2011). Consommation d'énergie et mobilité quotidienne selon la configuration des densités dans 34 villes européennes. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4000/cybergeo.23634>
- Lecomte, J. (1999). Réflexions sur la naturalité. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 37(37), 5-10.
- Leh, M., Bajwa, S., et Chaubey, I. (2013). Impact of land use change on erosion risk: an integrated remote sensing, Geographic Information System and modeling methodology. *Land Degradation & Development*, 24(5), 409-421. <https://doi.org/10.1002/ldr.1137>
- Leroux, L., Congedo, L., Bellón, B., Gaetano, R., et Bégue, A. (2018). Land Cover Mapping Using Sentinel-2 Images and the Semi-Automatic Classification Plugin: A Northern Burkina Faso Case Study. In N. Baghdadi, C. Mallet and M. Zribi (Éds). *QGIS and Applications in Agriculture and Forest* (p. 119-151). Wiley Online Books. <https://doi.org/10.1002/9781119457107.ch4>
- Levins, R. (1969). Some Demographic and Genetic Consequences of Environmental Heterogeneity for Biological Control. *Bulletin of the Entomological Society of America*, 15(3), 237-240. <https://doi.org/10.1093/besa/15.3.237>
- Lewis, P., Barcelo, M., Gill, D., et Larrivée, C. (2002). *Améliorer la mobilité en aménageant autrement: Examen du potentiel des mesures et stratégies pour améliorer la mobilité entre Montréal et la Rive-Sud*. Rapport d'étude. Montréal: Université de Montréal, Institut d'urbanisme.
- Lhomme, S. (2005). *Identification du bâti à partir d'images satellitaires à très hautes résolutions spatiales*. Thèse de doctorat en Géographie. Sherbrooke - Louis Pasteur I, Strasbourg.
- Lhomme, S., He, D.-C., et Morin, D. (2003). Evaluation de la qualité d'une image Ikonos pour l'extraction du bâti en milieu urbain. *Téledétection*, 3(5), 457-466.
- Li, F., Wang, R., Paulussen, J., et Liu, X. (2005). Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: a case study in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 72(4), 325-336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.04.002>
- Li, H., et Reynolds, J. F. (1995). On Definition and Quantification of Heterogeneity. *Oikos*, 73(2), 280-284. <https://doi.org/10.2307/3545921>
- Li, J., Song, C., Cao, L., Zhu, F., Meng, X., et Wu, J. (2011). Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3249-3263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.008>
- Li, X., et Yeh, A. G. O. (1998). Principal component analysis of stacked multi-temporal images for the monitoring of rapid urban expansion in the Pearl River Delta. *International Journal of Remote Sensing*, 19(8), 1501-1518. <https://doi.org/10.1080/014311698215315>
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., et Chipman, J. (2014). *Remote sensing and image interpretation* (6th Ed). John Wiley & Sons. 768 p.
- Liu, T., et Yang, X. (2015). Monitoring land changes in an urban area using satellite imagery, GIS and

- landscape metrics. *Applied Geography*, 56, 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.10.002>
- Liu, X., et Lathrop, R. G. (2002). Urban change detection based on an artificial neural network. *International Journal of Remote Sensing*, 23(12), 2513-2518. <https://doi.org/10.1080/01431160110097240>
- Long, N., et 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). <https://id.erudit.org/iderudit/1038189arCopiedAn>
- López Varela, S. (2013). El Green Belt Inglés: de la contención edilicia al valor del paisaje. V Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Buenos Aires, junio 2013, (pp1263-1279). Universitat Politècnica de Catalunya
- Longley, P. A. (2002). Geographical Information Systems: will developments in urban remote sensing and GIS lead to 'better' urban geography? *Progress in Human Geography*, 26(2), 231-239. <https://doi.org/10.1191/0309132502ph366pr>
- Longley, P. A., et Mesev, V. (2000). On the Measurement and Generalisation of Urban Form. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 32(3), 473-488. <https://doi.org/10.1068/a3224>
- Longley, P., Batty, M., Shepherd, J., et Sadler, G. (1992). Do Green Belts Change the Shape of Urban Areas? A Preliminary Analysis of the Settlement Geography of South East England. *Regional Studies*, 26(5), 437-452. <https://doi.org/10.1080/00343409212331347101>
- Lord, J. M., et Norton, D. A. (1990). Scale and the Spatial Concept of Fragmentation. *Conservation Biology*, 4(2), 197-202. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1990.tb00109.x>
- Loukaitou-Sideris, A. (1995). Urban Form and Social Context: Cultural Differentiation in the Uses of Urban Parks. *Journal of Planning Education and Research*, 14(2), 89-102. <https://doi.org/10.1177/0739456X9501400202>
- Lu, D, Mausel, P., Brondízio, E., et Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365-2401. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
- Lu, Dengsheng, et Weng, Q. (2004). Spectral mixture analysis of the urban landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(9), 1053-1062. <https://doi.org/https://doi.org/10.14358/PERS.70.9.1053>
- Lu, Dengsheng, et Weng, Q. (2006). Use of impervious surface in urban land-use classification. *Remote Sensing of Environment*, 102(1), 146-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.010>
- Lu, Dengsheng, et Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823-870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
- Ludeke, A. K., Maggio, R. C., et Reid, L. M. (1990). An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regression and GIS. *Journal of Environmental Management*, 31(3), 247-259. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(05\)80038-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-4797(05)80038-6)
- Ludwig, J., Tongway, D., Hodgkinson, K., Freudenberger, D., et Noble, J. (1996). *Landscape ecology, function and management: principles from Australia's rangelands*. Csiro Publishing. 168 p.
- Lunetta, R. S., Knight, J. F., Ediriwickrema, J., Lyon, J. G., et Worthy, L. D. (2006). Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 105(2), 142-154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.018>
- Lussault, M., et Lévy, J. (2013). *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Paris: Belin. 1033 p.
- MacArthur, R. H., et Wilson, E. O. (1967). *The theory of Island biogeography*. Princeton: PUP. 203 p.
- Machault, V., Vignolles, C., Pagès, F., Gadiaga, L., Tourre, Y. M., Gaye, A., ... Rogier, C. (2012). Risk Mapping of *Anopheles gambiae* s.l. Densities Using Remotely-Sensed Environmental and Meteorological Data in an Urban Area: Dakar, Senegal. *PLOS ONE*, 7(11), e50674.

- Macleod, R. D., et Congalton, R. G. (1998). A quantitative comparison of change-detection algorithms for monitoring eelgrass from remotely sensed data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 64(3), 207-216.
- Maignant, G. (2005). Compacité et forme urbaine, une analyse environnementale dans la perspective d'un développement urbain durable. *Actes du colloque Développement urbain durable, gestion des ressources et gouvernance*. Université de Lausanne.
- Malila, W. A. (1980). Change vector analysis: an approach for detecting forest changes with Landsat. *LARS symposia*, 326-335.
- Malkinson, D., Kopel, D., et Wittenberg, L. (2018). From rural-urban gradients to patch – matrix frameworks: Plant diversity patterns in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 169, 260-268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.021>
- Mandelbrot, B. B. (1983). *The fractal geometry of nature* (Vol. 173). WH freeman New York. 495 p.
- Marshall, A. (2000). *How cities work: Suburbs, sprawl, and the roads not taken*. University of Texas Press. 269 p.
- Martel, A. (1968). Pour une histoire du Sahara français. *Revue française d'histoire d'outre-mer*, 55(200), 335-351. <https://doi.org/https://doi.org/10.3406/outre.1968.1467>
- Maruani, T., et Amit-Cohen, I. (2007). Open space planning models: A review of approaches and methods. *Landscape and Urban Planning*, 81(1), 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.01.003>
- Mas, J. F. (2000). Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(4), 349-362. <https://doi.org/10.1080/07038992.2000.10874785>
- Mas, J. F., et Flores, J. J. (2008). The application of artificial neural networks to the analysis of remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(3), 617-663. <https://doi.org/10.1080/01431160701352154>
- Mashagbah, A. Al, Al-Adamat, R., et Al-Amoush, H. (2012). GIS and Remote Sensing to Investigate Urban Growth in Mafraq City/Jordan Between 1987 and 2010. *Journal of Geographic Information System*, 4(August), 377-382. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.44043>
- Matagne, P., et Beauvais, J.-F. (1999). Le concept de corridor vert et le développement durable au Costa Rica. *Annales de géographie*, 108(605) 5-20. <https://doi.org/10.3406/geo.1999.21765>
- Mather, P., et Tso, B. (2016). *Classification methods for remotely sensed data* (2nd éd.). Boca Raton: CRC press. 376 p.
- Mcdonnell, M. (2011). The history of urban ecology: an ecologist perspective. *Urban ecology: Patterns, processes and applications*, 9, 5-13.
- McGarigal, K., Cushman, S. A., et Ene, E. (2012). FRAGSTATS v4: spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps. *Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst*. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- McGarigal, K., et McComb, W. C. (1995). Relationships Between Landscape Structure and Breeding Birds in the Oregon Coast Range. *Ecological Monographs*, 65(3), 235-260. <https://doi.org/10.2307/2937059>
- McKinney, M. L. (2008). Effects of urbanization on species richness: A review of plants and animals. *Urban Ecosystems*, 11(2), 161-176. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0045-4>
- Meijers, E. (2005). Polycentric Urban Regions and the Quest for Synergy: Is a Network of Cities More than the Sum of the Parts? *Urban Studies*, 42(4), 765-781. <https://doi.org/10.1080/00420980500060384>
- Mennour, S., et Guessoum, D. (2018). Des Brarek à l'habitat spontané, un paysage parlant des conflits: cas d'Annaba. *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre*, (48), 145-154.
- Merriam, G. (1984). Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern. *Methodology*

