Métropolisations, Territoires émergents et Systèmes géographiques d'information et de modélisation territoriale

Sébastien Gadal

▶ **To cite this version:**

Sébastien Gadal. Métropolisations, Territoires émergents et Systèmes géographiques d'information et de modélisation territoriale. Géographie. Université Paris Diderot Paris 7; Institut d'études doctorales, 2011. tel-01742446

HAL Id: tel-01742446
https://amu.hal.science/tel-01742446

Submitted on 24 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS DIDEROT PARIS 7

Institut des études doctorales

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Sébastien GADAL

Volume 1 :

METROPOLISATIONS, TERRITOIRES EMERGENTS ET SYSTEMES GEOGRAPHIQUES D'INFORMATION ET DE MODELISATION TERRITORIALE

Présentée le 8 décembre 2011

JURY

Madame Christiane WEBER, Directeur de recherche CNRS, ERL 7230 LIVE, Présidente du jury.

Monsieur Philippe CADENE, Professeur des universités, Université Paris Diderot Paris 7, Rapporteur interne.

Madame Catherine MERING, Professeur des universités, Université Paris Diderot Paris 7, Examinatrice.

Monsieur Thierry SAINT-GERAND, Professeur des universités, Université de Caen Basse-Normandie, Rapporteur externe.

Monsieur Sid-Ahmed SOUIAH, Professeur des universités, Université de Cergy-Pontoise, Examinateur.

Madame Christine VOIRON, Professeur des universités, Université de Nice Sophia Antipolis, Rapporteur externe.

UNIVERSITE PARIS DIDEROT PARIS 7

Institut des études doctorales

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Sébastien GADAL

Volume 1 :

METROPOLISATIONS, TERRITOIRES EMERGENTS ET SYSTEMES GEOGRAPHIQUES D'INFORMATION ET DE MODELISATION TERRITORIALE

Présentée le 8 décembre 2011

JURY

Madame Christiane WEBER, Directeur de recherche CNRS, ERL 7230 LIVE, Présidente du jury.

Monsieur Philippe CADENE, Professeur des universités, Université Paris Diderot Paris 7, Rapporteur interne.

Madame Catherine MERING, Professeur des universités, Université Paris Diderot Paris 7, Examinatrice.

Monsieur Thierry SAINT-GERAND, Professeur des universités, Université de Caen Basse-Normandie, Rapporteur externe.

Monsieur Sid-Ahmed SOUIAH, Professeur des universités, Université de Cergy-Pontoise, Examinateur.

Madame Christine VOIRON, Professeur des universités, Université de Nice Sophia Antipolis, Rapporteur externe.

REMERCIEMENTS

Ce premier volume du mémoire d'habilitation à diriger des recherches présente la problématique d'étude, la métropolisation et sa mesure par télédétection, son positionnement dans les sciences géographiques et les enjeux sociétaux qui en découlent. Dans ce travail sont exposées les démarches et les méthodes géomatiques développées qui façonnent la manière d'étudier les processus de métropolisation sur les territoires du sous-développement (Afrique de l'ouest, Mauritanie, Sénégal, Gambie, Cap-Vert), en émergence (Inde du Nord-Ouest) ou en transition (Pays baltes, Lituanie).

Les dix années passées depuis la fin du doctorat de géographie ont été l'occasion d'élargir le champ des problématiques de recherche à la géomatique, plus particulièrement aux Systèmes d'informations géographiques, à l'analyse et à la modélisation spatiale, et à la représentation dynamique 2D-3D des résultats. En géographie urbaine et du développement, les recherches se sont ouvertes à d'autres terrains d'étude géoculturels, politiques et environnementaux, sur une même problématique : l'émergence des territoires métropolisés, introduisant de fait le rôle de la mondialisation, les permanences et les différences des processus de métropolisation et leurs impacts sur l'organisation territoriale, la société et l'environnement.

Focalisé sur les problématiques de télédétection, de traitement de données et d'analyse des territoires maghrébins et du Monde arabe, les sept dernières années ont été l'occasion de m'ouvrir aux sciences de l'ingénierie territoriale, l'aménagement, l'urbanisme et l'environnement, à l'économie spatiale mais également et surtout de contribuer modestement aux avancées de la géographie avec mes collègues français, baltes, indiens, italiens, scandinaves, africains, nord-américains et russes.

Ce volume présente une synthèse problématisée et contextualisée d'une partie des avancées, des problèmes, des choix, des résultats et réflexions, des apports et des limites, des futurs possibles ou en développement. Ils sont complétés, présentés et contextualisés dans le second volume, le parcours scientifique et universitaire, montrant une autre facette des recherches menées, donnant un autre éclairage de son insertion dans la vie scientifique et universitaire.

Comme pour le second volume, je voudrais tout d'abord remercier mon tuteur, le Professeur Philippe Cadène ainsi que le Professeur Catherine Mering pour leur soutien constant. Sans oublier les étudiants et les collègues pour les nombreuses nuits passées à me suivre dans les calculs, sur le terrain et les interminables débats de géographes sur la géographie.

Ma première et ma dernière pensée vont à mon épouse Jurgita et à mes parents qui m'ont toujours soutenu tout au long de ces années.

Sébastien GADAL, 30 août 2011.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS 5

REMARQUES 9

INTRODUCTION 11

Métropolisation et géomatique 11

Territoires techno-informationnels et individualisation de l'information géographique 15

Territoires techno-informationnels, geomatiques et mondialisation 17

Apport des géomatiques à la construction des savoirs géographiques 19

1. ANALYSE SPATIALE DES PROCESSUS D'URBANISATION ET DE METROPOLISATION 23

1.1. L'émergence de vastes territoires urbanisés et métropolisés : une mise en évidence par la télédétection spatiale 23

1.2. Métropolisation, mondialisation et ségrégation : vers des régions urbaines poly–intégrées 31

1.3. Structures et dynamiques spatiales de la métropolisation 38

1.4. Metropolisation et developpement 51

1.5. Métropolisations, systemes geomatiques et territoires de l'information 67

2. CONSTRUCTION DE SYSTEMES GEOMATIQUES INTEGRES DE SUIVI ET D'ANALYSE TERRITORIALE 77

2.1. Cadre théorique : télédétection, SIG et métropolisation entre approche classique et approche effective 77

2.2. metropolisation et géomatique : enjeux sociétaux 82

2.3. Une approche intégrée multi–niveaux, temporelle et régionale 96

2.4. De la mesure spectrale et temporelle à l'identification des objets géographiques 111

2.5. Exemples de méthodologies de reconnaissance, d'identification et d'extraction des objets urbains 138

2.6. De la télédétection aux systèmes géographiques d'information et de modélisation territoriale (SGIMT) 204

2.7.Ontologie de l'espace géographique, lieu-objet et théorie sémantique de la représentation des données spatiales..... 246

3. METROPOLISATION, URBANISATION ET DEVELOPPEMENT TERRITORIAL A TRAVERS LE PRISME DE LA GEOMATIQUE..... 258

3.1.Multiplicité des processus d'urbanisation et de transformation des territoires 258

3.2.Un territoire métropolisé sans métropolité ? La Lituanie 268

3.3.Corridor de métropolisations : l'axe Delhi–Mumbai (Inde) 323

3.4.Urbanisations littorales en Afrique de l'Ouest : quelles prémices à un processus de métropolisation ? 363

POSTFACE..... 386

CONCLUSION DE LA TRANSDISCIPLINARITE UTILITARISTE A L'OBJET DE CONNAISSANCE DU MONDE..... 390

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 398

LISTE DES FIGURES..... 418

LISTE DES TABLEAUX..... 426

REMARQUES

Ce volume, relatif à l'Habilitation à diriger des recherches, présente un certain nombre de travaux sur l'analyse des processus croisés de métropolisation et d'urbanisation par les démarches géomatiques avec l'intégration de la télédétection spatiale et aéroportée, des systèmes d'information géographiques et de la simulation spatiale. Les travaux présentés concernent trois terrains d'étude majeurs étudiés durant les cinq dernières années : l'Afrique de l'ouest, l'Inde du nord-ouest et l'Europe du nord postsoviétique ainsi qu'un certain nombre de recherches engagées en télédétection et analyse d'images, SIG et en modélisation spatiale. Ce texte ne reflète qu'une partie du travail engagé, des réflexions qui peuvent en être tirées et de l'apport aux sciences géographiques. Les questions relatives à la transmission des savoirs géographiques par les technologies de l'information et de la communication ne sont pas abordées, tout comme les recherches faites pour le Ministère de la défense. Elles ont été toutefois mentionnées dans le second volume.

L'introduction présente les enjeux des études comparées par télédétection et par la géomatique de la métropolisation sur des territoires géoculturels et biophysiques différents, en Afrique de l'ouest, en Inde du nord–ouest et en Europe du nord post–communiste. La première partie du mémoire porte sur une contextualisation sociétale du processus de métropolisation et des démarches géomatiques comme acteurs de la métropolisation et moyens de l'étudier. La seconde partie présente les méthodes d'analyse temporelle multi–échelles et de simulation 2D–3D par télédétection qui s'articulent autour de l'intégration télédétection–SIG–Modélisation spatiale–Géo–visualisation 3D dynamique. La troisième partie de ce mémoire aborde les questions de métropolisations, de corridors de développement et de transformations territoriales dans trois contextes géoculturels, politiques, historiques et humains différents. La conclusion présente les problématiques géographiques, les travaux théoriques et méthodologiques consécutifs en cours de développement dans le contexte de l'interdisciplinarité, de ses intérêts et de ses limites.

INTRODUCTION

METROPOLISATION ET GEOMATIQUE

L'étude des processus d'urbanisation et de métropolisation, l'un des phénomènes géographiques le plus prégnant à l'échelle mondiale, se caractérise par une démarche, des problématiques méthodologiques et scientifiques multiples qui s'inscrivent dans le triple champ de la géographie humaine, quantitative et théorique. Celui de la géographie humaine, car l'urbanisation et la métropolisation sont les phénomènes majeurs de la transformation des sociétés, de l'espace géographique et des territoires étudiés. Quantitative, car les démarches géographiques font appel aux approches spatiales par télédétection, aux systèmes d'information géographiques et de modélisation. Ces approches permettent tout autant de mesurer la diversité et la complexité des phénomènes de métropolisation et d'urbanisation que de les quantifier, les qualifier et les représenter cartographiquement et spatialement. Théorique, car les analyses comparatives, systématisées et normalisées que permettent les approches géomatiques sur de mêmes périodes et de mêmes temporalités, sur des territoires culturellement et géographiquement différents, permettent de revisiter le concept de métropolisation et d'avoir des regards croisés sur les dynamiques d'urbanisation. « Regards » produits par la géomatique qui renvoie à plusieurs dimensions scalaires, phénoménales et sociétales des processus de métropolisation et d'urbanisation : leurs inscriptions physiques et socio-territoriales conséquentes de la mondialisation et de la globalisation, moteurs et générateurs de celles-ci, tout autant que des modèles géographiques et spatiaux d'organisations sociétales et d'aménagements produits et produisant de la métropolisation.

D'un point de vue théorique, les rapports entre géomatique et métropolisation peuvent être analysés sous différents aspects :

- ✓ Par la capacité d'embrasser des portions de l'espace géographique comme un tout à différentes échelles, niveaux d'analyses géographiques, périodes et temporalités. Qu'apportent les nouvelles capacités de mesure de l'espace géographique et de traitement de données à la compréhension des processus de métropolisation ? Les progrès enregistrés durant les dix dernières années sont dans la puissance de calcul informatique et de stockage, la démultiplication, la diversification et la spécialisation des images de télédétection, le développement de démarches d'analyses intégrées regroupant télédétection, SIG et modélisation spatiale.
- ✓ Celui de la capacité à produire une conceptualisation spatialisée de la métropolisation grâce aux modèles géographiques produits.
- ✓ Celui des apports des systèmes géomatiques créés dans la construction des savoirs géographiques.

L'approche comparative faite grâce à la production de systèmes géographiques d'information et de modélisation territoriale (SGIMT) repose la question du rapport entre métropolisation, urbanisation, mondialisation et globalisation par leurs capacités à rendre comparable l'analyse des processus géographiques distants de plusieurs milliers de kilomètres, sur des espaces culturels, économiques, physiques et politiques fortement différenciés : l'Afrique de l'ouest, l'Inde du nord-ouest et l'Europe du nord–est post–communiste.

Les SGIMT créés donnent une représentation spatialisée des transformations de l'espace géographique sur les trois territoires étudiés à plusieurs niveaux et échelles géographiques : sur la totalité des territoires étudiés, au niveau régional, local (urbain) et à l'échelle de l'habitat–habitant sur certaines portions de l'espace géographique. La création des trois SGIMT, rassemblés de fait en un seul et même système d'information géographique, transgresse, ou plutôt met à mal les divisions de la télédétection spatiale et aéroportée, des SIG et de la modélisation spatiale en des sous-champs disciplinaires distincts de la géomatique. La séparation entre télédétection, SIG et modélisation spatiale n'a que peu de sens dans les travaux menés depuis la période post–doctorale sur la thématique de la métropolisation et de l'urbanisation. Elle tend à s'hybrider, à s'imbriquer dans le processus de production de l'information géographique et de construction des connaissances géographiques et territoriales. Dans le cadre de l'étude des processus d'urbanisation et de métropolisation, les démarches sont intégrées. La séparation entre télédétection et analyse d'images, construction de bases de données géo-spatialisées et SIG, modélisation empirique et représentation 3D dynamique est factuelle. La frontière entre télédétection, SIG et modélisation renvoie à des phases de traitements (calculs) précises de la chaîne d'acquisition, de la production d'information et de la construction de connaissances géographiques. Cette maîtrise de la totalité de la chaîne aboutit à la création de nouvelles connaissances géographiques. L'intégration, télédétection–SIG–modélisation spatiale, préfigure-t-elle le futur des démarches et systèmes d'analyses géomatiques en géographie ou est-elle propre à la problématique géographique de l'urbanisation et de la métropolisation ?

La géographie urbaine et les études touchant à l'environnement et aux territoires urbains dans leur pluri-multiplicité (urbanisme, aménagement, environnement, pollution, santé, géographie, sécurité, développement, etc.,) ont bénéficié, depuis plus de vingt ans, d'avancées continuelles et soutenues dans les domaines de la télédétection et des méthodes d'analyse d'images, de la modélisation spatiale et de la simulation, de la figuration interactive et dynamique des données et des résultats, de la géo-visualisation 3D. Ces avancées, dans les domaines du traitement de l'information géographique et des méthodes de production de connaissances et de nouveaux savoirs géographiques issus de l'observation de la Terre, c'est-à-dire, de la télédétection, se sont appuyées sur les progrès et la diversification des capteurs aéroportés et satellites.

La croissance de la puissance de calcul et surtout l'augmentation quasi exponentielle des capacités de stockage informatique ont permis de traiter des données métriques de plusieurs centaines de mégabits sur des centaines de kilomètres, de générer, de gérer et d'analyser des bases de données géographiques urbaines temporelles de plusieurs centaines de gigabits couvrant parfois des milliers de kilomètres. La démultiplication de la puissance de calcul informatique a également permis de générer des modèles de géo–visualisation en 2D, 2D/3D ou 3D statistiques ou dynamiques, mono date ou diachronique, représentant les structures, les évolutions ou les transformations des territoires en métropolisation ou en phase d'urbanisation, alors que l'interface homme/machine en traitement et analyse d'images, comme en cartographie, n'a que peu évolué depuis vingt ans.

L'introduction de la 3D dynamique a, de fait, modifié le rapport homme/machine/image/analyse/connaissance/compréhension/interprétation.
L'introduction de la géo-visualisation 2D/3D, combinée à des bases de données géographiques images centimétriques et thématiques de plus en plus variées, transforme les méthodes d'analyse de l'espace géographique. La géo-visualisation est plus qu'un mode de figuration d'une structure spatiale à n dimensions et de restitution d'un paysage. Elle est prise ici, comme un vecteur informationnel et modélisateur résultant d'une analyse géographique représentant le résultat d'un modèle ou d'une formalisation spatialisée d'une réalité géographique inscrite physiquement sur le territoire. Elle rend plus intelligible, plus accessible « l'apparente » complexité de l'espace géographique. Elle améliore de fait *la mise en compréhension* des structures de l'espace géographique, de l'organisation des territoires, des dynamiques et des processus biophysiques, humains et sociétaux en cours.

L'utilisation croissante des techniques multimédia issues de l'image, comme l'utilisation d'animations pour les simulations, de l'interactivité pour représenter des dynamiques spatiales, renforce le niveau d'intelligibilité de modèles territoriaux souvent complexes, par la facilité de lecture qu'offre la géo-visualisation. Elle participe à une meilleure compréhension des processus géographiques mesurés, détectés, reconnus et identifiés par télédétection, qualifiés et quantifiés spatialement et socialement. Elle contribue à une construction des connaissances et des savoirs géographiques, de l'environnement et des territoires en perpétuelle évolution. Une évolution des méthodes de production des savoirs géographiques qui est basée sur une mesure spectrale, spatialisée, d'une réalité biophysique, humaine et sociale, traitée, analysée, fusionnée, modélisée mathématiquement par le filtre des méthodes d'analyse d'images et spatiale.

Les progrès enregistrés durant les quinze dernières années, concernant l'observation de la Terre, ont contribué à la production de nouvelles connaissances et de nouveaux savoirs géographiques. Celle-ci a été réalisée grâce, notamment, à l'acquisition de nouvelles données de télédétection, à une meilleure identification des objets géographiques et extraction de l'information

par le traitement mathématique (numérique) des images (classification, morphométrie, reconstruction 3D, simulation), à une puissance de calcul et de stockage informatique décuplées permettant, notamment, la production de bases de données géo-référencées thématisées et normalisées de plusieurs centaines de gigabits ou de térabits. Il n'en est pas de même en système d'information géographique.