- in landscape ecological research and planning: proceedings, 1st seminar, International Association of Landscape Ecology, Roskilde, Denmark, Oct 15-19, 1984/eds.*
- Michishita, R., Jiang, Z., et Xu, B. (2012). Monitoring two decades of urbanization in the Poyang Lake area, China through spectral unmixing. *Remote Sensing of Environment*, 117, 3-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.021>
- Mignot, D., et Aguilera, A. (2004). Concentration et ségrégation, dynamiques et inscriptions territoriales : bilan et perspectives. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, décembre(5), 645-651. <https://doi.org/10.3917/reru.045.0645>
- Miller, A. B., Bryant, E. S., et Birnie, R. W. (1998). An analysis of land cover changes in the Northern Forest of New England using multitemporal Landsat MSS data. *International Journal of Remote Sensing*, 19(2), 245-265. <https://doi.org/10.1080/014311698216233>
- Miller, R. B., et Small, C. (2003). Cities from space: potential applications of remote sensing in urban environmental research and policy. *Environmental Science & Policy*, 6(2), 129-137. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(03\)00002-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1462-9011(03)00002-9)
- Milles, R. (2013). *Impact de l'urbanisation et des migrations internes sur le vieillissement spatial en Algérie*. [https://iussp.org/sites/default/files/event_call_for_papers/Publication finale Busan PDF .pdf](https://iussp.org/sites/default/files/event_call_for_papers/Publication%20finale%20Busan%20PDF.pdf)
- Millward, H. (2006). Urban containment strategies: A case-study appraisal of plans and policies in Japanese, British, and Canadian cities. *Land Use Policy*, 23(4), 473-485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2005.02.004>
- Mitchell, D. (2000). *Cultural geography: A critical introduction*. Wiley-Blackwell. 352 p.
- Moeller, M. S., et Möller, M. (2008). Remote Sensing for the monitoring of urban growth patterns. *world, 1975, 2000*.
- Monod, T. (1992). Du désert. *Sécheresse*. 3(1) 7-41. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6555625>
- Mosammam, H. M., Nia, J. T., Khani, H., Teymouri, A., et Kazemi, M. (2017). Monitoring land use change and measuring urban sprawl based on its spatial forms. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(1), 103-116. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.08.002>
- Moulinié, C., et Naudin-Adam, M. (2005). Appréhender la densité, Formes urbaines et densités. In *Note rapide sur l'occupation du sol (fiche n° 383)*. https://www.institutparisregion.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_251/nr_383_Apprehender_la_densite_2.pdf
- Mumford, L. (1964). *La cité a travers l'histoire: (traduit par Guy et Gerard Gurand)*. Paris: Le Seuil. 783 p
- Munafò, M., et Congedo, L. (2017). Measuring and monitoring land cover. In C. Gardi (Éd.), *Urban Expansion, Land Cover and Soil Ecosystem Services; Routledge: Abingdon, UK* (p. 19). London: Routledge.
- NASA. (2011). *Science Data Users Handbook*. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf
- Nath, S. S., Mishra, G., Kar, J., Chakraborty, S., et Dey, N. (2014). A survey of image classification methods and techniques. *Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), 2014 International Conference on*, 554-557. IEEE.
- Nations, U. (2018). *The World's Cities in 2018—Data Booklet*. https://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf
- Neel, M. C., McGarigal, K., et Cushman, S. A. (2004). Behavior of class-level landscape metrics across gradients of class aggregation and area. *Landscape ecology*, 19(4), 435-455. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/B:LAND.0000030521.19856.cb>
- Newell, J. P., Seymour, M., Yee, T., Renteria, J., Longcore, T., Wolch, J. R., et Shishkovsky, A. (2013). Green Alley Programs: Planning for a sustainable urban infrastructure? *Cities*, 31, 144-155.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.07.004>
- Newman, P. G., et Kenworthy, J. R. (1989). *Cities and automobile dependence: An international sourcebook*. Aldershot Gower Technical. 388 p.
- Noor, N. M., et Rosni, N. A. (2013). Determination of Spatial Factors in Measuring Urban Sprawl in Kuantan Using Remote Sensing and GIS. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 85, 502-512. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2013.08.379>
- Noss, R.F., et Csuti, B. (1997). Habitat fragmentation. In G. K. M. and R. C. Carroll (Éd.), *Principles of conservation biology* (2th ed, p. 269-304). Sinauer Associates, Inc., Sunderland.
- Noss, Reed F. (1990). Indicators for Monitoring Biodiversity: A Hierarchical Approach. *Conservation Biology*, 4(4), 355-364. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1990.tb00309.x>
- Nuvolati, G. (2009). *Quality of Life in Cities: A Question of Mobility and Accessibility BT - Quality of Life and the Millennium Challenge: Advances in Quality-of-Life Studies, Theory and Research* (V. Møller & D. Huschka, Éd.). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8569-7_12
- O'Neill, D. (1999). *Smart growth: Myth and fact*. Washington: Urban Land Institute. 22 p.
- O'Neill, R. V., Krummel, J. R., Gardner, R. H., Sugihara, G., Jackson, B., DeAngelis, D. L., ... Graham, R. L. (1988). Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1(3), 153-162. <https://doi.org/10.1007/BF00162741>
- O'Neill, Robert V, Deangelis, D. L., Waide, J. B., Allen, T. F. H., et Allen, G. E. (1986). *A hierarchical concept of ecosystems*. Princeton University Press. 262 p.
- ODT. (2017). *Développement de l'urbanisation et coûts des infrastructures*. Rapport ODT (Office Fédéral Du Développement Territorial). <https://www.are.admin.ch/are/fr/home/media-et-publications/publications/bases/infrastrukturkosten-unterschiedlicher-siedlungstypen.html>
- Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2265-2300. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.001>
- ONS. (2011). L'armature urbaine RGPH 2008: les principaux résultats de l'exploitation exhaustive. In *Collections Statistiques n° 163: série S*. Alger: Office National des Statistiques. 220 p.
- Orum, A. ., et Jenks, M. (2019). Compact City. In A. . Orum (Éd.), *The Wiley Blackwell Encyclopedia of Urban and Regional Studies* (p. 1-4). <https://doi.org/doi:10.1002/9781118568446.eurs0530>
- Osmond, P., et Pelleri, N. (2017). Urban Ecology as an Interdisciplinary Area. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 31-42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10173-3>
- Otmane, T., et Kouzmine, Y. (2011). Timimoun, évolution et enjeux actuels d'une oasis saharienne algérienne. *Insaniyat / 183 - 165* ,(52-51) , *إنسانيات* , <https://doi.org/10.4000/insaniyat.12686>
- 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(140), 175-193. <https://doi.org/https://doi.org/10.7202/014083ar>
- Ouerdani, H. (1993). L'usage des images satellitaires en géographie : apports et limites. *Théo Quant*, 29-36. <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/pdf/1993/TQ1993%20ARTICLE%202.pdf>
- Ould Baba Sy, M. (2005). *Recharge Et Paleorecharge Du Systeme Aquifere Du Sahara Septentrional*. Thèse de doctorat en Géologie. Université de Tunis.
- Owens, S. E. (1992). Land-use planning for energy efficiency. *Applied Energy*, 43(1), 81-114. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0306-2619\(92\)90075-M](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0306-2619(92)90075-M)
- Ozenda, P. (1991). *Flore du Sahara. (3 ème édition)*. Paris: CNRS. 662 p.
- Paolini, L., Grings, F., Sobrino, J. A., Jiménez Muñoz, J. C., et Karszenbaum, H. (2006). Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies. *International Journal of Remote Sensing*, 27(4), 685-704. <https://doi.org/10.1080/01431160500183057>