Les architectures SIG n'ont pas évolué depuis vingt ans et les modèles d'analyse spatiale basés sur la topologie et l'extraction de connaissances dans les bases de données n'ont, également, que peu évolué. Les avancées sont à rechercher dans l'interfaçage avec les technologies de l'information et de la communication (TIC), l'hybridation des usages avec l'individualisation des supports de télécommunication mobiles géo-localisés et la généralisation de la mise à disposition de bases de données géographiques et socio–démographiques géo-référencées. L'hybridation entre TIC et SIG s'est accompagnée d'une mise en ligne croissante de bases de données géographiques par le biais de serveurs dédiés ou de SIG en ligne transformant peu à peu la façon d'étudier, d'appréhender scientifiquement l'espace géographique, renforçant plus encore notre dépendance à certains SIG, à certaines bases de données géographiques et organismes étatiques les produisant ou les diffusant. La mise à disposition de l'information géographique, de données de télédétection sur lesquelles un nombre croissant d'études s'est développé à travers le couple « gratuité - dépendance informationnelle » résulte d'une politique de dominance informationnelle dans laquelle les TIC sont un vecteur démultiplicateur.

Si l'architecture des SIG et les méthodologies d'analyse et de modélisation spatiale n'ont que peu évolué depuis le début des années 1990, leur insertion dans le champ sociétal, leur diffusion et la généralisation de leurs usages par les technologies de l'information et de la communication dans des espaces d'applications fonctionnalistes, politiques ou identitaires aussi divers que l'aménagement participatif, la recherche d'itinéraires, de lieux, etc. ont banalisé leurs usages. La banalisation des usages ne s'est pas accompagnée d'une réelle réflexion géographique sur leurs implications sociétales.

Ces SIG dédiés figurent, diffusent des constructions et des représentations de l'espace géographique, modélisent des réalités territoriales. Ils sont des vecteurs sémantiques et sémiologiques tout autant que des miroirs de l'état de notre connaissance des territoires, du savoir géographique, de leur insertion dans la société, des usages et des appropriations qui en sont faits. Les SIG participent à la construction de nouvelles identités territoriales sans pour autant que les géographes s'y intéressent, laissant le champ d'analyse à des réflexions d'ordre « techno-fonctionnalistes » et éthiques : usages de la géo-localisation et de la traçabilité individualisée, conséquences sur la vie privée, etc.

TERRITOIRES TECHNO-INFORMATIONNELS ET INDIVIDUALISATION DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

La diffusion de la géomatique grâce aux technologies de l'information et de la communication, l'utilisation quotidienne de concepts clés de la géomatique comme la géo-localisation ou la géo-visualisation, d'analyses spatiales ou de la géographie à travers une description fonctionnalisée de portions d'espace géographique, véhiculés par des SIG dédiés sur Smartphones est symptomatique des liens « quasi fusionnels » entre métropolisation, émergence de territoires techno-informationnels et individualisation sociétale. La géomatique et les informations géographiques véhiculées sont devenues une partie du quotidien du territoire techno-informationnel dans lequel les individus métropolisés vivent, se meuvent, évoluent. Si elles sont un élément structurant de la métropolité, des objets géo-informationnels s'hybridant dans nos modes de vie, sont-elles pour autant des vecteurs organisant (structurant) physiquement les territoires et participant à leur transformation ?

- ✓ Sous quelles formes ces territoires techno–informationnels de la métropolisation s'inscrivent-ils spatialement ?
- ✓ Leur émergence façonne la métropolisation. Mais de quelle manière ?
- ✓ Comment s'inscrit-elle biophysiquement dans le territoire ?
- ✓ Peut-on la télédétecter ?

Les rapports entre ville, aménagement, territoire et géomatique ne sont pas nouveaux. L'apparition et l'utilisation de plans et de cartes sont concomitantes à l'aménagement de la cité dès l'antiquité. L'usage de la télédétection avec l'emploi de photographies aériennes prises de ballons au-dessus Paris l'est également depuis la fin du 19e siècle. Elle a été formalisée en géographie dès les années 1940 par Emmanuel DeMartonne (DeMartonne, 1948). Sur ce point, tout est dit, écrit ou presque. Sur un plan théorique, l'analyse des rapports entre géomatique, urbanisation et métropolisation peut être conceptuellement féconde dans la compréhension du fonctionnement des territoires métropolisés et l'émergence de la métropolité.

A ce jour, il est évident que la télédétection par imagerie spatiale ou aéroportée ne peut directement mesurer cet aspect pourtant essentiel de la métropolisation. C'est la quotidienneté de leurs usages qui modèle le territoire techno-informationnel métropolisé. Ils peuvent être mesurés, modélisés, représentés spatialement en SIG sur la base de données de télécommunications géo-localisées. Telle est la réponse que l'on pourrait avoir si l'on se place dans le cadre d'une démarche relativement classique en géographie-géomatique.

Elle est en réalité mal posée dans le cadre de notre problématique. Certes, les modélisations spatiales issues des données « télécoms » sont un formidable outil d'analyse de l'émergence de territoires métropolisés techno-informationnels et des pratiques sociales qui en découlent. Cependant, l'apparition de ces territoires techno-informationnels métropolisant (métropolisateurs) résulte de démarches,

de technologies cybernétiques mobilisées pour étudier les métropolisations : les *géomatiques*.

En effet, ce sont les architectures géomatiques d'origine spatiale et/ou issues de bases de données géographiques qui donnent vie à la sphère techno-informationnelle, donc à un des aspects fonctionnels et vécus de la métropolisation. Sans architecture géomatique il n'y a pas d'espace techno-informationnel. Le concept de ville numérique (*digital cities)* sur lequel sont basés l'économie, la finance, les transports, les télécommunications, la gestion des territoires urbains, devient non existant sans les systèmes géomatiques.

Les systèmes de géo–localisation spatiaux (WASS, Beidou, Glonass, Galileo) ou terrestres, couplés à des SIG ou des hybridations SIG-Smartphones (mobile), permettent de se déplacer, de se localiser, de se situer, de téléphoner, d'échanger de l'information dans un espace-temps réglé, de synchroniser les réseaux énergétiques, les flux de transports et d'informations, etc. Les SIG nomades ou mobiles, dédiés à des applications associant géo-localisation et bases de données géographiques, sont devenus un élément commun du quotidien, dans le travail ou les loisirs, sans que la majorité des individus métropolisés en ait conscience.

La gestion des territoires de la métropolisation, l'aménagement, l'urbanisme, la gestion des risques naturels et industriels, le suivi de la croissance urbaine passent par l'utilisation de la télédétection spatiale, des SIG et de la modélisation spatiale. La géomatique et l'information géographique participent au fonctionnement, à la gestion sociétale, géographique, économique et humaine des territoires métropolisés. Ce sont l'appareillage et l'architecture géomatique qui organisent la structure géographique techno-informationnelle mise en place pour faire fonctionner, gérer, contrôler, etc. les territoires de la métropolisation.

Sans l'existence de ces architectures techno–informationnelles basées, en grande partie, sur les systèmes *géomatiques*, c'est-à-dire, sur l'intégration d'axiomes géographiques (concepts constitutifs de la géographie) dans les systèmes d'information, de gestion et de fonctionnement comme la localisation, le lieu, l'espace, le temps, le fonctionnement même des territoires métropolisés serait affecté. De plus, l'absence de ces systèmes que l'on peut qualifier de géo-techno-informationnels en raison de l'intégration d'axiomes géographiques, d'informations géographiques qui sont au cœur des systèmes de télécommunication, de transfert d'information, de guidage, de mobilité, etc. pose la question de l'intégration du territoire métropolisé au système Monde et de sa dépendance à la sphère géographique techno-informationnelle.

TERRITOIRES TECHNO-INFORMATIONNELS, GEOMATIQUES ET MONDIALISATION

L'intégration de territoires métropolisés et mondialisés à d'autres territoires métropolisés et globalisés serait inopérante sans les systèmes géomatiques. Ce sont les architectures géo-techno-informationnelles qui inscrivent les espaces métropolisés ou de la métropolisation dans la globalisation par leur capacité à associer espace, temps, mobilité, flux, localisation, lieux et territoires dans les échanges d'informations, de personnes, d'idées, de marchandises. Elles concourent de fait à la mondialisation des territoires, des hommes et des sociétés. Elles sont un des maillons participant au processus d'intégration territoriale sur différents plans scalaires et géographiques : entre territoires métropolisés, de territoires globalisés vers le territoire métropolisé et son hinterland (niveau régional), du niveau local, ceux de l'individu et de l'urbain au (système) Monde. Un processus techno-sociétal émergent dans lequel l'information géographique, les applications SIG dédiées, hybridées aux TIC, sont une des bases fondamentales clé, un des cœurs du système (géo)-informationnel globalisé. Un système caractérisé par sa capacité à transformer les modes de vie, le rapport au territoire et à l'espace géographique, à créer de nouvelles territorialités sans pour autant toucher à la structure de l'espace géographique. Un système pour lequel il est difficile d'évaluer les impacts en termes d'aménagement et de réorganisation des territoires.

L'apparition du territoire techno–informationnel pose en filigrane plusieurs problématiques :

(1) Sur les liens entre émergence des territoires et des structures territoriales métropolisées. Peut-il y avoir métropolisation sans support techno-informationnel dans le sens où c'est le système géo-informationnel qui est le socle du fonctionnement des territoires métropolisés, qu'il est un vecteur technologique support de la mondialisation économique, des hommes et des territoires ? Si oui, en quoi des concepts de la géographie, utilisés en analyse spatiale, intégrés en géomatique, hybridés aux TIC, largement diffusés auprès des populations, totalement intégrés aux systèmes d'information et de fonctionnement, influencent-ils directement notre métropolité, notre rapport au territoire, nos mobilités et nos modes de vie ? Pourquoi l'émergence de ces territoires géo-informationnels virtualisés n'ont-ils que peu ou pas d'influence sur la structuration de l'espace géographique à l'échelle locale ou régionale ?

(2) Sur les rapports entre les systèmes *géomatiques*, la construction d'un territoire techno-informationnel et l'étude des territoires urbanisés, en métropolisation ou métropolisés par télédétection, SIG et modélisation spatiale. Le fait que les espaces de la métropolisation ont une dépendance croissante aux systèmes *géomatiques* techno-informationnels participant au fonctionnement et à la gestion de leurs territoires dans l'aménagement, la sécurité, les transports, l'environnement, etc. avec le développement des concepts de villes numériques

nous met implicitement dans un moule théorique particulier de pensée : celui des sciences de l'information, plus particulièrement des sciences de l'information géographique (SIGs). La double dimension « spatiale et géographique », « spatiale ou géographique » dont les SIGs sont porteurs, va se décliner sous trois formes : technologique avec les systèmes *géomatiques*, informationnelle avec la production d'informations géographiques à partir de données spatialisées et géo-référencées, géographique avec la construction de connaissances. Elle se double, aussi, dans le cadre de notre étude, d'une dimension sociétale inédite avec l'émergence des techno-cités, ces techno-territoires métropolisés (de la métropolisation). La géomatique est un des moteurs structurant de la métropolité. C'est un des acteurs qui façonne les transformations de la société. Ces transformations sont une des conséquences de l'inféodation des théories de l'information et de la cybernétique dans les modes de vie, dans l'organisation des territoires urbains et métropolisés dont la géographie informatique, ses concepts et ses usages sont un des développements ou, selon, un des avatars.

(3) De ce fait, le positionnement des travaux de recherche qui ont été engagés depuis le milieu des années 1990 sur les métropolisations et leur analyse par télédétection, SIG et modélisation spatiale, nous place dans une situation où la démarche géomatique choisie est également un acteur des transformations de la société, des territoires et de la mondialisation, tout autant qu'un outil technique d'aménagement et de surveillance des espaces métropolisés. La géomatique est donc porteuse d'une pluralité sémantique et conceptuelle amenant souvent à des confusions :

- ✓ C'est une démarche, un cadre d'analyse de l'espace géographique qui se structure autour de mesures systématisées, qualitatives et quantitatives, spatialisées et géo-localisées, d'une réalité géographique, biophysique et sociale et de méthodologies mathématisées et informatisées, automatiques ou/et cognitives (analytiques).
- ✓ C'est aussi un cadre de méthodes s'appuyant sur des développements technologiques, des méthodes, des outils concourant à générer de l'information géographique, à la structurer, à la mettre en forme, à la figurer et à la représenter.
- ✓ C'est également un outil techno-informationnel de gestion opérationnelle de l'espace géographique qui s'inscrit le plus souvent dans une logique fonctionnalisée de l'aménagement du territoire. Logique fonctionnaliste dédiée à une fonction ou un ensemble de fonctions que l'on retrouve en ingénierie géomatique : navigateurs GPS, C4I, etc. Le système d'information géomatique est une composante d'un système d'information, de commandement, de gestion, de communication.
- ✓ C'est dans le cadre de notre problématique, un acteur sociétal de l'émergence de territoires métropolisés et dans le même temps, le cadre d'une démarche analytique et systématisée.

(4) Un des problèmes récurrents de la géomatique en géographie est la prédominance méthodologique sur les informations produites. Ces informations

portent sur les connaissances géographiques, les connaissances sur la pensée géographique en raison des investissements dans l'acquisition de savoirs dans les SIGs, en ingénierie système, dans les méthodes mathématiques rapportées à la géomatique à l'instar de l'analyse et du traitement d'images, de la simulation, etc. Si l'investissement en temps, en développements méthodologiques et en calculs est lourd, les démarches géomatiques s'appuient, à la fois, sur un socle de connaissances théoriques, conceptuelles, accumulées (les savoirs géographiques) et sur une réalité empirique dont les résultats sont confrontés au terrain. Les démarches géomatiques découlent souvent en analyse et en modélisation spatiale de modèles d'organisation de l'espace géographique et des territoires pensés, conceptualisés et modélisés. Elles se distinguent notamment des autres approches en géographie en privilégiant l'entrée spatiale où le continuum géographique côtoie le particulier : l'objet géographique, le lieu, la localisation, la position.

APPORT DES GEOMATIQUES A LA CONSTRUCTION DES SAVOIRS GEOGRAPHIQUES

L'apport des démarches géomatiques à la géographie n'est plus à démontrer. Les approches théoriques et quantitatives introduites dès juillet 1971 par le groupe Dupont ont été un élément contributeur au renouvellement des méthodes et des concepts participant à la construction des savoirs géographiques. La question des contributions de la géomatique dans l'analyse des transformations territoriales liées à l'urbanisation et à la métropolisation est ici clairement posée avec la construction de Systèmes géographiques d'information et de modélisation territoriale, le développement de méthodologies de traitement d'images et de données géographiques, l'utilisation de nouvelles données de télédétection. Elle met en avant la capacité de passer d'études géographiques dédiées, spécialisées à un territoire, à des méthodes d'analyses multi–territoriales.

Elle met également en exergue les apports possibles des démarches géomatiques intégrées à l'analyse et à la compréhension des processus des transformations territoriales induits par la métropolisation et l'urbanisation et leurs apports à d'autres disciplines.

Des pans entiers de la géographie qui s'identifient, selon les velléités, dans des courants quantitatifs, postmodernes, sociologiques, etc., ont fait et font appel aux théories, concepts et modèles issus des sciences physiques, des sciences humaines et sociales, rarement à ses propres fondamentaux. Peut-on croire qu'une discipline académiquement jeune, la géographie, qui a donné naissance, par exemple, à la démographie, à la climatologie, à la géomatique, etc. ne serait pas à même de créer et de diffuser ses propres concepts, ses propres modèles et apports à la connaissance auprès des autres sciences et de la société ? La géomatique peut-elle faire exception, tout comme l'étude géographique de la métropolisation ?

Les SIG et les modèles d'analyse spatiale connaissent, depuis plus de quinze ans, une diffusion et une utilisation croissante dans nombre de domaines d'applications et de métiers. Les besoins en information géographique et à leur mise en forme (œuvre) sont croissants de part la nécessité de renseigner le territoire, de mieux le gérer, l'exploiter ou l'utiliser. Ils le sont également en analyse spatiale, le but recherché étant le plus souvent associé à une logique d'optimisation. Optimisation qui passe à travers l'analyse combinée des objets géographiques structurant l'espace par l'intégration de critères spatiaux, géographiques et territoriaux.

La télédétection, les méthodes de traitement et d'analyse d'images associées, bien que moins diffusées, conservent une dimension stratégique importante, croissante même en raison des besoins également croissants en données, en informations géographiques, environnementales, économiques, sécuritaires et politiques. Les investissements industriels, étatiques et pan-étatiques, comme le GMES (Global Monitoring Environnement and Security), se font prioritairement dans ce domaine. La quasi-totalité de l'information géographique intégrée et traitée en SIG provient de la télédétection.

Elle est pourtant sous représentée dans les formations de Master en géographie au profit des SIG. Ce qui est une erreur. Elle place le géographe dans une nouvelle forme de dépendance aux bases de données géographiques existantes qui lui sont fournies. Elle le place dans une situation où il a une maîtrise partielle de la validité des données et des informations géographiques utilisées servant à la construction des connaissances.

Plus grave encore, le géographe se retrouve dans une « confortable » incapacité à créer ses propres données, ses propres indicateurs, à partir desquels il va construire ses propres raisonnements. Cette situation le place trop souvent dans une incapacité à s'approprier des champs de recherches et d'applications qu'il a pourtant défrichés et qui vont être récupérés au profit d'autres disciplines.

Ce problème est souvent aggravé dans le processus de transmutation de certaines recherches au profit d'autres disciplines ou applications comme en télédétection hyperspectrale. A titre d'exemple, la transposition des usages développés en télédétection hyperspectrale aéroportée dans des champs de compétences disciplinaires qui semblent éloignés, comme la biomédecine, l'imagerie médicale, la détection de polluants et leur identification, etc. contribue à la diffusion d'approches, de raisonnements, de connaissances développées en géomatique.

Les connaissances et les savoirs acquis par les géographes, par exemple, sur la métropolisation, sont importants. Leur diffusion semble pourtant parfois bridée par des recherches faisant référence en économie spatiale s'appuyant souvent sur des travaux de géographes en modélisation territoriale. Il est bien moindre dans la recherche translationnelle notamment en géomatique, aménagement et tourisme. La professionnalisation de la discipline à faire émerger de véritables compétences, à la fois théoriques et appliquées, par les liens la liant aux

industriels, aux collectivités, aux politiques ou à certaines administrations chargées de l'aménagement du territoire, de l'environnement, de la défense ou encore de la santé, est un enjeu à la fois industriel et scientifique.

1. ANALYSE SPATIALE DES PROCESSUS D'URBANISATION ET DE METROPOLISATION

1.1. L'EMERGENCE DE VASTES TERRITOIRES URBANISES ET METROPOLISES : UNE MISE EN EVIDENCE PAR LA TELEDETECTION SPATIALE

1.1.1. INTRODUCTION

Les études portant proprement dit sur les phénomènes et les processus de métropolisation par la télédétection spatiale et les SIG sont rares. Les auteurs parlant explicitement d'études de la métropolisation à partir d'images de télédétection spatiale et aéroportée, avec des systèmes d'information géographiques, sont quasi inexistants. L'étude de l'étalement spatial lié aux phénomènes de métropolisation utilise peu les démarches spatiales faisant appel aux images de télédétection, aux SIG ou à la modélisation spatiale. Ce sujet est pourtant abondamment traité en géographie et les études par télédétection sur le suivi de la croissance urbaine sont nombreuses. Pour quelles raisons ?

S'il est plus ou moins relativement « aisé » de suivre l'étalement urbain à partir d'images DMSP, de satellites d'observation de la Terre comme Spot, Landsat, IRS, Formotsat, Ikonos, etc., analyser la métropolisation engage trois champs de compétences géographiques distincts qui se rencontrent encore relativement peu. Cela concerne :

- ✓ Les spécialistes en géographie humaine travaillant sur les questions d'urbanisation et d'aménagement, de métropolisation, de développement, de mondialisation, de géo-économie, etc.
- ✓ Les géographes géomaticiens qui réfléchissent essentiellement sur le développement de méthodologies, de techniques et d'outils d'analyse, de modélisation et de représentation spatiale et territoriale.
- ✓ Depuis peu, la question de la métropolisation avec l'émergence de territoires métropolisés intéresse une part croissante de géographes physiciens et d'environnementalistes. Avec le développement des travaux en micro-climatologie, les territoires métropolisés deviennent un facteur central ou un objet d'étude. Les études menées en biogéographie et en sciences environnementales sur la métropolisation tendent également à se développer : adaptation de l'environnement à la métropolisation, bilan carbone, impacts sur la santé des populations.

Travailler sur la métropolisation en géomatique par télédétection, SIG et modélisation spatiale, implique d'avoir de solides connaissances sur les théories et les concepts de la métropolisation dans un domaine où les débats théoriques sur la définition du concept font l'objet d'âpres discussions. Les démarches choisies pour l'analyser alimentent les échanges entre les différents points de vue. Travailler sur la métropolisation en géomatique implique, également, une réflexion sur les objets géographiques la caractérisant physiquement et spatialement sur la détection, la mesure, l'extraction, l'analyse et l'interprétation. Le passage de l'image de télédétection, du SIG à la représentation des processus de métropolisation est un champ de recherche en soi. Travailler sur la métropolisation en géomatique implique, aussi, de développer des « ensembles » de méthodologies de traitement des données et d'informations géographiques qui soient dans la mesure du possible reproductibles pour, par exemple, analyser à différentes échelles géographiques une de ses facettes : son caractère globalisé au regard de régions urbanisées émergentes. Les méthodologies créées ont fortement évolué depuis le doctorat. Ces blocs ou ensembles méthodologiques ont connu depuis le doctorat plusieurs évolutions majeures :

- ✓ L'introduction de la dimension dynamique et multi-temporelle de la métropolisation en télédétection spatiale.
- ✓ L'usage croissant des systèmes d'information géographiques dans les analyses et les modélisations qui vont aboutir à la création de systèmes d'information, SIG–télédétection, intégrés.
- ✓ L'essor des modélisations dynamiques simulant le développement spatial de la métropolisation en 2D et 3D.

Basées essentiellement sur l'exploitation numérique des images de télédétection spatiale panchromatique et thermique (Gadal, 2003) (Gadal, 2011) avec, d'une part, le développement de méthodologies fondées sur la morphométrie et la texture des objets géographiques et, d'autre part, l'analyse de leur signature thermique vis-à-vis des formes urbaines (Gadal, 2008), les méthodologies de traitement vont s'enrichir de données multi–spectrales (Gadal, 2006), hyper–spectrales et radar (Gadal, 2003) (Gadal, 2009). Les développements méthodologiques vont être axés sur l'exploitation des différentes radiométries des objets géographiques, notamment les matériaux des toitures, l'occupation et l'utilisation des sols, leur reconstruction volumétrique en 3D et la constitution de bases de données morpho–géographiques orientées objets. L'intégration des SIG dans les ensembles de traitement va également être porteuse d'un certain nombre d'avancées dans le suivi et la modélisation de la métropolisation. Il s'agit, notamment, de la structuration des bases d'informations géographiques objets à différentes échelles, de la combinaison des résultats issus des images de télédétection avec les sources d'informations géographiques existantes, du développement de modèles d'évolution des territoires, de l'enrichissement des résultats, de l'aide à l'analyse et à l'interprétation, de la représentation 2D-3D, etc.

Il reste que l'étude par la géomatique et, à plus forte raison, par télédétection des territoires métropolisés, est quelque chose d'encore marginal, relativement peu étudié, à la lecture de la bibliographie disponible en français, en anglais et en espagnol. La complexité de l'objet géographique dans sa totalité et l'état d'avancée des technologies et des méthodes mises en œuvre sont remarqués par Victor Mesev ou encore Dino Brugioni (Brugioni, 1989) "[…]*Sensing cities remotely is difficult – very difficult ! It is tricky enough to interpret the intricate interplay of artificial structures, economic activity, government policies, land tenure, social class, culture and the biosphere, typical of all cities, from on the ground let alone from the sky or space* […]" (Mesev, 2003).

Confinée au petit nombre d'auteurs et de chercheurs, la thématique de la métropolisation et de sa mise en évidence par télédétection n'est pas nouvelle. Elle est apparue avec les travaux menés par Thomas Croft dans les années 1970.

Il semble tout aussi évident que l'étude des processus de métropolisation et leur suivi depuis le début des années 1970 par télédétection ont fait l'objet de programmes de recherche, certes relativement discrets, mais importants aux Etats-Unis avec l'exploitation des images visibles proches infrarouges (VNIR) prises par les satellites Defense Meterological Satellite Program (DMSP). Mise à part l'exploitation faite par les chercheurs étasuniens des images VNIR OLS embarquées sur les vecteurs DMSP, toutes les études identifiées faisant explicitement référence à la télédétection de la métropolisation sont *postérieures* à la soutenance de mon doctorat en décembre 2001. Elles concernent, pour l'essentiel, des géographes de l'Université nouvelle de Lisbonne au Portugal qui m'ont succédé au Centre d'analyse et de mathématiques sociales (CAMS) à l'Ecole des hautes études en sciences sociales (EHESS). Pedro Cabral a soutenu un doctorat en 2006 sur les dynamiques de métropolisation au Portugal en utilisant une démarche d'analyse et de modélisation classique (Cabral, 2006). Sa consœur, Patricia Abrantes, doctorante en 2005 à l'Université Paris 4 Sorbonne, a publié un article dans la lignée des travaux engagés, également en doctorat, sur les formes de métropolisation au Portugal (Abrantes et al., 2010). Christiane Weber et Anne Puissant, spécialistes en télédétection appliquée à l'environnement urbain, font également référence à la question de la métropolisation de Tunis dans un article publié en 2003 dans *Remote sensing of environment* (Weber, Puissant, 2003). Dans la lignée des travaux étasuniens quelques articles portant sur la télédétection de la métropolisation avec DMSP feront l'objet de publications sur et en Chine populaire (Lo, 2002) (Zhuao et al., 2003) (Chen et al., 2006) (Qi, Chopping, 2007).

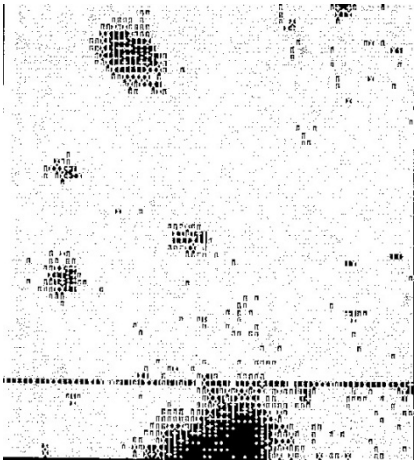
1.1.2. METROPOLISATION ET TELEDETECTION SPATIALE

DETECTION DE LA METROPOLISATION

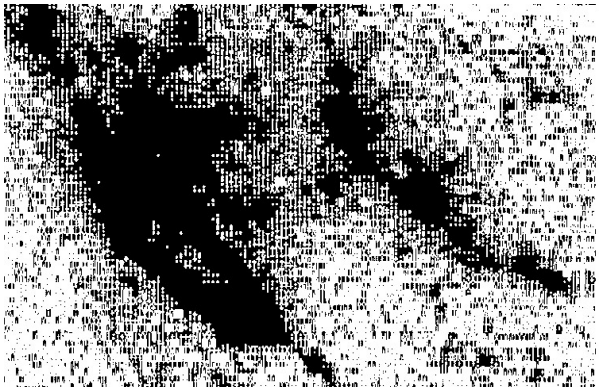
La création de concepts de métropolisation, dans les années 1970, notamment aux Etats-Unis, est indissociable du développement et de l'utilisation de la télédétection spatiale et plus particulièrement de la série de satellites météorologiques DMSP. L'idée que nous sommes devant l'apparition d'un phénomène post–urbain est consécutive à l'exploitation des premières images grand–champ des satellites *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) et est clairement mise en avant par Thomas Croft dans son rapport *The brightness of lights on earth at night, digitally recorded by DMSP satellite* (Croft, 1979). Il fait état d'un vaste processus d'extension de l'urbanisation sur plusieurs centaines de kilomètres qu'il faut requalifier.

Figure 1 : Premières images DMSP utilisées pour la reconnaissance des métropoles nord-américaines (1974).

Région de Dallas
Centres urbains (en noir)



Région de San Francisco
Centres urbains (en noir)



Sources : Croft, T. (1979). The brightness of lights on Earth at night, digitally recorded by DMSP satellite.

La question de la télédétection de la métropolisation avec des images DMSP prises de nuit sera explicitement abordée dans un article *post mortem* publié en 1997 en mémoire à Jean Gottmann dans *Sistema Terra* (Miyakawa, 1997).

Les travaux les plus connus de Jean Gottmann publiés en 1961 « Megalopolis. The urbanized northeastern Seabord of United States » (Gottmann, 1961) et en 1964 « The Challenge of Megalopolis : A Graphic Presentation of the Urbanized Northeastern Seaboard of the United States » (Von Eckardt, Gottmann, 1964) portent sur la question de l'émergence de nouvelles formes d'urbanisation, rassemblant au moins vingt cinq millions de personnes, caractérisées par la croissance et l'étalement spatial mais, également, de lieux émergents des

connaissances, du pouvoir, témoignant d'une nouvelle forme d'organisation géographique de l'espace et des territoires.

Mis à part l'article de Miyakwa dédié à Jean Gottmann, aucune des publications faites par les chercheurs ou les universitaires nord-américains ne fait explicitement mention d'un processus de métropolisation télé–détecté. Les recherches engagées par les universitaires et chercheurs étasuniens pour l'essentiel (Mesev, 2003) vont se concentrer sur la capacité à produire des bases de données géographiques mondialisées à partir des images DMSP. Une fois les méthodologies d'extraction des espaces urbains formalisées (Elvidge et al., 1995) (Imhoff et al., 1997) (Loveland, 1997), les recherches ont porté sur la création de bases de données géographiques mondiales de répartition des populations pouvant être rapidement mises à jour selon les besoins, de méthodologies de calcul de densité des habitants au kilomètre carré (Elvidge et al., 1997), (Sutton, 1997), (Sutton et al., 1997), (Mesev, 1998), (Dobson et al., 2000), (Sutton, 2002), (Dobson et al., 2003), (Sutton, 2003), d'identification des zones de pollution au CO_2 (Saxon et al, 1997), de calcul du produit intérieur brut (Doll, 2003), de zones criminogènes (Weeks, 2003) et d'évaluation du niveau de vie des habitants au regard de leur émissivité dans le VNIR (Welch, 1980) (Doll et al., 2000) ou des ressources fossiles (Croft, 1973). Les applications les plus abouties vont donner naissance à la base de données de répartition mondiale de la densité des populations, LandPop et LandScan, développée depuis 1998 par l'ORNL.

BASES DE DONNEES MONDIALISEES ET TELEDETECTION GRAND-CHAMP

La création de bases de données géographiques normalisées à l'échelle mondiale est intéressante à double titre. Elle permet de mesurer régionalement l'intensité du processus de métropolisation, d'estimer son emprise spatiale sur l'espace géographique et de comparer à d'autres espaces géoculturels. A titre d'exemple, en 1998 la comparaison faite entre la DCW (Digital Chart of the World) de 1984 et les spatio–cartes élaborées par l'USGS en 1995 à partir du fond cartographique de la National library of Wales a permis de montrer le caractère global du processus de croissance urbaine et son inégale répartition selon les espaces géoculturels dans lesquels les territoires de la métropolisation sont insérés (Gadal, 2001) (Gadal, 2003) (Gadal, 2011). Durant cette période, la croissance urbaine a augmenté de 5% au niveau mondial. Elle a été importante en Europe occidentale et en Amérique du nord avec une croissance moyenne d'environ 30%. Elle est estimée à 10% dans les pays post–communistes. Son impact sur les territoires nationaux est très inégal : les territoires urbains couvrent 26% à 27% du territoire national pour la France, 5% pour le Maroc (Doll, Muller, 1998).

Le choix d'accès à tout un pan de la production de bases de données géographiques à partir des seules images satellites provenant du vecteur DMSP témoigne des difficultés à disposer de sources géostatistiques normalisées à jour

et comparables entre les différentes régions ou pays. Devant les difficultés à mettre en place des bases de données géo–démographiques et géo–socio–économiques, l'administration américaine s'est tournée, probablement au début des années 1990, vers la production de bases de données mondiales de répartition de la densité de la population, de cartographie des espaces urbains, de production de données socio-économiques à partir des sources DMSP prises de nuit. Les bases de données générées à partir des méthodologies de traitement d'images ont été enrichies avec l'apport d'autres sources géographiques globales produites, en partie, par différents organismes de renseignements nord-américains comme la *Defense Intelligence Agency* ou la *National Geospace Agency* avec les séries de cartes numériques VMAP et FFD, les cartes des réseaux de communication, de télécommunication, etc.

Les images prises de nuit avec le capteur OLS-PMT permettent de détecter le rayonnement des territoires métropolisés, les mégalopoles, les espaces urbains dans le visible proche infrarouge entre 0.4 et 1.1 µm. Cette capacité de détection mise en évidence par Croft, dès les années 1970, a conduit le précurseur du NGA, la NIMA, l'US Air Force et la NASA à financer des programmes de recherche sur l'identification des trames urbaines, l'estimation des densités de population (Elvidge et al., 1997), la production de spatio–cartographies de la métropolisation (Dobson et al., 2000) ou leur intégration avec les données de recensement (Mesev, 1998). Les Etats-Unis disposent avec LandScan et LandPop de bases de données géographiques ou démographiques à jour, spatialisées, couvrant la totalité de la surface terrestre. On remarquera au passage que la focalisation d'un certain nombre d'études financées par le NGA sur la capacité à détecter, reconnaître et identifier les territoires métropolisés et urbanisés, comme les zones de forte concentration de la population relève d'une stratégie qui se pense à l'échelle du Monde : maîtriser la sphère géo–informationnelle, surveiller l'espace géographique, connaître et comprendre l'évolution des nouvelles structures spatiales que sont les territoires métropolisés ou en métropolisation.

Depuis la fin des années 1990, les apports des articles à la thématique de recherche à partir des images DMSP sont faibles. Ils traitent de la même thématique, des mêmes applications à travers le Monde. Ils sont un indicateur de la diffusion des méthodologies mises en place et du niveau de compétence acquis par telle ou telle équipe ou centre de recherche. A titre d'exemple, dès le début des années 2000, les chinois ont cherché à copier les méthodologies pour ensuite les appliquer sur la Chine ou la Mongolie. Certains collègues et non des moindres, sans la plus petite connaissance, sans de réelles capacités d'analyse et d'interprétation d'images prises de nuit sur l'Union européenne, ont élaboré des théories de développement, de concentration de richesses, de corridors économiques urbains structurant l'espace européen, etc. sur, par exemple, l'éclairement des autoroutes au Benelux. Autant d'absurdités qui ont donné naissance à de savantes interprétations géographiques et transcriptions politiques.

Elle témoigne également de l'incapacité d'une partie de la géographie française à s'approprier ses propres apports méthodologiques et développements technologiques. Malgré les rapports et les articles de Croft au début et à la fin des années 1970, plusieurs autres traitant de l'identification des trames urbaines de nuit (Lieske, 1981), (Sullivan, 1989), alors que les vecteurs DMSP, ont été officiellement dévoilés en 1992. La détection de tout objet lumineux, en dehors des problèmes de *smoothing* et d'acquisition des données de nuit (bruit, géo–localisation, données manquantes, surexposition au soleil, bordures d'images bruitées), sur laquelle des traitements et des analyses d'images sont effectués, crée des problèmes d'identification des espaces urbains. Des méthodologies ont été développées pour limiter les mal–identifications des territoires non urbains ou non–métropolisés, problèmes qui tiennent à la fois à la qualité des images acquises, à leur résolution kilométrique et à la fenêtre spectrale utilisée.