- Park, R., Burgess, E. ., et McKenzie, R. . (1925). *The city*. Chicago: University of Chicago Press (Ed: 1984). 239 p.
- Parker, D., Evans, T., et Meretsky, V. (2001). Measuring Emergent Properties of Agent-Based Landcover/Landuse Models using Spatial Metrics. *Seventh annual conference of the International Society for Computational Economics*.
- Patino, J. E., et Duque, J. C. (2013). A review of regional science applications of satellite remote sensing in urban settings. *Computers, Environment and Urban Systems*, 37, 1-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2012.06.003>
- Patterson, P. K., et Chapman, N. J. (2004). Urban Form and Older Residents' Service Use, Walking, Driving, Quality of Life, and Neighborhood Satisfaction. *American Journal of Health Promotion*, 19(1), 45-52. <https://doi.org/10.4278/0890-1171-19.1.45>
- Pauleit, S., et Duhme, F. (2000). Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 52(1), 1-20. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00109-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00109-2)
- Paulet, J.-P. (2009). *Géographie urbaine*. Armand colin. 119 p.
- Peng, J., Xie, P., Liu, Y., et Ma, J. (2016). Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sensing of Environment*, 173, 145-155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.027>
- Pereboom, V. (2006). *Mode d'utilisation du milieu fragmenté par une espèce forestière aux habitudes discrètes, la martre des pins martes*. Thèse de doctorant en en Biologie des organismes. Univ. Angers.
- Pesaresi, M., et Bianchin, A. (2003). Recognizing settlement structure using mathematical morphology and image texture. In J. . Donnay, M. . Barnsley, & P. . Longley (Éd.), *Remote sensing and urban analysis: GISDATA* (Vol. 9, p. 46-60). CRC press.
- Pham, H. M., Yamaguchi, Y., et Bui, T. Q. (2011). A case study on the relation between city planning and urban growth using remote sensing and spatial metrics. *Landscape and Urban Planning*, 100(3), 223-230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.12.009>
- Phiri, D., et Morgenroth, J. (2017). Developments in Landsat Land Cover Classification Methods: A Review. *Remote Sensing*, 9(9), 967. <https://doi.org/10.3390/rs9090967>
- Pickett, S. T. A., et Cadenasso, M. L. (2008). Linking Ecological and Built Components of Urban Mosaics: An Open Cycle of Ecological Design. *Journal of Ecology*, 96(1), 8-12. <http://www.jstor.org/stable/20143435>
- Pinchemel, P. (1999). Etudier la face de la Terre. *Historiens et Géographes*, (367), 59-72.
- Pinjanowski, B. C., Long, D. T., Gage, S. H., et Cooper, W. E. (1997). A land transformation model: Conceptual elements, spatial objects class hierarchies, GIS command syntax and an application for Michigan's Saginaw Bay watershed. *Land Use Modeling Workshop, USGS EROS Data Center, Sioux Falls, South Dakota, USA*.
- Pinson, J. ., Boucher, C., et Demathieu, P. (1987). La saisie de l'information géographique. *La Jaune et la Rouge : l'Information Géographique*, (426), 39-45.
- Pons, F.-X. (1997). Le Sahara et ses frontières étatiques: géopolitique et enjeux. *L'Information Géographique*, 61(4), 154-159. <https://doi.org/10.3406/ingeo.1997.5822>
- Pouyanne, G. (2004). Des avantages comparatifs de la ville compacte à l'interaction mobilité-forme urbaine. Méthodologie et premiers résultats. *Cahiers scientifiques du transport*, 45(1), 49-82.
- Pouyanne, G. (2006). Etalement urbain et Ségrégation socio-spatiale. Une revue de la littérature. *Cahier du GRES N° 07*. 1-13.
- Pouyanne, G. (2007). Note de recherche. Une estimation du lien entre forme urbaine et choix modal. Le cas de six aires urbaines françaises. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, octobre(3), 521-541.

- <https://doi.org/10.3917/reru.073.0521>
- Powell, R. L., Roberts, D. A., Dennison, P. E., et Hess, L. L. (2007). Sub-pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 106(2), 253-267. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.005>
- Prakash, A., et Gupta, R. P. (1998). Land-use mapping and change detection in a coal mining area - a case study in the Jharia coalfield, India. *International Journal of Remote Sensing*, 19(3), 391-410. <https://doi.org/10.1080/014311698216053>
- Pratt, B., et Chang, H. (2012). Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales. *Journal of Hazardous Materials*, 209-210, 48-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.068>
- Provencher, L., et Dubois, J.-M. M. (2007). *Précis de télédétection, volume 4 : Méthodes de photointerprétation et d'interprétation d'image*. PUQ. 540 p.
- Puissant, A. (2003). *Information Géographique et Images à Très Haute Résolution Utilité et Applications en Milieu Urbain*. Thèse de doctorat en Géographie. Université Louis Pasteur - Strasbourg I.
- Pulliam, H. R. (1988). Sources, Sinks, and Population Regulation. *The American Naturalist*, 132(5), 652-661. <https://doi.org/10.1086/284880>
- Quarmby, N. A., et Cushnie, J. L. (1989). Monitoring urban land cover changes at the urban fringe from SPOT HRV imagery in south-east England. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 953-963. <https://doi.org/10.1080/01431168908903937>
- RADDO (Réseau Associatif de Développement Durable des Oasis). (2001). *En vie d'Oasis*. RADDO. 14p.
- Rahman, M. T. (2016). Detection of Land Use/Land Cover Changes and Urban Sprawl in Al-Khobar, Saudi Arabia: An Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(15), 17. <https://doi.org/doi:10.3390/ijgi5020015>
- Rajendran, P., et Mani, K. (2015). Quantifying the Dynamics of Landscape Patterns in Thiruvananthapuram Corporation Using Open Source GIS Tools. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, 5(10), 77-87.
- Rapoport, A. (2016). *Human aspects of urban form: towards a man—environment approach to urban form and design*. Pergamon Press (1st Ed: 1977). 448 p.
- Rashed, T., Weeks, J., Couclelis, H., et Herold, M. (2007). An integrative GIS and remote sensing model for place-based urban vulnerability analysis. *Integration of GIS and remote sensing*. Wiley, Chichester, 199-224.
- Rashed, T., Weeks, J. R., Roberts, D., Rogan, J., et Powell, R. (2003). Measuring the Physical Composition of Urban Morphology Using Multiple Endmember Spectral Mixture Models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(9), 1011-1020. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.9.1011>
- Reid, R. S., Kruska, R. L., et Muthui, N. (2000). Land-Use and Land-Cover Dynamics in Response to Changes in Climatic, Biological and Socio-political Forces: The Case of Southwestern Ethiopia. *Landscape Ecology*, 15(4), 339-355.
- Revenga, C. (2005). Developing indicators of ecosystem condition using geographic information systems and remote sensing. *Regional Environmental Change*, 5(4), 205-214. <https://doi.org/10.1007/s10113-004-0085-8>
- Ribeiro, D., Bailey, T., Drehobl, A., King, J., Samarripas, S., Shoemaker, M., ... Berg, W. (2017). *The 2017 City Energy Efficiency Scorecard*. Rapport ACEEE. <https://www.aceee.org/research-report/u1705>
- Richards, J. A., et Jia, X. (2006). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction* (4th éd.). Berlin, Germany: Springer. 439 p.
- Ridd, M. K. (1995). Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities†. *International Journal of Remote*