Christopher Elvidge propose de fusionner les données cartographiques de l'USGS avec l'image VNIR acquise de nuit. Le taux d'erreur sur le continent Nord-américain est estimé à 10 %. Cela implique de disposer d'une base de données urbaines à jour, ce qui, dans le cadre d'une utilisation opérationnelle sur les régions où les cartes topographiques sont remises à jour chaque 30 à 50 ans, peut être problématique. Sébastien Gadal, l'auteur de ce mémoire d'HDR, a développé et utilisé la méthodologie suivante pour dissocier les pôles urbains et pétrolifères des couverts nuageux : l'image du VNIR est soustraite arithmétiquement de celle de la bande infrarouge thermique (la nébulosité ayant préalablement été extraite par un seuillage binaire) pour ne faire ressortir que les zones d'émissivité du VNIR, les espaces urbains. Elle a l'avantage de ne reconnaître que les territoires urbanisés, mégapolisés ou métropolisés. Elle a le désavantage de perdre les pôles urbains qui sont confondus avec l'infrarouge thermique.

ESTIMATION DE POPULATION PAR TELEDETECTION GRAND–CHAMP

Testé et calibré sur les Etats-Unis, le modèle d'identification de la trame urbaine, d'estimation des densités de population et du nombre d'habitants repose sur l'hypothèse d'une corrélation entre l'intensité de l'émittance des territoires urbains - lieux de concentration des populations - et leur densité. Ce rapport, entre niveau d'énergie enregistré dans le VNIR et la densité de population, est basé sur le modèle de Tobler (Tobler, 1979). William Tobler avait, dès la fin des années 1960, développé un modèle d'estimation des densités de population à partir des photographies aériennes. Les différentes applications faites à partir des photographies aériennes du modèle montrent un taux moyen de corrélation variant de 0.86 (Welch, 1980) à 0.96 (Ogrosky, 1975).

Le modèle statistique théorique est simple : $r = a \times P \times b$, avec r : la population comprise dans l'unité spatiale de mesure, P : la population, b : la dérivée exponentielle définie empiriquement, tout comme le paramètre a, qui est le lieu régional. Dans le modèle de mesure, P est remplacé par X, l'énergie émise enregistrée par le capteur OLS dans le VNIR.

C'est « l'association » en une seule fenêtre spectrale du visible et du proche infrarouge qui permet d'identifier aisément les concentrations urbaines.

Les résultats présentés en 1997 dans l'article « *Mapping city lights with nighttime data from DMSP operational linescan system* » montrent que 80% de la population du sous-continent Nord-américain sont reconnus et géo–localisés avec des données OLS-PMT prises de nuit. Ils font également apparaître que 80% de la population identifiée par télédétection se concentrent sur 10% du territoire, alors que 17% de la population détectée sont localisés sur la majeure partie du territoire des Etats-Unis. Paul Sutton montre que les coefficients de corrélation moyens issus des régressions linéaires locales font apparaître une sous-estimation du nombre d'habitants au kilomètre carré dans les centres urbains et une surestimation dans les territoires périurbains (*suburbia's*) (Sutton, 1997). Il estime le taux d'erreur à 25%, ce qui est relativement important, avec un coefficient moyen de régression pour les Etats-Unis de R^2 = 0.61. La surestimation de la densité de population dans les *espaces périurbains* n'est pas en soi un non sens du fait qu'elle est directement corrélée à l'intensité de l'émissivité de ces objets urbains. Elle reflète la quantité d'énergie utilisée et consommée par les populations qui ont un niveau de vie plus élevé (Dobson et al., 2000).

En ce sens, l'apport de la télédétection grand–champ dans l'identification des territoires métropolisés est important. Il est préférable de penser le niveau d'émittance enregistré dans le VNIR comme une mesure relative et non absolue de calcul des densités de population. Sans pour autant estimer parfaitement la densité de population, les niveaux d'émittance enregistrés représentent bien le gradient de répartition de la densité de la population. Les travaux menés depuis les années 1970 ont constitué et constituent aujourd'hui encore le socle d'une analyse des processus de métropolisation multi–échelles, normalisée et comparable dans le temps, les lieux et l'espace.

Si l'estimation du nombre d'habitants, avec l'emploi de satellites météorologiques grand–champ comme DMSP, génère un taux d'erreur important, il permet de montrer rapidement la structure urbaine multi–polarisée du pays. Elle renvoie à deux phénomènes géographiques qui caractérisent le processus de métropolisation : la concentration des populations sur un espace caractérisé par l'étalement urbain, conséquence de la déconcentration et de la délocalisation des populations citadines.

On notera que les modèles d'estimation des populations et de leur densité sont faits au seul moyen des images satellites DMSP. Plusieurs modèles de calibration ont été développés à cet effet comme ceux créés par Paul Sutton. Associer, intégrer les données démographiques avec les images satellites n'est pas une chose nouvelle. Des travaux similaires ont été menés par l'Institut de recherche pour le développement (IRD) sur Quito en Equateur (Dureau, 1988), (Dureau et al, 1988) et en Afrique de l'ouest (Gadal, 2003) (Gadal, 2011).

L'étude de la métropolisation par télédétection ne se limite pas à des démarches globales utilisant les seules images de nuit OLS-PMT des séries DMSP. Les images

infrarouges thermiques prises à partir de données Landsat ou ASTER constituent à l'échelle méso–métropolitaine un moyen pour identifier et caractériser la morphologie urbaine, les formes métropolitaines d'occupation et d'utilisation du sol, la pollution ou estimer le niveau de vie et les densités de population (Gadal, 2008). De même, malgré l'inefficience de la plupart des méthodes de classification d'images (Anys, 1994) au profit de traitements basés sur la morphologie mathématique (Pesaresi, 1995) et la morphométrie (Gadal, 2003), les images haute résolution comme Landsat TM/ETM+, Spot, IRS, etc. permettent d'extraire des entités géographiques homogènes qui, dans bien des cas, constituent un *pattern* socio–spatial du bâti et de l'habitat métropolisé à partir duquel il est possible d'estimer la structure sociale et spatiale des territoires (métropolisés).

1.2. METROPOLISATION, MONDIALISATION ET SEGREGATION : VERS DES REGIONS URBAINES POLY–INTEGREES

1.2.1. SYNOPSIS

Dès la fin des années 1940, aux Etats-Unis, l'importance des dynamiques métropolitaines a été à l'origine d'une définition officielle de la métropole en raison de la transformation des structures urbaines. De ce fait, en 1949, une nouvelle unité statistique a été créée : le *Standard Metropolitan Statistical Area* (SMSA). Elle regroupe trois cents aires métropolisées de plus de 50 000 habitants intégrant les activités et les déplacements domicile–travail. La métropolisation constitue un ensemble d'espaces urbanisés de plus en plus vastes, spatialement hétérogènes, discontinus, formés parfois de plusieurs villes, de moins en moins liés à l'économie régionale, de plus en plus connectés à l'international à d'autres territoires métropolisés. **Tout a été dit ou presque**. C'est ce que l'on serait tenté de dire au regard de la littérature scientifique des années 1990 et 2000. Les définitions données de la métropolisation ont peu ou pas varié depuis dix ans tout comme les questions théoriques.

La polysémie sémantique du terme, objet de débats dans les années 1990 et au début des années 2000, les possibles définitions en fonction des postulats théoriques, des approches choisies et des grilles de lecture utilisées pour analyser et comprendre ce processus de transformation des territoires à la fois global, mondial, régional et local (Gadal, 2001). Quelle que soit l'approche géographique, qu'elle soit géoéconomique avec l'étude des implantations et la localisation des entreprises, des services, des technopoles, démographique avec la redéfinition de la répartition des populations, spatiale avec l'étude des mobilités, de la croissance urbaine, des fragmentations sociales, etc. toutes tendent à mettre en évidence des dynamiques géographiques communes. Il semble aujourd'hui que les définitions données de la métropolisation, définitions

pour le moins *descriptives*, font l'objet d'un relatif consensus depuis ces dix dernières années aussi bien sur la nature géoéconomique, sociale et spatiale du phénomène géographique que de ses conséquences dans la recomposition des territoires à travers le Monde.

1.2.2. DES METHODES DE TRAITEMENT ET DES TERRITOIRES GEOCULTURELS DIFFERENTS

Entre 2001 et 2011 les différences vont être d'ordre géographique et méthodologique. Les travaux se sont concentrés sur les méthodes de reconnaissance et d'identification des objets bâtis, résidences, bidonvilles, habitats dégradés, usines, etc. jusqu'en 2001. Ils vont se poursuivre avec l'utilisation de nouveaux capteurs aéroportés et spatiaux grands–champs comme MétéoSat Seconde Génération, hautes résolutions spatiales métriques et submétriques comme Kompsat-2, Egypsat-1, Ramses, etc. A l'exception de Ramses bande X, les travaux vont se concentrer sur l'exploitation des images multi–spectrales et hyper–spectrales, non plus sur les données panchromatiques. Dans le même temps, de nouveaux indicateurs, non plus urbains, mais « environnementaux », comme l'évolution et l'exploitation forestière vont être utilisés. L'émergence de critères « décalés », comme la forêt, tient à la relation systémique qui existe entre la métropolisation et l'exploitation des ressources naturelles. Cette relation systémique va probablement être avec la modélisation des impacts socio–environnementaux l'un des fils conducteurs des futurs travaux de recherche post–habilitation.

La question des territoires métropolisés ou en métropolisation à faible densité de population évoquée en 2001 va faire l'objet d'une étude approfondie sur l'un des trois territoires étudiés après le doctorat : la Lituanie. Il va en émerger le concept de structure métropolisée sans métropolisation.

La dimension normalisatrice et comparatiste des recherches postdoctorales sur la métropolisation, tient également, en grande partie, des jalons, questions et réflexions posées en doctorat. Nombreux sont les auteurs et les institutions qui cherchent depuis plus de trente ans, voire plus, à normaliser, rendre comparable les bases de données démographiques sans pour autant arriver à un résultat tangible. Seule l'une des quatorze Agences de renseignement étasunienne est arrivée depuis le milieu des années 1990 à rendre partiellement comparable des territoires sur une série de quatre vingt onze critères, pour l'essentiel, qualitatifs. Si l'on prend le critère démographique comme l'une des variables d'analyse comparative de la métropolisation, le problème reste entier. Seule l'ORNL est actuellement capable de générer, créer, développer, mettre à jour annuellement une base de données géographiques mondiale normalisée, comparable sur l'urbanisation, les densités et les répartitions de population sur la base des images fournies par le satellite météorologique DMSP. Le reste s'apparente à des « bricolages » méthodologiques plus ou moins réussis, plus ou moins pertinents

au regard de la réalité géographique. Seuls les supports images donnés par la télédétection spatiale peuvent permettre la construction d'analyses comparées de la métropolisation. Les propos peuvent être perçus comme radicaux par certains. Mais il n'en est rien. C'est l'absence d'analyse réflexive sur la qualité et les limites des données, des indicateurs et des méthodologies qui est souvent au cœur du problème : la capacité à mesurer une réalité géographique, à extraire des marqueurs et des indicateurs géographiques d'une réalité biophysique, celle du territoire et de l'espace géographique, à la confronter à une réalité décrite, figurée, modélisée, interprétée. Les bases de données de la CIA illustrent bien la difficulté à rendre comparable des bases de données démographiques et socio-économiques.

1.2.3. 2001-2010 : UNE MEME DEFINITION

L'évolution de la définition donnée au phénomène de métropolisation entre 2001 et 2010 est relativement faible. C'est surtout la caractérisation par télédétection et la modélisation spatiale en SIG du processus de métropolisation aboutissant à l'émergence de territoires métropolisés qui ont été porteuses d'avancées.

Dans la définition écrite en 2001, la métropolisation apparaît comme « un stade de l'évolution structurelle des territoires urbains » contextualisant de fait, dans l'espace et le temps, le phénomène par rapport à d'autres formes de territorialisations qui l'ont précédé. La métropolisation est définie comme un stade particulier de la territorialisation de l'espace géographique. La lecture géopolitique qui a été faite de la métropolisation a mis en avant la dimension géostratégique du contrôle des territoires en métropolisation ou métropolisés, mais également des méthodologies et des systèmes géomatiques à développer pour les analyser, les surveiller, comprendre leurs transformations et les possibles conséquences. Elle a également mis en évidence le cadre idéologique et théorique dans lequel s'insère l'analyse des processus de métropolisation. La métropolisation est présentée par certains auteurs comme un stade de l'évolution de la territorialisation sur le temps long, celui de l'anthropisation de l'espace géographique. La périodisation du processus de territorialisation de et par l'Homme dont la métropolisation constitue le stade actuel est difficilement défendable au regard de l'Histoire. Elle doit être comprise comme un projet heuristique concourant à la production de connaissances géographiques sur les territoires. La métropolisation ne marque pas la fin de l'urbanisation mais bien l'émergence de nouvelles formes urbanisées d'organisation des territoires.

La question de la mobilité est analysée en doctorat sous l'angle de la logique postmoderne non pas comme des éléments structurant et organisateurs des territoires métropolisés mais comme des éléments contribuant à une certaine forme d'identification et d'appartenance vécue au territoire métropolisé : les infrastructures liées à la mobilité jouent un rôle essentiel dans le vécu et la

perception que se font les individus de la métropolité. L'identification par télédétection des mobilités semble difficile, tout comme l'impact des TIC. Les infrastructures des mobilités jouent un rôle essentiel dans la diffusion de l'urbanisation et la structuration des territoires métropolisés. La question qui est posée est celle de leur impact réel sur l'organisation des territoires. Elle est à ce jour faible, voire nulle.

« [...] *Qu'est ce qui singularise le territoire métropolisé et qui en fait un enjeu stratégique, politique, sociétal, militaire et humain, un objet d'étude, un projet et un enjeu de société ? Hideteso Kato (Ferrier, 1993) part du principe qu'un territoire est métropolisé lorsqu'on peut disposer du même niveau de services sur l'ensemble du territoire. Est-ce pour autant suffisant ? Sur un territoire présentant ces caractéristiques, comme en Norvège ou en Suède, les infrastructures de communication offrent cette caractéristique. Le territoire peut être considéré comme structurellement métropolisé. Intègre-t-il pour autant des formes de métropolités ? Le fait de vivre la métropolisation, le fait d'utiliser les infrastructures « métropolisantes » a, en soi, un caractère discriminatoire. Celui de l'accès par les populations les plus démunies à la métropolité, celui de l'intégration ou non du caractère techno-culturel de la métropolité. Le fait qu'un territoire soit urbain, en métropolisation ou métropolisé, ne change fondamentalement pas sa fonction géostratégique. Ce sont les lieux où se concentrent des pouvoirs politiques et économiques, les lieux des dynamiques culturelles et sociétales. La métropolisation ne fait que les renforcer, d'autant plus que la présence de réseaux de communications, d'informations et de télécommunications ne fait que raffermir les potentialités économiques, politiques, culturelles de ce type de territoire, voire dans bien des cas accentue son influence. Les territoires métropolisés rassemblent, à l'instar des agglomérations urbaines, sur une portion donnée de l'espace géographique l'ensemble des infrastructures qui présentent un caractère stratégique pour mener un conflit, contrôler un territoire ou asseoir le développement économique, politique, culturel et humain d'une société. À la différence des autres formes urbaines comme les agglomérations urbaines, les territoires métropolisés se caractérisent, à la fois, par la diversité de leur morphologie, des structures et des entités géographiques qui les caractérisent. Ils sont marqués par des interconnexions tri–niveaux de type « local–régional–global » qui prennent diverses formes par la présence d'infrastructures de télécommunications et de communications assurant ces interconnexions au sein d'un même territoire métropolisé et avec d'autres. La présence de ces infrastructures pourrait offrir une forme d'équité géographique d'accès des populations aux services, toute théorique. Le territoire métropolisé se distingue aussi par l'émergence d'une forme de territorialité particulière : la métropolité. Elle résulte d'un nouveau rapport psychosociologique au territoire des individus. Elle se caractérise par un ensemble d'éléments géographiques, sociologiques et démographiques que quatre auteurs, Jean-Paul Ferrier, François Moriconi-Ebrard, Mike Savage et Alan Warde résument bien. Ces auteurs ont, comme point commun, de rapprocher le territoire métropolisé à une forme particulière de structuration du territoire (certes polymorphe) dans laquelle les réseaux de communications, les infrastructures liées à la mobilité jouent un rôle essentiel dans le vécu et la perception que se font les individus de la métropolité. Ils présentent tous la métropolisation, à l'instar de Mike Savage et d'Alan Warde (Savage, 1993), comme un stade de l'évolution structurelle des territoires urbains.*

Un autre point de convergence est la périodisation et la contextualisation temporelle dans l'espace du territoire métropolisé par rapport à des formes de territorialisation qui l'ont précédé. L'objet « territoire métropolisé » est souvent replacé dans un contexte non pas historique mais topochronique et idéologique (Savage, 1993) (Ferrier, 2000) ou dynamique (Moriconi–Ebrard, 2000). [...] » (Gadal, 2001).

1.2.4. UNE DEFINITION DE LA METROPOLISATION

La métropolisation est l'un des phénomènes géographiques les plus importants observé depuis plus de quarante ans. Elle désigne le processus actuel de transformation des territoires aux échelles locale et régionale, au niveau des individus, des formes d'habitat, des modes de vie et de leur mise en interconnexion avec les autres territoires métropolisés générant, de fait, une *trans–territorialisation* des échanges, de l'information, des biens et des personnes. Le caractère territorialement circonscrit de la métropolisation en fait un processus globalisé, c'est-à-dire, confiné en lieux–territoires particuliers.

La modification de la répartition spatiale des populations sur l'espace géographique est marquée par des dynamiques de relocalisation, des déconcentrations des agglomérations vers leur périphérie sur des distances de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres. Son caractère global concernant un certain nombre de lieux, touchant plus de 60% de la population mondiale en fait un phénomène géographique mondialisé, à la fois résultante spatiale et moteur de cette dernière.

Elle se caractérise physiquement par l'apparition d'espaces périurbains, de villes secondaires, spatialement discontinues, territorialement intégrées grâce aux réseaux de communication. Ils sont, de fait, un marqueur spatial fort, observable et mesurable par télédétection, modélisable en SIG, mettant en évidence la transition sociétale et les transformations territoriales en cours appelées métropolisation, aboutissant à l'émergence de nouvelles organisations, formes et structures géographiques : les territoires métropolisés.