- Sensing*, 16(12), 2165-2185. <https://doi.org/10.1080/01431169508954549>
- Ridd, M. K., et Liu, J. (1998). A Comparison of Four Algorithms for Change Detection in an Urban Environment. *Remote Sensing of Environment*, 63(2), 95-100. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00112-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00112-0)
- Riou, C. (1990). Bioclimatologie des oasis. In *Les Systemes Agricoles Oasiens: Vol. no. 11* (p. 207-220). Montpellier: CIHEAM.
- Risser, P. G., R, K. J., et Forman, R. T. T. (1984). *Landscape ecology: Directions and approaches* (I. N. H. Survey, Éd.). 18 p.
- Robbins, C. S., Dawson, D. K., et Dowell, B. A. (1989). Habitat Area Requirements of Breeding Forest Birds of the Middle Atlantic States. *Wildlife Monographs*, (103), 3-34. <http://www.jstor.org/stable/3830692>
- Rode, P., Floater, G., Thomopoulos, N., Docherty, J., Schwinger, P., Mahendra, A., et Fang, W. (2017). Accessibility in Cities: Transport and Urban Form BT. In: G. Meyer & S. Shaheen (Éd.). *isrupting Mobility. Lecture Notes in Mobility*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51602-8_15
- Rolland, G. (1890). Rapport hydrologique, statistique et météorologique. In M. Choisy (Éd.), *Chemin de fer transsaharien – Documents relatifs à la Mission dirigée au Sud de l'Algérie par M.A. Choisy* (p. 1-455).
- Rongbo, X., Wu, Z., Qingming, Z., Peijun, D. U., Ji, M., Zequn, G., ... Yue, W. (2015). *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*. Wiley-Blackwell. 408 p.
- Roux, M. (1991). Sahara: Géographie de l'imaginaire. *Mappemonde*, (02), 8-11. <https://www.mgm.fr/PUB/Mappemonde/M291/Sahara.pdf>
- Roux, M. (1993). *Sahara : géographie de l'imaginaire*. Thèse de doctorat en Géographie. Univ. de Besançon.
- Rutledge, D. T. (2003). *Landscape indices as measures of the effects of fragmentation: can pattern reflect process?* Department of Conservation. Wellington. 26 p.
- Saint-Laurent, D. (2000). Approches biogéographiques de la nature en ville : parcs, espaces verts et friches. *Cahiers de géographie du Québec*, 44(122), 147-166. <https://doi.org/https://doi.org/10.7202/022900ar>
- Sattler, T., Duelli, P., Obrist, M. K., Arlettaz, R., et Moretti, M. (2010). Response of arthropod species richness and functional groups to urban habitat structure and management. *Landscape Ecology*, 25(6), 941-954. <https://doi.org/10.1007/s10980-010-9473-2>
- Savard, J.-P. L., Clergeau, P., et Mennechez, G. (2000). Biodiversity concepts and urban ecosystems. *Landscape and Urban Planning*, 48(3), 131-142. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00037-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00037-2)
- Schneider, A., et Woodcock, C. E. (2008). Compact, Dispersed, Fragmented, Extensive? A Comparison of Urban Growth in Twenty-five Global Cities using Remotely Sensed Data, Pattern Metrics and Census Information. *Urban Studies*, 45(3), 659-692. <https://doi.org/10.1177/0042098007087340>
- Schwanen, T., Dijst, M., et Dieleman, F. M. (2004). Policies for urban form and their impact on travel: the Netherlands experience. *Urban studies*, 41(3), 579-603. <https://doi.org/https://doi/abs/10.1080/0042098042000178690>
- Schwarz, N. (2010). Urban form revisited—Selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and Urban Planning*, 96(1), 29-47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.01.007>
- Sénécal, G., Hamel, P., et Vachon, N. (2005). Forme urbaine, qualité de vie, environnements naturels et construits : éléments de réflexion et test de mesure pour la région métropolitaine de Montréal. *Cahiers de géographie du Québec*, 49(136), 19-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.7202/012107ar>
- Senoussi, A. (1999). *Gestion de l'espace saharien en Algérie : symbiose ou confrontation entre systèmes productifs en milieu agricole et pastoral ?* Thèse de doctorat en Géographie. U.T.M. Toulouse II.
- Seto, K. C., et Fragkias, M. (2005). Quantifying Spatiotemporal Patterns of Urban Land-use Change in Four Cities of China with Time Series Landscape Metrics. *Landscape Ecology*, 20(7), 871-888.

- <https://doi.org/10.1007/s10980-005-5238-8>
- Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., et Reilly, M. K. (2011). A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. *PLOS ONE*, 6(8), e23777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023777>
- Seto, K. C., Güneralp, B., et Hutyrá, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083-16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Sezgin, M., et Sankur, B. (2004). Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1), 13-20. <https://doi.org/10.1117/1.1631315>
- Shannon, C. E., et Weaver, W. (1964). *The Mathematical Theory of Communication* (Univ. Illinois Press, Éd.). 146 p.
- Shrestha, M. K., York, A. M., Boone, C. G., et Zhang, S. (2012). Land fragmentation due to rapid urbanization in the Phoenix Metropolitan Area: Analyzing the spatiotemporal patterns and drivers. *Applied Geography*, 32(2), 522-531. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.04.004>
- Simard, M. (2014). Étalement urbain, empreinte écologique et ville durable. Y a-t-il une solution de rechange à la densification? *Cahiers de géographie du Québec*, 58(165), 331-352. <https://doi.org/https://doi.org/10.7202/1033008ar>
- Singh, A. (1989). Digital Change Detection Techniques Using RemotelySensed Data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989-1003. <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>
- Skupinski, G., BinhTran, D., et Weber, C. (2009). Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain—Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.21995>
- Slonecker, E. T., Jennings, D. B., et Garofalo, D. (2001). Remote sensing of impervious surfaces: A review. *Remote Sensing Reviews*, 20(3), 227-255. <https://doi.org/10.1080/02757250109532436>
- Small, C. (2001). Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 22(7), 1305-1334. <https://doi.org/10.1080/01431160151144369>
- Small, Christopher. (2003). High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 88(1), 170-186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.008>
- SmartGrowth. (2015). What is Smart Growth? SmartGrowth web page, visitée le 31 mars 2020. <http://smartgrowth.org/what-is-smart-growth/>
- Smeets, E., et Weterings, R. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview (Technical Report no. 25)*. European Environment Agency website: http://www.geogr.uni-jena.de/fileadmin/Geoinformatik/projekte/brahmatwinn/Workshops/FEEM/Indicators/EEA_tech_rep_25_Env_Ind.pdf
- Smith, D. S. (1993). An overview of greenways: their history, ecological context, and specific functions. In D. S. Smith (Éd.), *Ecology of greenways* (p. 1-22). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Smits, P. C., et Annoni, A. (1999). Towards operational knowledge-based remote-sensing image analysis. *Pattern Recognition Letters*, 20(11), 1415-1422. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8655\(99\)00115-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-8655(99)00115-4)
- Sobrino, J. A., Oltra-Carrió, R., Sòria, G., Bianchi, R., et Paganini, M. (2012). Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects. *Remote Sensing of Environment*, 117, 50-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.042>
- Sohl, T. L. (1999). Change analysis in the United Arab Emirates: An investigation of techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(4), 475-484.
- Soulé, M. E. (1991). Land Use Planning and Wildlife Maintenance: Guidelines for Conserving Wildlife in an Urban Landscape. *Journal of the American Planning Association*, 57(3), 313-323. <https://doi.org/10.1080/01944369108975502>

- Stemmers, K. (2003). Energy and the city: density, buildings and transport. *Energy and Buildings*, 35(1), 3-14. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00075-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00075-0)
- Sudhira, H. S., Ramachandra, T. V., et Jagadish, K. S. (2004). Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(1), 29-39. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2003.08.002>
- Sudhira, H. S., et Ramachandra, T. V. (2007). Characterising urban sprawl from remote sensing data and using landscape metrics. *The 10th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*, 11-13. <http://eprints.iisc.ac.in/id/eprint/11834>
- Sun, C., Wu, Z., Lv, Z., Yao, N., et Wei, J. (2013). Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 409-417. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.12.012>
- Sun, Y., Zhao, S., et Qu, W. (2015). Quantifying spatiotemporal patterns of urban expansion in three capital cities in Northeast China over the past three decades using satellite data sets. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3901-6>
- Tailor, A., Cross, A., Hogg, D. C., et Mason, D. C. (1986). Knowledge-based interpretation of remotely sensed images. *Image and Vision Computing*, 4(2), 67-83. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(86\)90026-0](https://doi.org/10.1016/0262-8856(86)90026-0)
- Tannier, C. (2009). Formes de villes optimales, formes de villes durables. Réflexions à partir de l'étude de la ville fractale. *Espaces et sociétés*, 138(3), 153-171. <https://doi.org/10.3917/esp.138.0153>
- Tannier, C. (2017). *Analyse et simulation de la concentration et de la dispersion des implantations humaines de l'échelle micro-locale à l'échelle régionale-Modèles multi-échelles et trans-échelles*. Thèse de doctorat en Géographie. Université Bourgogne Franche-Comté. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01668615/>
- Tannier, C., Vuidel, G., Houot, H., et Frankhauser, P. (2012). Spatial Accessibility to Amenities in Fractal and Nonfractal Urban Patterns. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 39(5), 801-819. <https://doi.org/10.1068/b37132>
- Tatem, A. J., et Hay, S. I. (2004). Measuring urbanization pattern and extent for malaria research: A review of remote sensing approaches. *Journal of Urban Health*, 81(3), 363-376. <https://doi.org/10.1093/jurban/jth124>
- Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., et Merriam, G. (1993). Connectivity Is a Vital Element of Landscape Structure. *Oikos*, 68(3), 571-573. <https://doi.org/10.2307/3544927>
- Temple, S. A. (1986). Predicting impacts of habitat fragmentation on forest birds: A comparison of two models. In J. Verner, M. L. Morrison, & C. J. Ralph (Éd.), *Wildlife 2000: Modeling habitat relationships of terrestrial vertebrates* (p. 301-304). Madison: Univ. of Wisconsin Press.
- Theobald, D. M. (2005). Landscape Patterns of Exurban Growth in the USA from 1980 to 2020. *Ecology and Society*, 10(1). <http://www.jstor.org/stable/26267722>
- Thériault, M., Sparfel, L., Gourmelon, F., et Le Berre, I. (2011). Modélisation des changements d'occupation et d'utilisation du sol. Cadres formels et exemple d'application. *Revue internationale de géomatique*, 21(3), 267-295. <https://doi.org/10.3166/ri.15.267-295>
- Tong, X., Zhang, X., et Liu, M. (2010). Detection of urban sprawl using a genetic algorithm-evolved artificial neural network classification in remote sensing: a case study in Jiading and Putuo districts of Shanghai, China. *International Journal of Remote Sensing*, 31(6), 1485-1504. <https://doi.org/10.1080/01431160903475290>
- Toutain, G. (1979). *Éléments d'agronomie saharienne. De la recherche au développement*. Paris: I.N.R.A. 277 p.
- Tress, B., et Tress, G. (2001). Capitalising on multiplicity: a transdisciplinary systems approach to landscape research. *Landscape and Urban Planning*, 57(3), 143-157.

- [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00200-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00200-6)
- Tribillon, J.-F. (2002). *L'urbanisme. La découverte* (2ed). 128 p.
- Troin, J.-F., Bisson, V., Bisson, J., Brûlé, J.-C., Escallier, R., Fontaine, J., ... Troin, F. (2006). *Le Grand Maghreb*. Paris: Armand Colin. 384 p.
- Tucker, C. J., Grant, D. M., et Dykstra, J. D. (2004). NASA's global orthorectified Landsat data set. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3), 313-322. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.3.313>
- Turner, Monica G. (1990). Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landscape Ecology*, 4(1), 21-30. <https://doi.org/10.1007/BF02573948>
- Turner, Monica G, et Gardner, R. H. (1991). *Quantitative methods in landscape ecology the analysis and interpretation of landscape heterogeneity*. New York: Springer-Verlag. 536 p.
- Turner, Monica G, et Gardner, R. H. (2015a). *Introduction to Landscape Ecology and Scale BT - Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process* (Monica G Turner & R. H. Gardner, Éd.). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2794-4_1
- Turner, Monica G, et Gardner, R. H. (2015b). *Landscape Metrics BT - Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process* (Monica G Turner & R. H. Gardner, Éd.). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2794-4_4
- Turner, Monica G, O'Neill, R. V, Gardner, R. H., et Milne, B. T. (1989). Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 3(3), 153-162. <https://doi.org/10.1007/BF00131534>
- UITP. (2015). *Mobility in cities database. Synthesis report*. International Association of Public Transport. https://www.uitp.org/sites/default/files/MCD_2015_synthesis_web_0.pdf
- UN-Habitat. (2016). *World Cities Report 2016: Urbanization and Development - Emerging Futures*. UN-Habitat (ONU). <https://unhabitat.org/fr/node/117428>
- UNEP/RIVM. (1994). *An overview of environmental indicators: state of the art and perspectives*. Nairobi: UNEP/Earthprint. 94 p.
- Urban, D. L., O'Neill, R. V, et Shugart Jr, H. H. (1987). A hierarchical perspective can help scientists understand spatial patterns. *BioScience*, 37(2).
- Uuemaa, E., Mander, Ü., et Marja, R. (2013). Trends in the use of landscape spatial metrics as landscape indicators: A review. *Ecological Indicators*, 28, 100-106. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.07.018>
- Vadelorge, L. (2005). *Éléments pour une histoire des villes nouvelles: actes du séminaire Temporalités et représentations des villes nouvelles: programme d'histoire et d'évaluation des villes nouvelles*. Editions Le Manuscrit (Collection Savoir). 332 p.
- van der Sande, C. J., de Jong, S. M., et de Roo, A. P. J. (2003). A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(3), 217-229. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(03\)00003-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0303-2434(03)00003-5)
- Van Rij, E. (H. E. .), et Korthals Altes, W. K. (2008). The Merits of Outmoded Planning Instruments for Improving Metropolitan Green Areas: The Midden-Delfland Approach. *Planning Theory & Practice*, 9(3), 345-362. <https://doi.org/10.1080/14649350802277829>
- Vernochet, J.-M. (1985). Enjeux sahariens. *Politique étrangère*, (2), 514-515. http://www.persee.fr/doc/polit_0032-342x_1985_num_50_2_3477_t1_0514_0000_3
- Vink, A. P. A. (1983). *Landscape ecology and land use*. Longman Inc. 272 p.
- Vivier, J., et Pourbaix, J. (2006). *Mobility in Cities Database, Better Mobility for People Worldwide, Analysis and Recommendations*. Rapport. International Association of Public Transport (UITP) <https://mylibrary.uitp.org/KENTIKA-19205149124910233219-MOBILITY-IN-CITIES->

DATABASE.-A.htm

- Voogt, J. A., et Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Walker, R., Moran, E., et Anselin, L. (2000). Deforestation and Cattle Ranching in the Brazilian Amazon: External Capital and Household Processes. *World Development*, 28(4), 683-699.
- Wallhagen, M., Glaumann, M., Eriksson, O., et Westerberg, U. (2013). Framework for Detailed Comparison of Building Environmental Assessment Tools. *Buildings*, Vol. 3. <https://doi.org/10.3390/buildings3010039>
- Wang, D., Chai, Y., et Li, F. (2011). Built environment diversities and activity-travel behaviour variations in Beijing, China. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1173-1186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.03.008>
- Wania, A., Kühn, I., et Klotz, S. (2006). Plant richness patterns in agricultural and urban landscapes in Central Germany—spatial gradients of species richness. *Landscape and Urban Planning*, 75(1), 97-110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.12.006>
- Weber, C. (1995). *Images satellitaires et milieu urbain*. Paris: Hemès. 185 p.
- Weber, C. (2003). Urban agglomeration delimitation using remote sensing data. *Remote sensing and urban analysis: GISDATA*, 9, 131-146.
- Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 335-344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007>
- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34-49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030>
- Weng, Q., Liu, H., et Lu, D. (2007). Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in city of Indianapolis, United States. *Urban Ecosystems*, 10(2), 203-219. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0020-0>
- Weng, Q., Quattrochi, D. A., et Carlson, T. N. (2012). Remote sensing of urban environments: Special issue. *Remote Sensing of Environment*, 117, 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.005>
- Weng, Q., et Yang, S. (2006). Urban Air Pollution Patterns, Land Use, and Thermal Landscape: An Examination of the Linkage Using GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117(1), 463-489. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-0888-9>
- Weng, Y.-C. (2007). Spatiotemporal changes of landscape pattern in response to urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 81(4), 341-353. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.01.009>
- Wentz, E. A., York, A. M., Alberti, M., Conrow, L., Fischer, H., Inostroza, L., ... Taubenböck, H. (2018). Six fundamental aspects for conceptualizing multidimensional urban form: A spatial mapping perspective. *Landscape and Urban Planning*, 179, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.07.007>
- Whitehand, J. W. R. (1988). Urban fringe belts: Development of an idea. *Planning Perspectives*, 3(1), 47-58. <https://doi.org/10.1080/02665438808725651>
- Whitehand, J. W. R., et Morton, N. J. (2003). Fringe Belts and the Recycling of Urban Land: An Academic Concept and Planning Practice. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30(6), 819-839. <https://doi.org/10.1068/b12997>
- Whitford, V., Ennos, A. R., et Handley, J. F. (2001). "City form and natural process"—indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 57(2), 91-103. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00192-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00192-X)
- Wieczorek, D. (1981). *Camillo Sitte et les débuts de l'urbanisme moderne* (Vol. 16). Editions Mardaga. 222 p.