La métropolisation, c'est-à-dire, la transformation sociétale, technologique, économique, démographique et urbaine des territoires, se traduit selon le mode d'analyse géographique par :

- ✓ Un processus de polarisation économique, humain et politique aux échelles transnationale et nationale.
- ✓ L'émergence de territoires urbanisés spatialement discontinus et poly–intégrés à l'échelle régionale du fait de la recomposition territoriale en cours.
- ✓ Des territoires fonctionnellement et spatialement hétérogènes et ségrégés. Il s'y côtoie des espaces paysagers et fonctionnels divers accentuant l'aspect discontinu des territoires métropolisés : terroirs agricoles, centres urbains, espaces naturels, zones de loisirs, etc.

- ✓ Une recomposition spatiale des territoires essentiellement de nature démographique et économique qui s'inscrit physiquement aux échelles méso–régionale et locale par une croissance et un étalement urbain généralement discontinu, produisant généralement des formes urbaines « aréolaires » ou « linéaires » en « réseaux ».
- ✓ Les pôles secondaires urbains constituent le moteur de la transformation des structures méso–métropolitaines à l'échelle régionale et locale induites et induisant de nouvelles formes de territorialisation.
- ✓ Elle se traduit à l'échelle individuelle et collective par l'apparition d'un nouveau rapport à l'espace, au territoire et au temps : la métropolité.
- ✓ Elle est généralement rapide, massive, notamment dans les pays en développement, en transition et en phase de transition démographique.

Les constructions clandestines constituent, au moins pour un tiers, le moteur de la croissance urbaine dans les pays en développement. Elles tendent à accentuer la scission entre les lotissements légaux et les quartiers informels. C'est en quelque sorte une marque distinctive des pays en développement. La généralisation de l'habitat informel et l'une de ses formes, les bidonvilles, renforcent la dimension ségrégative et uni–fonctionnelle de chaque portion du territoire métropolisé. Elle apparaît comme l'une des formes d'exacerbation de la division socio–spatiale des territoires métropolisés. Elle est, dans le même temps, l'expression des phénomènes de métropolisation dans les pays en développement où territorialisation se conjugue avec des formes illégales de périurbanisation. Au même titre que ce qui se produit dans les pays en développement ou en transition, ces processus témoignent, sous une apparence paupérisée, de l'accès de certaines populations à un type de métropolité : une métropolisation du pauvre.

1.2.5. LA METROPOLISATION AU REGARD DES CONTEXTES GEOCULTURELS ET DES GEOGRAPHIES

La définition de la métropolisation donnée dix années après la soutenance du doctorat est somme toute descriptive et relativement classique par son caractère empirique. Elle tient aux résultats obtenus en réponse aux problématiques qui ont soutenu l'analyse des processus de métropolisation : analyse temporelle sur vingt à cent ans, sur des territoires de plusieurs centaines de kilomètres, littoraux ou « hinderlandisés » donnant naissance à des corridors urbains de développement poly–intégrés, à différentes échelles d'analyse (du bâti au pays), sur des espaces géoculturels très différents : Afrique de l'ouest, Inde du nord-ouest, Pays baltes. Elle s'appuie sur l'évolution des inscriptions biophysiques de la métropolisation. Ce n'est plus une préoccupation géopolitique et géostratégique qui guide les recherches mais l'étude au sens strict du phénomène géographique de métropolisation à travers le Monde.

L'idée de travailler sur la métropolisation dans trois contextes géoculturels différents et géographiquement variés s'est faite sur une base d'observations empiriques par télédétection et de modèles géographiques et spatiaux normalisés en SIG. L'objet est et était de comprendre la part jouée par la mondialisation et celle occupée par les particularismes locaux et régionaux, la diversité de ses inscriptions territoriales. De comprendre si le phénomène de métropolisation, pris dans des contextes géographiques différents, a en lui, les germes d'une certaine forme d'universalité dans la territorialisation de l'espace et dans les modes de territorialités (modes de vie métropolisés), en dépit des systèmes politiques, culturels et idéologiques différents.

Les recherches menées depuis quinze ans sur la métropolisation montrent que ce n'est pas un processus géographique spécifique à la France, aux USA ou à l'Europe occidentale. Ce qui caractérise la métropolisation, c'est son caractère transnational, transcontinental et transculturel. Son caractère transculturel et transnational ne semble pas le fait d'un système politique particulier. Il s'accommode des régimes démocratiques ou dictatoriaux, qu'ils soient de nature marxiste, théologique ou fasciste. La métropolisation n'est pas imputable à un système économique particulier (Ascher, 1995). Si la métropolisation n'est pas le fait de régimes politiques particuliers, force est de constater que les modèles d'économies planifiées, à l'instar de l'ex Union soviétique, ont intégré dans les plans d'urbanisme les processus de métropolisation avec, en filigrane, une politique délibérée de limitation de la croissance urbaine.

L'approche régionale et comparatiste développée à l'échelon global est possible grâce à la géomatique et à sa capacité à normaliser des analyses, des résultats sur l'ensemble de l'espace géographique. Elle a permis d'analyser au niveau local, métropolitain et régional trois ensembles géoculturels en phase d'urbanisation et ou de métropolisation. L'étude du caractère global, plutôt que mondial, du processus de métropolisation est accentuée par un autre facteur : les fortes disparités en termes de niveau de croissance et de développement, un pays, la Mauritanie parmi les moins avancés, deux régions en voie de développement, l'Afrique de l'ouest et l'Inde, dont l'une connait une croissance économique et industrielle forte, un pays en transition, la Lituanie, qui a connu coup sur coup une très forte croissance économique (entre 7% et 9% par an entre 2004 et 2008) et un plongeon abyssal de son PIB (-24%) faisant revenir le pays fin 2008 au niveau de 2004.

L'analyse régionale comparée de la métropolisation présente un intérêt particulier dans le sens où chacun des trois territoires dans lequel les recherches ont porté, sont marqués par de fortes disparités en termes de niveau de vie, de croissance et de développement.

La double entrée choisie dans l'analyse de la métropolisation, la différenciation géoculturelle et les niveaux de développement s'ajoutent aux travaux menés sur la métropolisation depuis le doctorat tout en élargissant les aires d'étude à d'autres continents et territoires. Depuis 1998, les processus de métropolisation

ont été étudiés sous trois angles distincts et six territoires différents si l'on inclut les travaux effectués sur la région de Bergen en Norvège, des Yvelines (Ile-de-France), d'Aix-Marseille et d'Avignon dans le sud de la France.

- ✓ Entre 1995 et 1998, puis de 2005 à 2009, la métropolisation a été étudiée sous l'angle des transformations des territoires agricoles périurbains (région d'Aix-Marseille et d'Avignon, département des Yvelines, de Jaipur).
- ✓ Entre 1998 et 2001, la métropolisation a été analysée sous le filtre de la géopolitique et des questions de défense. Qu'est ce qui fait que la Métropolisation est un enjeu stratégique, militaire, politique, sociétal et humain ?
- ✓ Entre 2002 et 2010, la modélisation de l'émergence du phénomène de métropolisation à travers l'étude de ses dynamiques territoriales, de ses inscriptions spatiales et territoriales sur trois espaces géoculturels différents a été le fil conducteur des recherches engagées.

Les méthodologies développées ne vont plus uniquement se concentrer sur les techniques de reconnaissance, d'identification et d'extraction d'informations géographiques caractéristiques de la métropolisation. Elles vont intégrer la dimension temporelle du processus de métropolisation mais également son aspect dynamique.

1.3. STRUCTURES ET DYNAMIQUES SPATIALES DE LA METROPOLISATION

1.3.1. INSCRIPTIONS SPATIALES DE LA METROPOLISATION

UNE ANALYSE DESCRIPTIVE PAR TELEDETECTION

L'analyse et la modélisation de l'inscription physique de la métropolisation sur l'espace géographique renvoient aux dynamiques sociétales, démographiques et économiques en cours. L'apparition de structures métropolisées polycentriques, de plus en plus complexes spatialement, imbriquées, fragmentées, concentrées, étalées, continues, discontinues ne renvoie plus aux « filtres » d'analyse spatiale basée sur le modèle centre–périphérie ou sur l'opposition entre espace rural et espace urbain. On assiste à l'émergence de nouveaux modèles spatiaux d'organisation et d'utilisation des territoires.

Les démarches par télédétection spatiale se prêtent bien à l'analyse de l'évolution des territoires urbains, mégalopisés ou en métropolisation. Cela tient au fait que les approches par télédétection spatiale et aéroportée se basent, pour l'essentiel, sur la détection, la reconnaissance et l'identification des éléments et des structures bâties, des réseaux et infrastructures de communication, des espaces

verts, de l'étude de l'environnement, etc. Les images de télédétection donnent une mesure de l'inscription physique des formes de métropolisation sur le territoire à travers la reconnaissance des surfaces bâties, de l'occupation du sol, etc.

Si on se limite à une analyse descriptive, les phénomènes de métropolisation sont le fait de l'extension contiguë des villes, villages et agglomérations, de la constitution de réseaux d'ensembles urbanisés distants par la logique d'intégration régionale en cours dans lesquels les infrastructures de mobilité et probablement les TIC forment le squelette (tenseur), la matrice structurante des territoires métropolisés ou en constitution.

La télédétection de la périurbanisation est un des éléments géographiques qui permet d'identifier l'apparition d'un processus de délocalisation et de déconcentration des populations en Europe et dans nombre de pays en transition ou en développement. Elle est le marqueur spatial et géographique majeur de l'émergence d'un processus de métropolisation. La périurbanisation peut conduire à l'apparition de lieux pourvus d'une certaine « centralité » de par les services, les équipements, les infrastructures, leur localisation et positionnement dans le territoire métropolisé. Cela peut être de nouvelles villes, d'anciens villages au niveau d'accessibilité élevé qui, comme le long de l'axe Delhi–Mumbai, peuvent être localisés le long de routes ou de carrefours. La périurbanisation produit des formes d'organisation polynucléaires qui sont, dans certains cas, comme sur la région de Delhi, planifiées.

METROPOLISATION ET URBANISATION

L'inscription physique, dans l'espace géographique, reste l'objet urbain, que ce soit un centre urbain ou des habitats dispersés. L'idée de métropolisation ou, plus exactement, celle de l'émergence d'une forme nouvelle de structuration des territoires, est explicitement apparue aux Etats-Unis dès les années 1940 avec SMSA, avec les travaux de Jean Gottmann sur la Mégapolis Est-Etasunienne et dès 1974 chez les géographes télédétecteurs ayant accès aux données satellites militaires DMSP. Les dynamiques de métropolisation s'inscrivent comme des faits qui, spatialement, ont une base urbaine. Leur détection et analyse par télédétection spatiale sont plus faciles et l'objet géographique « bâti » constitue l'observable d'analyse, de modélisation et d'interprétation de base. Elle peut être également source de confusion avec les dynamiques de mégapolisation qui, tout comme les précédentes formes de métropolisation, s'inscrivent physiquement sur le territoire à travers l'objet urbain et s'identifient en télédétection par la reconnaissance de ces mêmes objets. **Métropolisation et mégapolisation génèrent cependant des formes spatiales d'urbanisation et de structuration des territoires différentes**. Cet apport contredit ou plutôt marque une évolution dans la compréhension des mécanismes de la métropolisation et de leur inscription sur le territoire. On notera, également, que contrairement à ce qui avait été affirmé dans le mémoire de doctorat en 2001, « [...] *La difficulté*

d'identifier des formes de métropolisation par télédétection sur les régions faiblement urbanisées et/ou faiblement peuplées est, a priori, délicate. [...] *L'objet urbain, tel qu'il est utilisé, c'est-à-dire, comme descripteur spatial de la métropolisation au Maroc ou dans la plupart des pays développés, ne l'est assurément pas sur des territoires peu urbanisés* [...] » (Gadal, 2001) **s'est révélé infondé. Il est tout à fait possible d'identifier le caractère métropolisé d'un territoire peu densément peuplé.**

La rapidité et l'intensité du processus de métropolisation rendent caduque l'utilisation de données statistiques, à moins bien sûr, de pouvoir disposer de bases de données mises à jour annuellement. Ce qui est plutôt rare, voire du domaine de l'inexistant. Les images de télédétection spatiales ou aéroportées constituent, actuellement, la seule base géo–informationnelle mobilisable qui peut être intra–annuellement mise à jour et qui rend compte de l'état des structures et des dynamiques de métropolisation.

Dans les territoires métropolisés en cours de formation, c'est la production de l'espace bâti qui constitue le processus de développement le plus remarquable. Il est le marqueur géographique et spatial des formes d'anthropisation, c'est-à-dire, de territorialisation de l'espace géographique (ou plutôt de certaines de ses portions). Le bâti, les espaces bâtis sont l'observable, à la fois géographique et image par télédétection, de l'urbanisation. Ils sont le moteur à la fois social, physique et géographique des transformations de l'espace géographique qui peuvent être télé–détectées, mesurées, analysées, modélisées, formalisées. Dans le cadre de la mégapolisation, l'urbanisation est tirée de la migration des populations vers les agglomérations. Dans le cadre de la métropolisation, les transformations majeures des territoires se font dans les espaces urbains existants. Il en résulte une redistribution des lieux de vie des populations au sein d'un territoire déjà urbanisé et de certaines activités économiques dans lesquelles les mobilités intra–urbaines sont un des ciments de la cohésion et de l'existence même du territoire. On remarquera que dans le cadre de processus étatisés d'aménagements planifiés, les effets de taille engendrés par des territoires métropolisés pluri–millionnaires ont amené des politiques territoriales visant à accompagner, voire induire, structurer et organiser le processus de délocalisation des personnes et des activités. Elles se traduisent par la création de villes « satellites » qui, dans le cadre de plans régionaux d'aménagement, visent à promouvoir des pôles de développement économiques autonomes en termes d'emplois et de services (région parisienne, Delhi, Mumbai). Certaines périurbanisations planifiées peuvent être de grande envergure comme à Delhi (Dupont et al., 2000).

Sans pour autant entrer dans une macro–démarche comparatiste nord-sud peu porteuse de sens et d'intérêt au regard de la globalité du phénomène de métropolisation et des ses interactions avec son hinterland régional et ses particularismes géographiques locaux, on note quelques subtilités. Différences qui sont pour l'essentiel dues à la multiplicité et à la superposition des processus d'urbanisation touchant sur de mêmes territoires et de mêmes périodes. S'entremêlent des dynamiques de mégapolisation liées à l'afflux massif de population pour l'essentiel rurale, de métropolisation avec la redistribution spatiale des personnes, la constitution de réseaux territoriaux multi–échelles intégrés, des processus de ségrégation socio–spatiale marqués par les masses de population de plusieurs millions de personnes en mouvement sur des temps très courts et des territoires touchés par des taux élevés de pauvreté.

L'axe Kenitra–Rabat–Casablanca, la Métropole Atlantique du Maroc (MAM), est symptomatique de l'existence de deux processus démographiques et géographiques disjoints : la mégapolisation liée à l'exode rural, phénomène saisonnier lié à la sécheresse, et la métropolisation. En un siècle, le royaume du Maroc a connu une croissance exponentielle de sa population, celle-ci passant en 1913, de trois millions d'habitants à environ trente millions en 1998. Elle est la conséquence de la transition démographique. La phase de transition démographique qui est encore en cours s'est traduite spatialement et géographiquement tout au long du XX^{e} siècle et de manière plus prononcée ces trente dernières années par une forte croissance urbaine qui a été, notamment, en partie alimentée par l'exode rural. Ce processus de transition démographique est marqué par deux transformations géographiques qui se déroulent de manière synchrone : une densification des centres urbains préexistants qui est associée à une extension urbaine et à l'apparition de nouveaux centres urbains, l'ensemble poussant vers une conurbation littorale de 150 km de longueur suivant un axe Nord-Sud et d'une profondeur variant de 10 à 30 km.

Dans la plupart des pays occidentaux on note une perte ou une stagnation de la population des agglomérations au profit d'une relocalisation d'une partie des habitants sur des territoires périurbains ou distants de plusieurs dizaines de kilomètres. Perte de population qui s'accompagne d'un processus de gentrification, de sociabilisation et de réhabilitation historique et culturelle des quartiers historiques.

Gentrification des centres historiques qui concerne, pour l'essentiel, les couches sociales aisées, les familles mononucléaires et les ménages unifamiliaux et qui va se traduire dans les années à venir par une requalification du terme.

Selon le contexte et le modèle d'analyse dans lequel nous nous plaçons, la métropolisation en Europe et en Europe du nord s'est faite sur une période de trente ans par phases. Ces phases s'inscrivent physiquement dans le temps, l'espace et le territoire. L'émergence des territoires métropolisés en Europe et aux Etats-Unis forme des ensembles régionaux intégrés qui prennent des sémantiques diverses reflétant des aspects particuliers et structurant de la métropolisation : « villes–régions » en République fédérale allemande, *Daily Urban System* aux USA, etc.

« [...] *La métropolisation nord-américaine s'exprime par une augmentation des migrations alternantes et un allongement des distances parcourues chaque jour (commuters) ; les travailleurs des métropoles colonisent ainsi de nouvelles zones rurales et de petites villes périphériques, bien au-delà des suburbs traditionnels, formant de news burbs dits exurbs (60 millions d'américains vivent dans les exurbs)* [...] » (Ascher, 1995).

Si en termes urbanistiques les composantes urbaines des territoires métropolisés tendent à se ressembler – mêmes lotissements, mêmes entrées de villes, mêmes centres commerciaux, mêmes espaces verts, etc. – les espaces les composant, urbains, agricoles, naturels, etc. sont variés, hétérogènes, souvent discontinus. L'hétérogénéité des structures spatiales, des territoires et des paysages, renvoie au processus intégrateur de la métropolisation par sa capacité à associer et à structurer (par les mobilités) des territoires plus ou moins agglomérés ou éclatés, hétérogènes, polarisés ou segmentés, denses ou étales. Ils regroupent quelques centaines de milliers d'habitants à plusieurs dizaines de millions.