- Wiens, J. A., Schooley, R. L., et Weeks, R. D. (1997). Patchy Landscapes and Animal Movements: Do Beetles Percolate? *Oikos*, 78(2), 257-264. <https://doi.org/10.2307/3546292>
- Wilson, E. H., et Sader, S. A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 385-396. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00318-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00318-2)
- Wilson, J., Clay, M., Martin, E., Stuckey, D., et Vedder-Risch, K. (2003). Evaluating Environmental Influences of Zoning in Urban Ecosystems with Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, 86, 303-321. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00084-1)
- Woodcock, C. E., Allen, R., Anderson, M., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W., ... Helmer, E. (2008). Free access to Landsat imagery. *Science*, 320(5879), 1011.
- Wu, J. (2008). Making the Case for Landscape Ecology: An Effective Approach to Urban Sustainability. *Landscape Journal*, 27(1), 41-50. <https://doi.org/10.3368/lj.27.1.41>
- Wu, J. (2010). Urban sustainability: an inevitable goal of landscape research. *Landscape Ecology*, 25(1), 1-4. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9444-7>
- Wu, J. (2013a). Key concepts and research topics in landscape ecology revisited: 30 years after the Allerton Park workshop. In *Landscape Ecology* (Vol. 28). <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9836-y>
- Wu, J. (2013b). Landscape Ecology. In *Ecological Systems* (p. 179-200). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5755-8_11
- Wu, J. (2014). Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 125, 209-221. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2014.01.018>
- Wu, J. (Jingle). (2006). Landscape Ecology, Cross-disciplinarity, and Sustainability Science. *Landscape Ecology*, 21(1), 1-4. <https://doi.org/10.1007/s10980-006-7195-2>
- Wu, J., et Hobbs, R. (2007). Landscape ecology: the state-of-the-science. In J. Wu & R. J. Hobbs (Éd.), *Key Topics in Landscape Ecology* (p. 271-287). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511618581.016>
- Wu, J., Jelinski, D. E., Luck, M., et Tueller, P. T. (2000). Multiscale Analysis of Landscape Heterogeneity: Scale Variance and Pattern Metrics. *Geographic Information Sciences*, 6(1), 6-19. <https://doi.org/10.1080/10824000009480529>
- Yang, X. (2011). What is Urban Remote Sensing? In X. Yang (Éd.), *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*, Volume 250 (p. 3-11). <https://doi.org/doi:10.1002/9780470979563.ch1>
- Yang, Y. (2008). A Tale of Two Cities: Physical Form and Neighborhood Satisfaction in Metropolitan Portland and Charlotte. *Journal of the American Planning Association*, 74(3), 307-323. <https://doi.org/10.1080/01944360802215546>
- Yavuz Kumlu, K. B., et Tüdeş, Ş. (2018). Effect of Physical Urban Environment on Sustainable Urban Development BT - Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017). In S. Firat, J. Kinuthia, & A. Abu-Tair (Éd.), *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017)* (p. 501-512). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-63709-9_40
- Ye, L., Cheng, Z., Wang, Q., Lin, W., et Ren, F. (2013). Overview on Green Building Label in China. *Renewable Energy*, 53, 220-229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.022>
- Yeh, C.-T., et Huang, S.-L. (2009). Investigating spatiotemporal patterns of landscape diversity in response to urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 93(3), 151-162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.07.002>
- Yin, Z.-Y., Walcott, S., Kaplan, B., Cao, J., Lin, W., Chen, M., ... Ning, Y. (2005). An analysis of the relationship between spatial patterns of water quality and urban development in Shanghai, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(2), 197-221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2003.10.001>

- Yousseoufi, S. (2011). *Satisfaction résidentielle et configurations spatiales en milieu périurbain* Thèse de doctorat en géographie. Université de Franche-Comté. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00903526/>
- Yuan, F., et Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(3), 375-386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>
- Yuan, F., Sawaya, K. E., Loeffelholz, B. C., et Bauer, M. E. (2005). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote sensing of Environment*, 98(2), 317-328.
- Yusof, N., Zainul Abidin, N., Zailani, S. H. M., Govindan, K., et Iranmanesh, M. (2016). Linking the environmental practice of construction firms and the environmental behaviour of practitioners in construction projects. *Journal of Cleaner Production*, 121, 64-71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.090>
- Zak, M. R., Cabido, M., Cáceres, D., et Díaz, S. (2008). What Drives Accelerated Land Cover Change in Central Argentina? Synergistic Consequences of Climatic, Socioeconomic, and Technological Factors. *Environmental Management*, 42(2), 181-189.
- Zeng, C., Zhang, M., Cui, J., et He, S. (2015). Monitoring and modeling urban expansion—A spatially explicit and multi-scale perspective. *Cities*, 43, 92-103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2014.11.009>
- Zhang, Z., Su, S., Xiao, R., Jiang, D., et Wu, J. (2013). Identifying determinants of urban growth from a multi-scale perspective: A case study of the urban agglomeration around Hangzhou Bay, China. *Applied Geography*, 45, 193-202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.09.013>
- Zhao, J., Lin, L., Yang, K., Liu, Q., et Qian, G. (2015). Influences of land use on water quality in a reticular river network area: A case study in Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 137, 20-29. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.12.010>
- Zhu, Z. (2017). Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 370-384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>
- Zhu, Z., et Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152-171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>
- Zipperer, W. C., Wu, J., Pouyat, R. V, et Pickett, S. T. A. (2000). The application of ecological principles to urban and urbanizing landscapes. *Ecological Applications*, 10(3), 685-688. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0685:TAOEPT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0685:TAOEPT]2.0.CO;2)

Webographie

www.future.org

www.Climate-data.org

www.zubak.sk

www.naturevivante.org

www.earthexplorer.usgs.gov

www.diva-gis.org

www.un.org/development/desa

www.data.worldbank.org/indicator

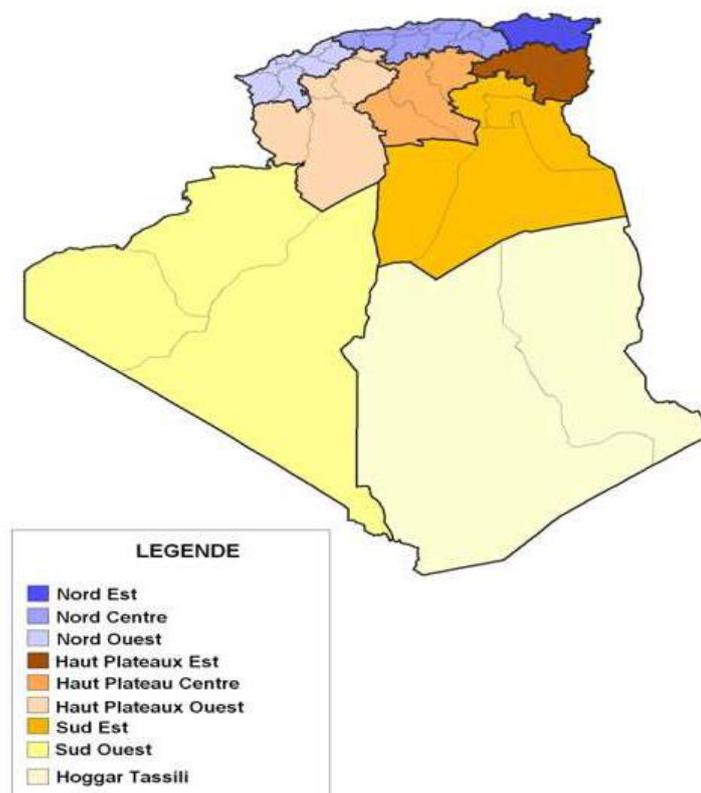
GLOSSAIRE

- ACP** : Analyse en Composantes Principales
- CES** : Coefficient d'Emprise du Sol
- COS** : Coefficient d'Occupation de Sol
- DC** : Détection du Changement
- DOS** : Dark Object Subtraction
- DPAT** : Direction de Planification et d'Aménagement du Territoire
- ETM** : Enhanced Thematic Mapper
- HR** : Haute Résolution
- INCT** : Institut national de la cartographie et de la télédétection
- INSEE** : Institut national des statistiques et des études économiques
- OLI-TIRS** : Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor
- PDEAU** : Plan directeur d'aménagement et d'urbanisme
- PNUD** : Programme des Nations Unies pour le Développement
- POS** : plan d'occupation au sol
- SIG** : Système d'Information Géographique
- THR** : Très Haute Résolution
- TM** : Thematic Mapper
- TOA** : Top Of Atmospheric
- UOS** : Utilisation et Occupation du Sol
- USGS** : United States Geological Survey
- ZEA** : Zone d'extension et d'activité
- ZEF** : Zone d'extension future
- ZHUN** : Zone d'habitat urbain nouvelle

Annexes

Annexe 1 : Poids démographique du Bas-Sahara algérien par rapport aux autres espaces de programmation territoriale

Les 9 régions de programmation territoriale (ONS, 2011)

Évolution de la population algérienne selon les régions programmes (1977 – 2008)
(ONS, 2011)

| Espaces de programmation Territoriale | Superficies % | Population en Millions d'hab. | | | | Structure de la population | | | |
|---------------------------------------|---------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 1977 | 1987 | 1998 | 2008 | 1977 | 1987 | 1998 | 2008 |
| Nord Centre | 1,49 | 5,93 | 7,7 | 9,42 | 10,7 | 35,4 | 33,4 | 32,3 | 31,4 |
| Nord Est | 1,33 | 2,71 | 3,64 | 4,55 | 5,18 | 16,2 | 15,8 | 15,7 | 15,2 |
| Nord Ouest | 1,5 | 2,91 | 4 | 4,85 | 5,63 | 17,4 | 17,4 | 16,7 | 16,5 |
| NORD | 4,32 | 11,55 | 15,34 | 18,82 | 21,51 | 69 | 66,6 | 64,7 | 63,1 |
| Hauts Plateaux Centre | 4,63 | 0,9 | 1,31 | 1,92 | 2,54 | 5,4 | 5,7 | 6,6 | 7,4 |
| Hauts Plateaux Est | 2,25 | 2,09 | 3,24 | 4,23 | 4,9 | 12,5 | 14 | 14,5 | 14,4 |
| Hauts Plateaux Ouest | 5,85 | 0,92 | 1,31 | 1,57 | 1,89 | 5,5 | 5,7 | 5,4 | 5,6 |
| HAUTS PLAUTEAUX | 12,73 | 3,91 | 5,86 | 7,72 | 9,33 | 23,4 | 25,4 | 26,5 | 27,4 |
| Sud Est | 15,69 | 0,95 | 1,31 | 1,83 | 2,29 | 5,7 | 5,7 | 6,3 | 6,7 |
| Sud Ouest | 31,95 | 0,27 | 0,42 | 0,56 | 0,72 | 1,6 | 1,8 | 1,9 | 2,1 |
| Hoggar-Tassili | 35,32 | 0,05 | 0,11 | 0,17 | 0,23 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
| SUD | 82,95 | 1,27 | 1,84 | 2,56 | 3,24 | 7,6 | 8 | 8,8 | 9,5 |
| TOTAL | 100 | 16,73 | 23,04 | 29,1 | 34,08 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Annexe 2 : Rapports descriptifs de la comparaison post-classification des villes de Biskra, Ouargla et Touggourt

LUCC Biskra (1985 – 2000) :

| Fichier Edition Format Affichage ? | | | | |
|------------------------------------|----------------|----------|----------|--|
| LUCC_Biskra_85_2000 | | | | |
| ChangeCode | ReferenceClass | NewClass | PixelSum | |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 4755 | |
| 2 | 1.0 | 2.0 | 92 | |
| 3 | 1.0 | 3.0 | 17 | |
| 4 | 1.0 | 4.0 | 563 | |
| 5 | 2.0 | 1.0 | 1341 | |
| 6 | 2.0 | 2.0 | 3000 | |
| 7 | 2.0 | 3.0 | 0 | |
| 8 | 2.0 | 4.0 | 2716 | |
| 9 | 3.0 | 1.0 | 25 | |
| 10 | 3.0 | 2.0 | 10 | |
| 11 | 3.0 | 3.0 | 2454 | |
| 12 | 3.0 | 4.0 | 261 | |
| 13 | 4.0 | 1.0 | 8097 | |
| 14 | 4.0 | 2.0 | 387 | |
| 15 | 4.0 | 3.0 | 5017 | |
| 16 | 4.0 | 4.0 | 61745 | |

LUCC Biskra (2000 – 2015) :

| Fichier Edition Format Affichage ? | | | | |
|------------------------------------|----------------|----------|----------|--|
| LUCC_Biskra_2000_2015 | | | | |
| ChangeCode | ReferenceClass | NewClass | PixelSum | |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 13713 | |
| 2 | 1.0 | 2.0 | 164 | |
| 3 | 1.0 | 3.0 | 32 | |
| 4 | 1.0 | 4.0 | 309 | |
| 5 | 2.0 | 1.0 | 1095 | |
| 6 | 2.0 | 2.0 | 1878 | |
| 7 | 2.0 | 3.0 | 17 | |
| 8 | 2.0 | 4.0 | 499 | |
| 9 | 3.0 | 1.0 | 542 | |
| 10 | 3.0 | 2.0 | 18 | |
| 11 | 3.0 | 3.0 | 5403 | |
| 12 | 3.0 | 4.0 | 1525 | |
| 13 | 4.0 | 1.0 | 14350 | |
| 14 | 4.0 | 2.0 | 621 | |
| 15 | 4.0 | 3.0 | 3286 | |
| 16 | 4.0 | 4.0 | 47028 | |

LUCC Biskra (1985 – 2015) :

| Fichier Edition Format Affichage ? | | | | |
|------------------------------------|----------------|----------|----------|--|
| LUCC_Biskra_85_2015 | | | | |
| ChangeCode | ReferenceClass | NewClass | PixelSum | |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 5133 | |
| 2 | 1.0 | 2.0 | 33 | |
| 3 | 1.0 | 3.0 | 0 | |
| 4 | 1.0 | 4.0 | 261 | |
| 5 | 2.0 | 1.0 | 3358 | |
| 6 | 2.0 | 2.0 | 2329 | |
| 7 | 2.0 | 3.0 | 3 | |
| 8 | 2.0 | 4.0 | 1367 | |
| 9 | 3.0 | 1.0 | 253 | |
| 10 | 3.0 | 2.0 | 13 | |
| 11 | 3.0 | 3.0 | 2131 | |
| 12 | 3.0 | 4.0 | 353 | |
| 13 | 4.0 | 1.0 | 20956 | |
| 14 | 4.0 | 2.0 | 306 | |
| 15 | 4.0 | 3.0 | 6604 | |
| 16 | 4.0 | 4.0 | 47380 | |

LUCO Ouargla (1985 – 2000) :

| Fichier Edition Format Affichage ? | | | |
|------------------------------------|----------------|----------|----------|
| LUCO_ouargla_1985_2000 | | | |
| ChangeCode | ReferenceClass | NewClass | PixelSum |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 9738 |
| 2 | 1.0 | 2.0 | 254 |
| 3 | 1.0 | 3.0 | 966 |
| 4 | 2.0 | 1.0 | 3621 |
| 5 | 2.0 | 2.0 | 23403 |
| 6 | 2.0 | 3.0 | 3894 |
| 7 | 3.0 | 1.0 | 6884 |
| 8 | 3.0 | 2.0 | 3029 |
| 9 | 3.0 | 3.0 | 114291 |