La métropolisation, au-delà d'une certaine diversité, s'étend à l'ensemble de l'Europe, qu'elle soit occidentale, orientale, centrale, méditerranéenne, nordique, postcommuniste, etc. Ses évolutions, ses formes à travers leurs inscriptions spatiales sont l'objet d'interrogations, d'analyses, de diagnostics sur les impacts, les conséquences sociétales, environnementales et politiques. Constats qui font l'objet de débats théoriques sur les configurations spatiales à privilégier, les aménagements à développer et les investissements à faire. Quelles formes spatiales de métropolisation doit on promouvoir au regard des impératifs sociétaux qu'ils soient de nature politique, environnementale, sociale, économique ou idéologique ?

Le concept de métropolisation renvoie aux mutations spatiales, institutionnelles, économiques et sociétales en cours. La métropolisation se confond avec la transnationalisation des échanges des biens, des personnes et de l'information. Dans nombre de régions, l'émergence de la métropolisation se traduit par la création de nouvelles entités politico–administratives collant à la réalité du phénomène géographique. Elle se traduit par le développement de territoires de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres poly–intégrés, discontinus, fragmentés socio–économiquement.

1.3.2. LES MOBILITES : TENSEURS DE LA COHESION TERRITORIALE, CATALYSEURS DES DISCONTINUITES SPATIALES

MOBILITES ET RECOMPOSITION TERRITORIALE

L'analyse de la métropolisation à travers l'étude des mobilités est importante. Les mobilités des personnes, mais également des biens matériels et immatériels à travers les flux d'information, les échanges, les infrastructures de communication et de transport rendent compte de l'intensité du niveau de cohésion spatiale d'un territoire métropolisé, le plus souvent éclaté territorialement et spatialement, hétérogène et discontinu. La modélisation des mobilités intra–métropolitaines donne, à travers le degré et la complexité des interactions spatiales, le niveau d'intégration territoriale et les limites du territoire métropolisé. Les mobilités sont le « fait social fondateur des organisations métropolitaines contemporaines » (Dupont et al., 2000). Elles permettent de comprendre leur rôle central joué dans la recomposition des territoires métropolisés par l'étude des pratiques de déplacement des habitants et leur articulation avec celle des autres acteurs sociaux, économiques, politiques. Les mobilités des biens et des personnes montrent les mutations socio–spatiales et géo–économiques intra–métropolitaines en cours. La forme et l'intensité des mobilités intra–métropolitaines sont une condition majeure de l'existence et de la cohésion du territoire métropolisé. Les infrastructures de transport infra–métropolitaines jouent de fait un rôle clé dans la capacité à structurer, à lier, à organiser et intégrer les différentes composantes spatiales socio-économiques du territoire métropolisé. Les modes de transports collectifs et individuels, comme les technologies de l'information et de la communication (TIC), concourent à la recomposition des territoires urbains, non urbains et à la métropolisation.

Les transports sont une des conditions de la cohésion intra–métropolitaine dans des territoires souvent multiples, *aréolaires* et discontinus. Ils sont un facteur majeur de son attractivité et de sa compétitivité. Si l'on se place dans une logique d'analyse systémique, le seuil au-delà duquel on risque une situation de congestion des réseaux de transport, c'est-à-dire, de limitation des mobilités, peut conduire à l'émergence de nouvelles formes territoriales consécutives à l'éclatement du territoire et au délitement de ses infra–relations spatiales. Les infrastructures et les modes de transport ont un rôle ségrégatif mettant à mal la cohésion territoriale d'un espace urbanisé ou métropolisé de par sa capacité à générer des territoires spatialement discontinus.

DISCONTINUITES ET TERRITOIRES AREOLAIRES

L'émergence, dans la plupart des cas, d'espaces urbains discontinus distants de quelques kilomètres à plusieurs dizaines de kilomètres, est un marqueur de la métropolisation mettant en évidence le processus de desserrement urbain, de déconcentration et de relocalisation des populations. Ce processus de transformation spatiale, caractérisé notamment par la dé–localisation des populations des centres urbains vers ces nouveaux territoires urbains, conditionne bien souvent l'émergence de territoires métropolisés. Ces marqueurs spatiaux de la métropolisation (territorialisation : des formes d'habitats et de modes de vie métropolisés) sont liés au développement des infrastructures de transports collectifs et individuels comme les réseaux ferrés et autoroutiers. Ils favorisent, par la structure même des modes de transports linéaires et nodaux (stations, échangeurs) des mobilités nodales, discontinues de lieux à lieux (de points à points) produisant de nouvelles formes d'organisation des territoires aréolaires, discontinus, marqués par l'émergence de nouveaux lieux–urbains interconnectés. Le développement des modes de transports rapides accentue le développement de ces formes d'organisation territoriale, élargissant à la fois l'aire (d'influence) du territoire métropolisé, renforçant les discontinuités spatiales et de l'urbanisation par les « effets tunnels » induits par les mobilités des navetteurs (*commuters*). L'allongement des déplacements urbains quotidiens, l'apparition de nouveaux lieux urbains (zones d'activités, industrielles, d'habitats) contribue à l'élargissement des territoires métropolisés et à des formes de segmentation sociale et spatiale toujours plus marquées.

Les modes d'organisation des transports et leur inscription dans l'espace sont liés aux développements technologiques autour de trois vecteurs : vitesse, interconnexion et inter–modalité. Ils conduisent actuellement à des formes de structuration territoriales polarisées, discontinues, dispersées et plus ou moins maillées qui s'organisent autour des réseaux de transports, notamment et plus particulièrement, dans les pays en développement où les réseaux de transports sont limités. Les réseaux autoroutiers et ferrés structurent la croissance et l'étalement urbain, façonnent l'organisation des territoires urbains et les formes de métropolisation.

MOBILITE ET GLOBALISATION

A l'échelle globale, celle des interrelations transnationales ou plutôt trans–territoriales entre les régions métropolisés, ce sont les aéroports et les ports qui jouent un rôle fondamental dans les échanges de biens, d'informations et les mobilités. Ce sont, d'un point de vue géographique, des interfaces, des lieux de passage, de transition, de territoires à d'autres territoires, de lieux à lieux. Ils marquent, à la fois, la frontière et les lieux de transportation entre deux portions

de l'espace géographique. La dualité fonctionnelle, la limite et la mobilité des deux infrastructures, les ports et les aéroports, sont dans le même temps des lieux–objets géographiques intégrateurs des territoires, des populations et de l'économie par leur capacité à lier, échanger, transporter, transmettre. Ces objets géographiques d'intégration territoriale ne marquent pas forcément la limite externe des espaces métropolisés. Ils modifient physiquement, spatialement, la frontière entre les territoires. Ils sont une interface qui est localisée à l'intérieur même du territoire métropolisé.

Les aéroports apparaissent comme des plates-formes, des hubs multi–niveaux liant les territoires métropolisés entre eux, tout autant que ses composantes régionales et locales au Monde, c'est-à-dire, aux autres lieux globalisés issus de la mondialisation des mobilités, des hommes, des biens et des territoires. Les ports sont essentiels dans l'organisation des échanges des biens et des ressources naturelles. Ils sont l'une des colonnes vertébrales majeure des échanges économiques mondialisés. L'impact des ports, dans l'organisation et dans la structuration des territoires métropolisés aux échelles régionale et nationale, est majeur dans un grand nombre de pays. Une majorité de territoires métropolisés sont des régions urbaines littorales ou situées le long des hinterlands portuaires formant des corridors de métropolisation de plusieurs dizaines à centaines de kilomètres.

Les ports et les aéroports concourent à une centralisation des flux de mobilité des biens et des personnes. Les territoires métropolisés apparaissant au niveau global comme des espaces urbains polarisés autour de certaines métropoles et fonctionnant en réseau. Elle se traduit par l'émergence de « nouvelles » hiérarchies et organisation urbaine à l'échelle du Monde, à l'instar de celle proposée par le réseau *Globalization and World Cities Network* (GaWC, 2010 http://www.lboro.ac.uk/gawc/) ou dans l'ouvrage collectif « Les très grandes villes dans le Monde » (Bailly et al., 2000). Tout autant que la pluralité sémantique du concept de Métropolisation, les exemples de catégorisation, de classification et de hiérarchisation des villes mondialisées sont nombreux. Ils dépendent des méthodes, des référents théoriques, des variables choisies et des données utilisées.

1.3.3. RELOCALISATION DES POPULATIONS ET RECONFIGURATION TERRITORIALE

TRANSITION DEMOGRAPHIQUE

L'analyse de la répartition des populations est actuellement un des critères les plus pertinents pour mettre en évidence la phase de desserrement de la population. Cette phase de délocalisation et de déconcentration des populations, mais également d'unités de production et de services est le marqueur

géographique et spatial premier de l'apparition du phénomène de métropolisation. Il engendre des processus d'étalement urbain et de périurbanisation. La croissance démographique des territoires métropolisés est avant tout endogène. Elle est partiellement alimentée par l'exode rural dans les pays en développement, pas dans les pays développés. La triple transition démographique, géographique et sociétale a des conséquences socio–environnementales plus ou moins importantes : bidonvilles, habitats informels, pression sur l'environnement, exploitation des ressources naturelles.

La métropolisation se traduit par un processus de « relocalisation » des populations, processus dont les dynamiques géo–démographiques des pays en développement peuvent être associées à d'autres comme les phénomènes d'accumulation de populations issues de l'exode rural. Sans entrer dans une présentation simpliste des dynamiques de métropolisation sous l'angle de la démographie, ces processus se distinguent dans nombre de pays en développement par des dynamiques d'accumulation de personnes avec l'émergence de mégapoles multimillionnaires qui se conjuguent à des dynamiques de métropolisation. Nous nous trouvons, en sus de l'ampleur des dynamiques spatiales en raison de la masse des populations en jeu, face à des phénomènes différenciés de restructuration territoriales qui se superposent spatialement et temporellement.

Ce processus de transformation géographique à la fois sociétal, territorial et économique est souvent appelé **transition de mobilité, transition urbaine, transition économique.** C'est un processus démographique, économique et sociétal endogène, c'est-à-dire, propre (confiné) au territoire métropolisé en devenir. L'apport de l'exode rural à la croissance urbaine et aux transformations territoriales est faible. Il faut cependant nuancer cet aspect, notamment dans les pays en développement. Les phénomènes de métropolisation se mélangent aux processus de mégapolisation. On assiste dans de nombreux pays africains à des processus d'accumulation de population (Rakodi et al., 1997), (Dureau, 2000), plus que de recomposition géographique. Ces phénomènes démographiques tendent cependant depuis les années 2000 à ralentir au profit d'une dynamique de répartition des populations propre à la métropolisation. Les dynamiques d'accumulation paraissent cependant ne plus être le trait caractéristique majeur de la plupart des régions touchées par la mégapolisation, c'est-à-dire, par la concentration de population entretenue par l'exode rural, mégapolisation résultant, à la fois, de la transition démographique et de l'exode rural. Les dynamiques de métropolisation sont complexes dans les pays en développement. Il est possible d'observer simultanément, sur un même territoire, plusieurs de ces dynamiques démographiques. Les apports de population issus de l'exode rural influencent encore, pour une part, les structures et les dynamiques démographiques de la métropolisation. Elles tendent néanmoins à se rapprocher des dynamiques de métropolisation des pays développés.

La métropolisation se caractérise par des processus de transformations territoriales et de ségrégations socio–spatiales de plus en plus marqués. Elle se traduit plus particulièrement en Europe tout d'abord par :

- ✓ Une dé–densification de la population des villes centres au profit d'une relocalisation dans des espaces dits périurbains. Déconcentration et délocalisation des populations des centres qui se traduisent par l'émergence d'espaces urbanisés périurbains plus ou moins contigües caractérisant spatialement la croissance urbaine (la périurbanisation) et par le développement sur des distances allant jusqu'à une centaine de kilomètres de territoires urbains discontinus, polarisés, appelés « aréolaires ».

La métropolisation se traduit par une réorganisation « interne » au territoire urbain de la distribution des populations y habitant. La contribution des soldes migratoires externes à cette restructuration de la répartition spatiale des populations est faible. La croissance de la population est essentiellement un processus interne au territoire. Elle est concomitante à un processus de réduction de la vitesse de la croissance démographique et à un mouvement structurel de long terme constitutif de la transition urbaine et de la transition de mobilité qui ont bien été mis en évidence par Wilbur Zelinski (Zelinski, 1971) (Zelinski, 1979). Le poids relatif du solde migratoire diminue alors que le solde naturel croît. Le modèle de Zelinski comporte néanmoins un certain nombre de carences qui ont été notamment mises en évidence par Daniel Courgeau (Courgeau, 1986). Il s'agit de la non prise en compte des politiques publiques, de la dimension géographique et sociétale propre à chaque territoire, modèle limité à une seule forme de transition de mobilité peu ou pas généralisable aux dynamiques démographiques des pays en développement.

Même avec un taux de migration constant, les campagnes ne peuvent contribuer que fort modestement à la croissance démographique des territoires métropolisés.

Aux échelles régionale et locale, les processus démographiques caractérisant la métropolisation sont marqués par d'importantes différenciations fonctionnelles et des ségrégations géo–sociales internes. Les territoires de la métropolisation sont avant tout des espaces monofonctionnels, ségrégés, homogènes socialement et spatialement. Le desserrement des populations est concomitant à l'étalement urbain, à une dynamique démographique de plus en plus centrifuge et à une stagnation, parfois un dépeuplement des aires centrales qui est marqué à l'intérieur même du territoire métropolisé par :

- ✓ Une gentrification de certains quartiers des villes centres.

- ✓ La répartition spatiale et la concentration des populations selon leur statut socioprofessionnel avec, par exemple, les grands ensembles d'habitat social périurbains pour les populations précaires.

On assiste de fait à une dynamique de « périphérisation » des catégories sociales aux emplois essentiellement techniques et des classes moyennes. Ces différenciations socio–spatiales montrent de fortes inégalités de rythme entre les différents espaces métropolisés. Ces dynamiques de déconcentration démographique vers d'autres lieux urbains peuvent être en partie liées à la décentralisation des emplois autour de pôles industriels comme à Delhi ou à Mumbai.

On remarquera que le processus de dé–densification du peuplement des centres villes n'est pas propre à chaque territoire métropolisé ou en métropolisation, notamment, dans les médinas au Maghreb (Maroc, Tunisie) ou dans les centres historiques du Rajasthan comme Jaipur (Inde). Les fortes densités de population observées dans les centres historiques, comme les médinas ou les quartiers centraux, varient peu en raison de l'importance des masses de population en mouvement.

Elles ne concernent pas uniquement les classes moyennes et précaires. Si les classes sociales « modestes » sont de plus en plus excentrées, un processus identique touche les classes dites « aisées » à l'instar de la région métropolitaine de Delhi où des quartiers résidentiels de haut standing sont construits en zone péri–rurale. La rurbanisation des espaces ruraux est essentiellement liée à la recherche d'un meilleur environnement et cadre de vie : la « natururbanisation ».

Si l'on prend le cas de Delhi, on observe depuis plus de dix ans la transformation des *farms houses* en résidences principale et secondaire (Dupont et al., 2000). Les métropoles de Delhi, Jaipur (Inde), comme Vilnius, Klaïpeda (Lituanie), Riga (Lettonie), Priai (Cap-Vert), etc., se sont lancées dans d'importants programmes de réhabilitation de leurs quartiers historiques et la rénovation de certains ensembles d'habitation. L'intérêt de ces programmes de rénovation urbaine par la valorisation du patrimoine culturel, architectural, humain et historique est le développement du tourisme, de la protection de l'artisanat dans les quartiers historiques tout autant que la réappropriation du patrimoine par les habitants (Jaipur). La rénovation des centres historiques accompagne et catalyse le mouvement de gentrification. Les villes littorales étudiées en Mauritanie et au Sénégal, en Afrique de l'ouest, restent à l'écart de ce processus. Cela tient en partie à la « jeunesse » de ces villes et agglomérations, à la mauvaise maîtrise et à la mauvaise gestion de la ville, comme à l'absence d'investissements politiques et financiers (Dakar).

Dans certaines villes où l'espace disponible est limité par des contraintes physiques, comme Mumbai, on assiste à une densification des territoires péricentraux et périurbains. Densification des quartiers résidentiels qui, comme sur Casablanca au Maroc, peut être liée à la pression foncière et à l'accès aux logements qui se fait par étagement générationnel et latéral.

1.3.4. LIMITES DES APPROCHES DEMOGRAPHIQUES

Il semble important de rappeler un certain nombre de limites imposées par la structure et le contenu des données démographiques dans l'étude comparée des processus de métropolisation sur plusieurs lieux et territoires. Mis à part sur des villes particulières et non des ensembles d'agglomérations ou de territoires constituant le territoire métropolisé ou en métropolisation, l'ensemble des données sont fausses, inexactes, non spatialisées, ni même normalisées pour être comparées. Il suffit de prendre, même pas un territoire en métropolisation comme la Métropole Atlantique du Maroc, mais l'une de ses composantes, Casablanca pour avoir des statistiques de population variant du simple au double selon la source institutionnelle : de deux millions d'habitants à plus de cinq millions. Ces approches, si elles ont permis d'asseoir une vision et des discours sur la métropolisation (Radoki et al., 1997) (Gadal, 2003), se limitent trop souvent à géo–localiser et figurer par des cartographies analytiques sous la forme de chloroplèthes la population de chaque ville et non des territoires métropolisés. Les méthodologies faisant appel à des règles plus ou moins sophistiquées et réalistes d'agrégation des entités administratives (Moriconi-Ebrard, 1998) (Moriconi-Ebrard, 2000) en totale dissonance avec la réalité et l'étendue du phénomène, pour tenter de coller à la réalité géographique du processus de métropolisation, s'avèrent quelque peu factuelles : la structure des données, des modes de sondage et des entités administratives sont rarement les mêmes. La métropolisation génère des formes spatiales diversifiées dont leurs étendues, variables en fonction du lieu métropolisé, sont difficilement appréhendables en raison de la structure spatiale de l'entité administrative servant de référent géographique et spatial.

[…] *La qualité des bases de données statistiques socio-économiques et démographiques est propre à chaque pays. Trois ensembles peuvent être distingués :*

- ✓ *Les collectes de l'information basées sur des recensements exhaustifs. Elles sont généralement réalisées tous les huit à dix ans. Elles se font la plupart du temps sur la base d'unités spatiales administratives. Ces unités spatiales servent généralement de base de sondage pour des enquêtes annuelles. Ce mode de collecte d'information représente la majorité des cas.*
- ✓ *D'autres données « conventionnelles » sont produites à partir des registres administratifs comme l'état civil ou réglementaires : permis de construire, cadastre, etc. Si elles sont référencées à de mêmes concepts, ces données ont souvent des significations différentes et se réfèrent à des unités spatiales distinctes.*
- ✓ *Les données produites à partir de la télédétection spatiale donnent une description physique du territoire à partir de laquelle il est possible d'extraire des indicateurs sociaux.*

En règle générale les études sur la métropolisation effectuées à partir des statistiques démographiques et socio-économiques rendent compte des pratiques sociales des populations, de leur dynamique et de leur répartition sur le territoire. Elles permettent, également, d'aborder la dimension économique du territoire en métropolisation. Elles donnent, tout autant qu'elles façonnent, une représentation sociale, humaine et économique

des territoires métropolisés, les décrivant géographiquement en faisant ressortir les organisations territoriales. La pluralité des données, des indicateurs et des variables statistiques permet de cerner la diversité des faits humains témoignant de la métropolisation. C'est à partir de la relation variable acteurs–moteurs que les démarches statistiques exploratoires tirent et tiennent leur pertinence. Elles « collent » à une certaine réalité des pratiques et des dynamiques socio-économiques tout en les caractérisant. Elles ont, en ce sens, un caractère descriptif et heuristique. Mesure économique et socio–anthropologique, les données statistiques touchent à la fois les éléments moteurs et les acteurs de ces dynamiques géographiques. De ce fait, elles offrent au chercheur un moyen d'en cerner les facteurs explicatifs. Elles rendent cependant difficilement compte des causes qu'il faut souvent rechercher dans des facteurs socio–anthropologiques et culturels.

Depuis 1993, la CIA a mis en place un système de description et de mesure de l'état des territoires de la plupart des pays du Monde, qu'ils soient métropolisés ou non, se faisant à partir d'une série de quatre vingt onze variables démographiques, économiques, politiques, infrastructurelles, culturelles, environnementales et géographiques. Cette description statistique uni–variée se fait à trois niveaux administratifs : le territoire national, la région administrative et la commune. Chaque niveau administratif de description sur lequel s'inscrit un territoire métropolisé est associé à une échelle cartographique : le niveau administratif national est adjoint à une carte du Monde au 1 : 51 400 000e ou au 1 : 19 000 000e, le niveau administratif régional est figuré sur une carte au 1 : 250 000e et le niveau communal ou métropolitain est représenté sur des cartes d'échelles variables variant du 1 : 100 000e au 1 : 15 000e. Le mode de structuration de l'information qui a été choisi, a l'avantage de s'affranchir de tous les problèmes de standardisation et de généralisation des données entre elles. Celui-ci est d'ordre sémantique et thématique, statistique et qualitatif. Il est propre à chaque territoire. La description de l'ensemble des variables est donnée dans le Notes and Definitions of the World Factbook. Il soulève la question de la pertinence de l'échelle géographique à rendre compte des processus de métropolisation, de son choix dans les études portant sur ce processus géographique. L'intérêt de cette méthode d'analyse statistique descriptive et de ce mode de structuration de l'information est de prendre en compte un très grand nombre de variables. Elle permet d'affiner la mesure de l'état de métropolisation de la portion de l'espace géographique étudiée. La démarche emboîtée multi–niveaux rend compte du niveau de métropolisation à différentes échelles géographiques et permet de savoir si le processus de métropolisation est à un stade de développement qui est uniquement local ou qui touche l'ensemble d'une région ou d'un pays. Elle peut, en ce sens, être définie comme un indice de diffusion géographique et spatiale de la métropolisation. La normalisation de la mesure statistique rapportée au niveau national ou régional rend compte, certes, de la tendance et du niveau moyen de métropolisation d'un territoire à l'échelle géographique régionale ou nationale. Elle ne représente cependant pas le caractère différentiel du processus de métropolisation en son intra. Elle soulève les questions du choix de l'unité spatiale administrative et de l'échelle géographique les plus pertinentes.

L'information produite ou restructurée par la CIA peut-elle faire réellement l'objet de comparaisons entre les différents pays sur des bases statistiques et attributaires rendues théoriquement communes ? Elle peut, tout du moins régionalement ou entre de mêmes systèmes de collecte et de traitement statistique, à la condition que les recensements se fassent à la même date. Il est possible, moyennant un modèle d'extrapolation sémantique (Rousseaux, 2000), de comparer au niveau régional ou national les informations statistiques des trois pays du Maghreb : Algérie, Maroc et Tunisie. Les trois pays ont des systèmes de collecte de l'information statistique comparables qui sont calqués sur le modèle de l'Institut

national de la statistique et d'étude économique (INSEE). Ceci ne règle cependant pas la question de la comparabilité des sources statistiques de dates différentes, avec l'unité de collecte statistique sociale et spatiale qui est différente entre les trois pays maghrébins. Elle ne résout en outre pas la question du vieillissement de l'information géographique. La véracité de l'information statistique donnée par la CIA est liée aux problèmes de la validité des techniques de restructuration de l'information statistique et de l'exactitude des sources. La multiplicité des sources et les essais d'intégration des sources hétérogènes, de leur standardisation et de leur généralisation en une seule et même base de données mondiale ne doit pas masquer la dépendance de la CIA vis à vis des organismes de collecte, de structuration et de traitement de l'information démographique, socio-économique et géographique. L'Organisation de la sécurité et de la coopération en Europe (OSCE) est quasiment l'unique pourvoyeuse d'informations à caractère socio-économique et démographique, la NGA de l'ensemble des données géophysiques (hydrologie, topographie). Le risque de manipulation de l'information statistique est grand.

La véracité de l'information statistique donnée par la CIA est liée aux problèmes de la validité des techniques de restructuration de l'information statistique et de l'exactitude des sources. Il reste que la CIA est le seul organisme à disposer d'une base de données statistique et qualitative renseignant de manière précise les territoires. Les dynamiques sociales, économiques, politiques, démographiques, géographiques rendent caduque, au-delà de deux ans après la production des données, la description statistique des processus humains et physiques (géographiques) sans la mise en place de modèles d'extrapolation statistique ou qualitative qui se fait grâce au renouvellement des unités de collecte statistiques par tiers ou par moitié. Elle est d'autant plus inadéquate que les recensements généraux de population, agricoles, etc., ont des intervalles de temps décennaux et qu'ils ont lieu à des dates différentes dans les pays. Elle hypothèque, dans une certaine mesure, les modèles socio-économiques et démographiques globaux comparables présentés par l'UNDP, la CIA ou le Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), à l'instar de la carte de répartition des densités de population à l'échelle du globe. [...] » (Gadal, 2003).

1.4. METROPOLISATION ET DEVELOPPEMENT

1.4.1. INDICATEURS DE DEVELOPPEMENT SOCIETAL

Les recherches menées montrent que la métropolisation est indissociable de la notion de progrès. Elle est liée au développement économique et au niveau d'éducation des populations, à l'élévation du niveau de vie et aux progrès technologiques des modes de transports et de télécommunications induisant une contraction de l'espace-temps et une transformation des mobilités. La question qui se pose est de savoir si la diffusion de progrès dans le développement de l'Homme est porteuse d'aspirations communes conduisant à de mêmes formes de territorialités dont la métropolisation en est l'expression actuelle. Elle pose la question d'un sens ou d'un devenir commun de l'humanité.

Dans les différentes régions du Monde étudiées, la croissance urbaine, plus particulièrement dans les pays en développement et en transition, se traduit par

le développement et la multiplication de vastes territoires urbains qui, selon la nature démographique des processus, donnent naissance à des mégapoles et/ou des territoires métropolisés. La métropolisation est un processus géographique mondial touchant uniquement certains lieux de l'espace géographique. Elle donne naissance à des territoires métropolisés. Ces territoires de la métropolisation sont, de fait, globalisés dans le sens où ils se concentrent sur certains lieux de l'espace géographique et que chacun de ces lieux métropolisés sont reliés entre eux formant ce que Pierre Veltz appelle une économie d'archipels (Veltz, 1996) (Veltz, 2005). Chaque archipel renvoie à un lieu métropolisé, à un territoire économique par nature mondialisé et globalisé. C'est un processus globalisé dans le sens où il est difficile de penser l'évolution d'un territoire métropolisé indépendamment des autres, qu'ils soient localisés sur une même région, formant des corridors urbains, des régions métropolitaines discontinues, aréolaires, de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres le long du littoral ou des hinterlands sur des continents différents.

1.4.2. MONDIALISATION ECONOMIQUE ET METROPOLISATION

La mondialisation de l'économie stimule la mise en réseau des territoires métropolisés et des lieux de la métropolisation. Les caractères, à la fois mondialisés et globalisés de la métropolisation, sont souvent bien mis en avant, tout autant qu'en évidence par les études géo–économiques. Dans leur acception géo–économique « classique », les territoires métropolisés se définissent par le rayonnement international de leurs entreprises, des capitaux, des universités et centres de recherche, de la culture et des organes politiques nationaux ou supranationaux. Ils se définissent dans la mondialisation bien plus par ces premières fonctions que par les activités économiques, politiques, culturelles régionales dont ils tirent en partie leurs ressources et leur puissance. Cette représentation géo–économique pour la moins générique (pauvre) des territoires métropolisés s'accompagne généralement d'un certain nombre de prérogatives fonctionnelles socio-économiques incontournables : « terme généralement utilisé pour parler de villes de quelques centaines de milliers d'habitants, économiquement multifonctionnelles, en relation économique avec plusieurs agglomérations étrangères […], concentration grandissante en leur sein des populations, des activités et des richesses (Ascher, 1995) ». La vision fonctionnelle qui est le plus souvent donnée pour définir les lieux et les territoires de la métropolisation renvoie à une logique de pouvoir. Celle de l'apparition de nouvelles puissances territoriales émergentes, structurant et organisant l'espace géographique à l'échelle globale : puissances économiques, démographiques, culturelles concentrant un nombre croissant d'habitants, de richesses et d'activités économiques dans des territoires multifonctionnels, fortement intégrés à l'économie mondiale, c'est-à-dire, globalisés.

Si les territoires métropolisés concentrent une part toujours croissante des activités stratégiques identifiées par leur fonction (information, recherche), commerce de gros, commercial, des secteurs d'activités (éditions, études, conseils, etc.), cela s'explique notamment par leur capacité à capter, à attirer la majeure partie des investissements et des flux financiers. A la logique de polarisation sur de vastes territoires des biens et des personnes, se superpose dans le même espace-temps celle des investissements financiers, des entreprises et des services. Cette macro–dynamique de polarisation à l'échelle du monde, sur des territoires particuliers interconnectés et interdépendants fonctionnant en réseau horizontal, de territoires métropolisés à territoires métropolisés, transforme le caractère même des échanges économiques. On passe d'une structure économique internationale à une structure d'échange transnationale, *inter–métropolisée*. Elle court-circuite les espaces intermédiaires qui ne sont pas intégrés au réseau des territoires de la métropolisation. L'émergence et la généralisation de ces nouvelles puissances territoriales, résultant de nouvelles formes d'organisation spatiale, ne sont pas sans poser quelques problèmes d'interférence avec les structures administratives des Etats, voire les Etats eux-mêmes. Certaines de ces nouvelles puissances territoriales et géopolitiques sont tentées de s'affranchir de la tutelle des Etats et de « jouer » leur propre partition. Elles concentrent et accaparent une part sans cesse plus importante de la puissance économique, du pouvoir politique et sociétal d'un pays. En ce sens, la remarque de Pierre Veltz est assez éloquente : « [...] *rien n'empêche le territoire métropolisé de prospérer dans une région qui décline, dès lors qu'elle s'inscrit dans le jeu des relations à grande échelle, facilité aujourd'hui par les communications. Les grandes villes se développent de plus en plus comme des foyers de croissance autonome, reliés en réseaux avec d'autres grandes villes* [...] » (Veltz, 2005). Cette représentation d'une réalité possible ne fait que mettre en exergue le rôle joué par les dynamiques de polarisation.

On ne peut être que partiellement d'accord avec cette remarque : dans le processus de « glocalisation » l'espace régional est imbriqué dans les échanges transnationaux et l'économie globale. Rapportée à une échelle régionale et intra–métropolitaine, cette logique de pouvoir, d'émancipation n'a pas grand sens.

1.4.3. REGIONALISATION DE L'ESPACE MONDE

A l'échelle Monde, les profils économiques de ces structures géographiques multi–polarisées tendent à s'uniformiser statistiquement mettant en évidence la normalisation d'un modèle géo–économique et sociétal des territoires urbains. Normalisation qui prend des formes géographiques et spatiales diverses, qui ne présage en rien une logique d'uniformisation. C'est la mise en réseau avec l'intégration croissante des territoires métropolisés qui fait, organise et forme la structure d'une économie monde, métropolisée, globalisée, transnationale, rattachée à des lieux, ancrée dans les territoires formant de vastes régions

urbaines. N'en déplaise aux partisans de la « *dé–géographisation* » de l'espace et du Monde, c'est un processus massif de reterritorialisation avec la régionalisation de l'espace Monde qui est en cours. S'ils se traduisent par une interdépendance accrue entre les territoires de la globalisation, les territoires métropolisés sont les lieux où se mêlent processus économiques globaux et locaux. La mondialisation de l'économie ne se résume pas à une sorte de macro–processus dont les économies nationales et locales ne seraient que des artéfacts. Nous sommes face à une interdépendance accrue entre les échelles et les structures économiques globalisées, locales ou nationales. On assiste à une interdépendance croissante à toutes les échelles entre les acteurs économiques, les Etats et les territoires de la métropolisation : « Le global est partout présent dans le local, ce qui rend beaucoup plus difficile à penser et à représenter spatialement notre Monde que par le passé ». Le niveau local, celui des territoires métropolisés, n'est pas une altération de la mondialisation de l'économie mais un acteur structurant de la globalisation. Il tend à restructurer l'espace économique global sous la forme « d'économies–territoires » fortement territorialisées et ancrées en des lieux (métropolisés) précis. Les technopoles et les territoires de l'innovation, bien qu'évoluant en réseaux dans des structures globalisées, sont fortement attachés à des lieux particuliers et des formes spécifiques de savoirs.

Cette capacité de mise en réseau des territoires métropolisés résulte et dépend des infrastructures de communication et de télécommunication. Elles permettent l'articulation des biens, des personnes, des acteurs économiques entre les échelles globale, régionale et locale par les échanges d'informations et les mobilités.

1.4.4. TRANSFORMATION DES SYSTEMES ECONOMIQUES DE PRODUCTION, METROPOLISATION ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

On assiste depuis une dizaine d'années à l'accélération des transformations de l'économie avec celle des modes et systèmes économiques de production. Transformation des structures de production qui va de pair avec un processus de désengagement politique et social au niveau local des élites économiques et intellectuelles qui est lié à fois à la flexibilité des emplois, une plus grande mobilité et une transformation du rapport à l'espace géographique et aux territoires avec la métropolisation. Métropolisation et mondialisation de l'économie se traduisent par une modification des modes de production plus flexibles qui imposent de « vivre » les territoires métropolisés autrement.

Les transformations qui sont induites par les technologies de l'information et de la communication (TIC) ont ou ont eu un impact direct sur l'organisation des modes de travail dans le secteur tertiaire. Nous sommes passés d'un modèle fortement structuré des années 1960 qui tend à faire disparaître le modèle wébérien avec le retrait de certains niveaux administratifs pour remplacer les cadres de bureaux. Les TIC ont été un moyen d'imposer et de mettre en œuvre

une politique libérale, avec la disparition de l'activité fixe pour lui substituer des équipes travaillant sur le court terme et à des tâches spécifiques. Un petit nombre de dirigeants prennent des décisions, fixent les tâches et en évaluent les résultats. La révolution de l'information leur a offert un contrôle sur la marche de l'entreprise plus immédiat que dans l'ancien système.

Ce modèle s'appuie sur ce que l'on pourrait appeler une forme de flexibilité du capitalisme. Il a les mêmes effets sur les territoires urbains, métropolisés que sur les lieux de travail. Il entraîne un système de relations superficielles et distantes au sein même du territoire métropolisé ou urbanisé. Cela se présente sous trois formes :

- ✓ L'attachement physique à la ville. Le taux de mobilité géographique est très élevé chez les travailleurs qui connaissent la flexibilité avec de nombreux déménagements. Dans le même temps, on remarque que le mode de vie dans la ville a plus d'importance que leur emploi. Certains quartiers offrent restaurants branchés et services spécifiques remplaçant même l'entreprise. On assiste à la standardisation de la consommation publique : réseau mondial de magasins vendant les mêmes biens dans les mêmes genres d'espaces. La standardisation produit l'indifférence, la déshumanisation, la forme libérale de l'effacement de l'individu.
- ✓ La deuxième expression du capitalisme est la standardisation de l'environnement. On assiste à un processus de non attachement aux lieux, à l'environnement de vie, d'anti–appropriation ; un nouveau soviétisme urbain où l'urbanisme et l'architecture fonctionnelle sont déshumanisés, standardisés, normés à l'identique pour effacer toute forme d'identification ou de particularisme.
- ✓ La troisième expression du capitalisme est la flexibilité. Le travail devient plus précaire et plus exigeant en termes de disponibilité des adultes ce qui entraîne un retrait des adultes dans la participation à la vie publique. La question est comment trouver un moyen pour stabiliser et organiser la vie familiale.