LUCO Ouargla (2000 – 2015) :

| Fichier Edition Format Affichage ? | | | |
|------------------------------------|----------------|----------|----------|
| LUCO_ouargla_2000_2015 | | | |
| ChangeCode | ReferenceClass | NewClass | PixelSum |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 19339 |
| 2 | 1.0 | 2.0 | 425 |
| 3 | 1.0 | 3.0 | 479 |
| 4 | 1.0 | 6.0 | 0 |
| 5 | 2.0 | 1.0 | 4077 |
| 6 | 2.0 | 2.0 | 20228 |
| 7 | 2.0 | 3.0 | 2378 |
| 8 | 2.0 | 6.0 | 3 |
| 9 | 3.0 | 1.0 | 15896 |
| 10 | 3.0 | 2.0 | 2040 |
| 11 | 3.0 | 3.0 | 100553 |
| 12 | 3.0 | 6.0 | 662 |

LUCO Ouargla (1985 – 2015) :

| Fichier Edition Format Affichage ? | | | |
|------------------------------------|----------------|----------|----------|
| LUCO_Touggourt_1985_2015 | | | |
| ChangeCode | ReferenceClass | NewClass | PixelSum |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 9494 |
| 2 | 1.0 | 2.0 | 31 |
| 3 | 1.0 | 3.0 | 371 |
| 4 | 2.0 | 1.0 | 2192 |
| 5 | 2.0 | 2.0 | 24574 |
| 6 | 2.0 | 3.0 | 3236 |
| 7 | 3.0 | 1.0 | 11585 |
| 8 | 3.0 | 2.0 | 4134 |
| 9 | 3.0 | 3.0 | 71090 |

LUCC Touggourt (1985 – 2000) :

| Fichier | Edition | Format | Affichage | ? |
|--------------------------|----------------|----------|-----------|---|
| LUCC_Touggourt_1985_2000 | | | | |
| ChangeCode | ReferenceClass | NewClass | PixelSum | |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 9475 | |
| 2 | 1.0 | 2.0 | 99 | |
| 3 | 1.0 | 3.0 | 322 | |
| 4 | 2.0 | 1.0 | 1301 | |
| 5 | 2.0 | 2.0 | 24390 | |
| 6 | 2.0 | 3.0 | 4311 | |
| 7 | 3.0 | 1.0 | 6320 | |
| 8 | 3.0 | 2.0 | 3148 | |
| 9 | 3.0 | 3.0 | 77341 | |

LUCC Touggourt (2000 – 2015) :

| Fichier | Edition | Format | Affichage | ? |
|--------------------------|----------------|----------|-----------|---|
| LUCC_Touggourt_2000_2015 | | | | |
| ChangeCode | ReferenceClass | NewClass | PixelSum | |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 16387 | |
| 2 | 1.0 | 2.0 | 52 | |
| 3 | 1.0 | 3.0 | 657 | |
| 4 | 2.0 | 1.0 | 875 | |
| 5 | 2.0 | 2.0 | 25627 | |
| 6 | 2.0 | 3.0 | 1135 | |
| 7 | 3.0 | 1.0 | 6009 | |
| 8 | 3.0 | 2.0 | 3060 | |
| 9 | 3.0 | 3.0 | 72905 | |

LUCC Touggourt (1985 – 2015) :

| Fichier | Edition | Format | Affichage | ? |
|--------------------------|----------------|----------|-----------|---|
| LUCC_Touggourt_1985_2015 | | | | |
| ChangeCode | ReferenceClass | NewClass | PixelSum | |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 9494 | |
| 2 | 1.0 | 2.0 | 31 | |
| 3 | 1.0 | 3.0 | 371 | |
| 4 | 2.0 | 1.0 | 2192 | |
| 5 | 2.0 | 2.0 | 24574 | |
| 6 | 2.0 | 3.0 | 3236 | |
| 7 | 3.0 | 1.0 | 11585 | |
| 8 | 3.0 | 2.0 | 4134 | |
| 9 | 3.0 | 3.0 | 71090 | |

Résumé

L'étalement urbain constitue actuellement un des problèmes majeurs que confrontent les oasis du Bas-Sahara algérien. Le suivi et la compréhension des transformations spatiales et paysagères qu'il a engendrées ainsi que l'évaluation de ses conséquences sur les écosystèmes oasiens constituent une étape clé pour toute démarche de soutenabilité oasienne. La présente étude consiste à mettre en évidence les différentes formes de croissance spatiale des grandes villes du Bas-Sahara algérien durant ces trois dernières décennies. En faisant recours aux approches issues de l'écologie du paysage urbain, notre méthodologie est principalement basée sur l'exploitation de l'imagerie satellitale avec l'application de la détection du changement et les métriques paysagères. Les résultats de la comparaison post-classification des scènes Landsat multidates ont révélé un important étalement des surfaces bâties avec des rythmes plus accélérés pendant la période (2000 - 2015), contre un recul excessif des palmeraies, qui est plus accentué pendant la période (1985 - 2000). Le calcul des métriques paysagères a révélé deux tendances nettement opposées. Une croissance continue des surfaces bâties qui tend davantage vers une compaction morphologique des taches urbaines, contre une fragmentation progressive des palmeraies. Ainsi, ce travail de recherche a montré l'utilité de la télédétection spatiale dans le suivi de l'étalement incontrôlé des zones urbaines, et l'importance des approches adoptées en écologie du paysage urbain pour la mesure et l'évaluation de ces impacts, notamment quand il s'agit des milieux fragiles comme ceux des milieux oasiens.

Mots clés : étalement urbain, soutenabilité urbaine, Bas-Sahara, ville oasienne, télédétection spatiale, écosystème.

Abstract

Nowadays, urban sprawl is one of the major problems facing the Algerian Low-Sahara oases. Monitoring and understanding its spatial and landscape transformations, and the assessment of its consequences on oasis ecosystems, remain a key step in any oasis sustainability approach. The present study consists of highlighting different spatial growth of the biggest Algerian Low-Sahara cities during these last three decades. Through urban landscape ecology approach, our methodology is mainly based on the use of remote sensing data, by the application of Change Detection technic and landscape metrics. The comparison post-classification of multitudes Landsat scenes has revealed a significant growth of built-up areas, with more accelerated rates during the period (2000 - 2015), against an excessive decline in palm groves, which is more accentuated during the period (1985 - 2000). The results of landscape metrics calculation have shown two distinctly opposite trends. A continual growth of built-up areas which tends more towards a morphological compaction of urban patches, against a progressive fragmentation of palm groves. Thus, this research has shown the importance of remote sensing in monitoring of uncontrolled urban sprawl, and the utility of adopted approaches of urban landscape ecology for measuring and assessment of its impacts, particularly in fragile environments like those of oases.

Key words: urban sprawl, urban sustainability, Low-Sahara, oasis town, remote sensing, ecosystem.

ملخص

يشكل التمدد الحضري أحد أهم المشاكل التي تواجه حاليا واحات الصحراء المنخفضة الجزائرية. فمراقبة وفهم التحولات المجالية والمشهدية التي افرزها هذا النمط التوسعي، وكذلك تقييم تأثيراته على الأنظمة البيئية الواحاتية، تعتبر مرحلة مفتاحية في أي مشروع استدامة واحاتية. تهدف هذه الدراسة إلى تسليط الضوء على أشكال التوسع العمراني لكبريات مدن الصحراء المنخفضة الجزائرية خلال العشريتين الثلاث الأخيرة. منهجية الدراسة الحالية، وبالرجوع إلى المقاربات البيئية للمشاهد الحضرية، تعتمد أساسا على استغلال التصوير الساتلي مع تطبيق تقنيات استشعار التغير وكذلك حساب المؤشرات المشهدية. نتائج المقارنة ما بعد التصنيفية لصور لاندسات متعددة التواريخ أظهرت توسعا واسع النطاق للمساحات المبنية مع تسارع أكثر خلال الفترة (2000 - 2015)، مقابل تدهور حاد للواحات والتي كانت أكثر حدة خلال الفترة (1985 - 2000). حساب المؤشرات المشهدية أفضى إلى استظهار وبشكل جلي لمنحنيين متعاكسين: نمو متواصل للأنسجة المبنية والتي تتجه أكثر نحو التماسك المورفولوجي للرقعة الحضرية، مقابل تجزئة تدريجية للواحات. هذا البحث يبين أيضا أهمية الإستشعار عن بعد في متابعة التوسع الغير متحكم فيه للمساحات العمرانية وكذلك أهمية المقاربات البيئية للمشاهد الحضرية من أجل قياس وتقييم تأثيراته خاصة في البيئات الهشة مثل تلك التي تتعلق بالواحات.

الكلمات المفتاحية: التمدد العمراني، استدامة حضرية، الصحراء المنخفضة، مدينة واحاتية، استشعار عن بعد، نظام بيئي.