La nouvelle élite mondiale exerçant dans des villes comme New York, Londres, Paris ou Chicago, évite le champ politique urbain. On assiste à une dissociation extrêmement forte entre le politique, la vie de la cité, ses usages par les habitants, les métiers intellectuels, le fait de penser la ville, le territoire métropolisé, les technocrates et les responsables économiques. Acteurs économiques, population des catégories socioprofessionnelles supérieures utilisent, habitent, font vivre le territoire urbain, métropolitain pour bien mener ses activités, mais refusent de le diriger. C'est un système de pouvoir sans responsabilité qui s'est imposé.

En 1925, pouvoir et économique étaient inséparables. L'économie mondiale n'est plus enracinée dans la ville au sens où elle n'est plus sujette au contrôle de la cité. Elle génère une indifférence apparente des entreprises à l'égard des lieux où elles s'installent. La mondialisation pose le problème de citoyenneté à l'échelle des villes comme à celle des nations. Les villes sont soumises au problème du captage

des fonds de l'entreprise et ces dernières prennent peu de responsabilités en rapport avec leur présence dans la ville. La menace de délocalisation rend possible ce refus des responsabilités.

L'apparition de nouvelles technologies aboutit simultanément à une autre organisation de la production et à une autre organisation de l'espace urbain (Lefèvre, 2010). Elle se traduit par une modification de la structure socioéconomique de la population des centres villes. Les centres villes étaient très actifs et productifs, populaires. La cité existait surtout par son centre. La dislocation de cette forme urbaine a commencé vers la fin du 19e siècle aboutissant à tout ce que la population comptait d'actifs et de productifs vers des banlieues de plus en plus lointaines.

Dans le même temps, les impératifs écologiques et sécuritaires (exposition aux risques industriels des populations) font qu'il est difficile de maintenir des usines et des industries polluantes au sein des villes.

Elle se traduit également par un processus de gentrification : embourgeoisement des centres villes, remplacement de la centralité productive par un centre de décision et de services. Le centre urbain ne devient pas seulement un lieu de consommation, il prend lui-même une valeur de consommation. Les populations délocalisées dans les banlieues réinvestissent les centres urbains comme les lieux de loisirs, de temps vide et inoccupé. La ville se muséifie. Centres et périphéries se supposent et s'opposent. Ce phénomène est commun à l'ensemble des territoires métropolisés de la Terre. Nous sommes devant une planétarisation de l'urbain : une homogénéisation des modes vie, d'urbanisme et d'aménagement qui s'accompagne d'une fragmentation. L'espace social, tout en s'homogénéisant, se fragmente en espaces sectoriels (travail, loisirs, production, services, etc.). Les classes sociales se hiérarchisent socialement et surtout spatialement générant de la segmentation spatiale, de la fragmentation territoriale, en s'inscrivant physiquement dans l'espace.

Dans le même temps, le cadre de vie et la qualité de l'environnement passent au rang des urgences et de la problématique politique, réintroduisant la question des modes d'habitat et d'habitation, avec en filagramme une question récurrente : pourquoi n'a-t-on pas réussi à créer des villes vivantes et vivables ? Cette question n'est pas propre au modèle libéral. Elle est identique dans les territoires urbains soviétisés. Le problème est à chercher dans un mode de pensée catégoriel et fonctionnel. Elle doit intégrer des rapports sociaux qui tendent à devenir internationaux avec l'augmentation des migrations, la multiplication des lieux de vie, la multiplicité des moyens de communications, et la mondialisation des savoirs.

1.4.5. ATTRACTIVITE ET MARCHANDISATION DES TERRITOIRES DE LA METROPOLISATION

LA VILLE, UN OBJET GEO–SOCIETAL

L'attractivité de la ville (métropoles, mégapoles, villes) se présente comme une solution contrainte par des raisons économiques ou politiques ou par choix. Dans de nombreux cas comme le seul lieu d'accueil : migrations liées à la sécheresse (Casablanca), aux guerres et conflits, absence de travail dans les campagnes (exode rural). C'est également un choix de vie et de carrière.

Dans nombre de pays, qu'ils soient en développement, en transition ou développés, les nouveaux habitants espèrent trouver ce qu'ils n'ont pas ailleurs. Elle est surtout contrainte par des raisons économiques et sociétales, voire politiques. Les enjeux ne sont cependant pas les mêmes que nous soyons en Afrique de l'ouest, en Inde du Nord-Ouest, en Europe du nord post–communiste ou en France.

En France et plus généralement en Europe occidentale, la ville est devenue un objet (géo)–sociétal : quelle ville veut-on ? Dans quel(s) environnement(s) géographique(s) veut-on vivre, travailler, se mouvoir ? Quels types d'idéels urbains et métropolisés veut-on ? Le choix de la géographie de vie métropolisée, idéalisée, pensée et construite, répondant à nos aspirations, à nos désirs, se double d'une contrainte structurelle (démographique (Gadal, 2007)) lourde qui touche également les territoires métropolisés post–soviétiques et baltiques : le vieillissement de la population. En Lituanie, la baisse de la population (moins 50000 personnes depuis 1992 sur 3,7 millions d'habitants) et l'émigration massive en Europe scandinave, en Irlande et en Grande-Bretagne (plus de 1,2 millions de personnes), pose en sus du problème du vieillissement de la population celui de la survie à moyen–terme du pays (à l'instar de la Lettonie et de l'Estonie). La question de l'attractivité des territoires métropolisés comme l'axe Vilnius–Kaunas ou Klaïpeda est posée à l'échelle nationale.

Dans les pays en développement, les problèmes endémiques liés à la croissance urbaine forte (+3%) sont posés en d'autres termes. La gestion des mégalopoles pluri–millionnaires (eau, énergies, transports, sécurité, éducation, pauvreté, précarisation) fait du suivi et de l'aménagement des problématiques stratégiques et des enjeux fondamentaux de développement. La croissance de la population associée à la pauvreté tend trop souvent à annihiler des taux de croissance économique souvent supérieurs à 5% dans ces lieux de développement économiques exponentiels que sont ces mégapoles. Elle pose la question de l'attractivité économique et humaine de ces territoires.

Le modèle idéologique de croissance économique et de développement basé sur le libre-échange et surtout sur la dérégulation a généré deux nouvelles problématiques : celle de la compétitivité des territoires métropolisés et de leur attractivité. Problématiques d'autant plus fortes que les territoires de la métropolisation s'inscrivent comme les lieux et les objets géographiques de la mondialisation (géoéconomique, sociétale et politique), interdépendants et interconnectés à d'autres territoires métropolisés formant aux échelles régionale et mondiale des réseaux de lieux urbains globalisés à l'échelle du Monde. Ces territoires métropolisés à la fois moteurs, réceptacles et structures disséminant de la mondialisation, tendent à se concentrer sur des portions de l'espace géographique de plusieurs dizaines à centaines de kilomètres engendrant des formes spatiales variées, rarement homogènes mais animées par des dynamiques géographiques et des formes de structuration de l'espace géographique similaires, voire identiques.

Lieux et objets géographiques de la mondialisation, les territoires métropolisés ou en métropolisation ne sont pas marqués par une certaine forme d'ubiquité mais concentrés à certains lieux géographiques résultant d'une histoire, de choix politiques, de contraintes et d'atouts géographiques, tout autant que des populations qui font, structurent et organisent l'espace. Les territoires métropolisés sont-ils les inhibiteurs géographiques, économiques et culturels de la mondialisation ?

La réponse est oui si d'un point de vue géoéconomique l'on se place dans le cadre de la notion de compétitivité des territoires. Elle s'est illustrée notamment par les pôles de compétitivité ou les clusters durant la première décennie du 21e siècle. Leur niveau de compétitivité est un élément mesurant leur capacité à s'insérer dans les territoires de la mondialisation (les territoires métropolisés et globalisés). La question reste ouverte si on analyse le degré d'attractivité des territoires métropolisés. Compétitivité et attractivité sont interdépendantes.

L'attractivité dépend du niveau de compétitivité d'un territoire et de son insertion dans l'espace Monde, celui du réseau des métropoles interconnectées et interdépendantes formant un espace globalisé de territoires réticulaires. Et, également, la compétitivité de la capacité à attirer les acteurs clés ou identifiés comme tels de la mondialisation géoéconomique et de la métropolisation : les acteurs économiques et investisseurs, les chercheurs et enseignants-chercheurs, les acteurs culturels. La notion d'attractivité n'est pas sans poser quelques problèmes d'ordre conceptuel à la géographie : la notion d'attractivité appliquée aux territoires dans un espace géographique dans lequel géo–économie et géo–culture sont de plus en plus ouverts, interconnectés et a priori interdépendants, « […] les avantages comparatifs d'un territoire dépendent moins de ses propriétés intrinsèques que de ses capacités à drainer les ressources nécessaires aux processus de production et de commercialisation […] » (Groupe Vinci, 2010).

Cette notion est utilisée en géographie pour parler de l'attractivité des villes et des territoires métropolisés en termes démographiques, d'investissements, de tourisme, etc. permettant de fait de mesurer, de classer, de hiérarchiser un espace a fortiori urbain (dans notre cas). La notion d'attractivité citée ci-dessus sous-tend une logique d'indifférence (d'ubiquité) géographique et spatiale dans laquelle les caractéristiques géographiques qui font les territoires métropolisés n'ont que peu ou pas d'importance. Les lieux et structures géographiques sont ramenés à des sous-produits de l'attractivité des territoires de la métropolisation alors que c'est le fait même qu'ils soient métropolisés, spécialisés ou remarquables qui confère leur attractivité. C'est-à-dire la capacité à attirer les ressources humaines, sociétales, financières, technologiques, culturelles et touristiques.

Si l'attractivité est une composante de la constitution des territoires métropolisés, l'espace géographique, l'histoire, les structures territoriales, les dynamiques sociétales, l'environnement et les politiques géoéconomiques et d'aménagement menés sont les éléments de base clés (structurants) déterminants (constitutifs) de la métropolisation. Ils sont aussi et surtout les lieux et les objets même des transformations sociétales en cours.

METROPOLISATIONS CHOISIES, METROPOLISATIONS SUBIES

Au-delà de la fragmentation et des ségrégations socio–spatiales engendrées par la métropolisation, le déplacement des choix politiques en termes d'aménagement aux niveaux local et régional – les territoires métropolisés pouvant à eux seuls se définir comme une région, se confondre en tant que tel ou couvrir plusieurs ensembles administratifs et politiques régionaux – tend à accentuer plus encore les logiques de discriminations socio–spatiales sur l'autel de l'attractivité des populations et des constituants socio-économiques de la compétitivité des territoires, antichambres de la mondialisation et de la métropolisation. Ce sont bel et bien les territoires structurant l'espace géographique, les populations l'organisant qui font la compétitivité. Les rendre plus compétitifs, c'est aujourd'hui à travers des décisions politiques, favoriser des catégories de population, les activités, les aménagements. C'est-à-dire discriminer, classer, hiérarchiser, répartir, autant d'éléments qui sont télé–détectables, reconnaissables, identifiables par télédétection en raison des configurations spatiales qu'ils génèrent : ensembles géographiques, morphologiques et spectraux homogènes spatialement, bien (voire parfaitement) séparés, délimités, renvoyant à des catégories et des configurations socio-économiques homogènes, souvent similaires d'un territoire à un autre. De même, la puissance des transformations territoriales en cours, leur rapidité mais également leur étalement dans le temps sur plusieurs décennies, les surfaces qu'elles couvrent, les échelles géographiques qu'elles englobent, les niveaux de fragmentation, de diffusion, de croissance spatiale, de ségrégation sociale et

physique font de l'entrée spatiale par le territoire un élément de mesure géographique, spatial et temporel, quantifiable et qualifiable privilégié dans lequel la télédétection aéroportée et spatiale se prête bien à ces analyses.

Les conséquences géographiques et spatiales découlant des politiques volontaristes visant à favoriser l'attractivité économique tendent à sur–accentuer les processus de ségrégation et de fragmentation provoqués par la métropolisation. Politiques pour lesquelles les logiques de City Branding peuvent être un des marqueurs le plus parlant et le plus problématique face à une réalité sociogéographique peu encline aux modèles de compétitivité et d'attractivité « pensés » et « vendus » aux politiques et administrations publiques, que ce soit en Europe, dans les pays en transition (BRIC : Brésil, Russie, Inde, Chine) ou en développement. – « [...] valoriser l'image des villes à travers la création d'une marque comme pour les produits marchants [...] » (Groupe Vinci, 2010) - le territoire métropolisé se confondant avec un label et une identité – le subjectivant et l'idéalisant. Le niveau d'insertion d'une métropole, sa puissance et son rayonnement, son insertion dans le réseau des villes globales (ou plutôt des territoires métropolisés) en dépendent, certes, mais elle ne peut cacher longtemps une réalité géographique qui pourrait se trouver en décalage par rapport à l'image qui est promue, induisant selon la terminologie propre au City Branding des facteurs de « répulsions potentielles ». Catalyser, accélérer, accentuer l'attractivité territoriale pour renforcer, faire émerger des territoires métropolisés désirés, de fait pensés comme globalisés, c'est-à-dire comme un des points nodaux de la mondialisation, ne peut s'affranchir d'une réalité géographique, historique, sociale et territoriale.

Réalité géographique qui ne peut se défaire des transformations sociétales en cours, - pour partie liées aux technologies d'information et de communication, et des infrastructures de mobilité – ou comme, par exemple, des enjeux démographiques du vieillissement des populations. De même, les conceptions idéologiques et politiques de la mixité sociale, de la diversification des populations – pour ne pas parler d'immigration et de communautarisme – se retrouvent bien nues, sans réel sens, devant la réalité de l'inscription géographique de la métropolisation sur le territoire, sauf à valider des discours politiques auprès de certaines « clientèles » électorales et face à des politiques économiques et urbaines menées au niveau local, voire régional : choix de catégories sociaux professionnelles supérieures, jeunes, au détriment des classes populaires précarisées ou âgées. Les immigrés ou les classes populaires sont souvent perçus ou analysés par certains tenants de l'attractivité comme des « potentialités » auprès des consultants et entreprises chargées d'accompagner les politiques dans les choix stratégiques ou d'aménagement. Elles peuvent participer, comme à New York ou à Londres, à une certaine image de l'idéal post–moderne de la métropole, cosmopolite, communautaire, globalisée, mélangée dont nous ne saurions critiquer ouvertement les conséquences criminelles des tenants de la postmodernité dans leurs applications lors de la « gestion » de conflits ou de guerres sur les populations civiles, souvent réfugiées en ville.

Concept inexcusable, humainement, éthiquement et politiquement de par les souffrances et atrocités dont la postmodernité appliquée à la gestion humanitaire et politique des conflits a induit, catalysé et trop souvent provoqué. Aucune vie ne peut être sacrifiée sur l'autel d'un concept, certes séduisant sous certains aspects, mais criminel et irresponsable envers l'Homme.

Car si la métropolisation est un processus multi–scalaire, transnational qui s'identifie au niveau global ou régional, elle s'inscrit physiquement aux échelles locales, urbaines donnant naissance à des espaces urbanisés régionaux intégrés, multipolaires, interconnectés à d'autres territoires métropolisés au sein de mêmes ensembles étatiques ou transnationaux. Ce qui leur confère un caractère « terri–globalisé » participant de fait à la genèse d'un modèle d'organisation des territoires et de structuration de l'espace géographique. Modèle multiforme qui n'est pas au demeurant le seul mode d'organisation territorial structurant et aménageant l'espace géographique. Il est cependant avec les mégalopoles démographiques le modèle socio–spatial qui induit les transformations territoriales les plus importantes sur l'espace géographique, l'environnement, les politiques d'aménagements et géoéconomiques, tout comme sur les modes de vie des populations.

EMERGENCE D'UNE NOUVELLE CLASSE SOCIALE ?

La recherche des éléments clés qui font les territoires métropolisés, c'est-à-dire, des structures de l'espace géographique géo–économiquement compétitives et attractives, a été plus ou moins formalisée, notamment par Richard Florida dans deux ouvrages, *The rise of the creative class* (Florida, 2002) *et Cities and the creative class* (Florida, 2004). Le second ouvrage se veut comme une réponse aux nombreuses critiques, parfois violentes, des tenants des mouvements et penseurs traditionnalistes (pour ne pas dire réactionnaires) et conservateurs de droite et de gauche, des religieux traditionnalistes, sur des bases et des motifs politiques et sociétaux différents selon la sensibilité politique et sociale des uns et des autres. Thèse touchant aux valeurs et structures même de la société, conséquence de l'apparition de nouveaux modes de vie touchant 26% de la population étasunienne (Florida, 2002), ébranlant les structures sociales traditionnelles, sans que celles-ci soient pour autant marginalisées.

Les axiomes de la croissance métropolitaine, de ce qui fait la puissance économique, culturelle et économique des territoires métropolisés, sont la technologie, le talent et la tolérance. Leur mise en résonance a été perçue par beaucoup comme une analyse et théorisation de ce qui fait l'attractivité des villes, peu précise, voire laxiste dans la définition des indicateurs (Lévine, 2004) (Jourdan, 2008) ou touchant aux valeurs identitaires et structures sociales des sociétés nord-américaines et européennes en métropolisation. Richard Florida part du postulat que le niveau d'attractivité des territoires de la métropolisation

est tout d'abord humain, posant de fait l'Homme au centre du modèle géoéconomique métropolisé.

La thèse de Richard Florida reflète cependant avec une certaine clairvoyance, voire brutalité dans l'énoncé, une part de la réalité sociale et géographique de la métropolisation : l'émergence dans les années 1990 d'une classe sociale préexistante de plus en plus nombreuse, porteuse et témoin de la généralisation de (nouveaux) modes de vie et de rapport au territoire avec l'accroissement des métiers intellectuels et dématérialisés, des technologies et de la connaissance, le développement du libéralisme économique, de la mondialisation des échanges et de la mobilité des personnes et des biens matériels et immatériels. Essor d'une génération, urbanisée, métropolisée qui a bénéficié de la généralisation de l'accès à l'enseignement supérieur, de l'accès à la culture et aux loisirs, à la mobilité et à l'interactivité des technologies de l'information.

L'application des indices et de la méthodologie testée sur 444 villes européennes et comparées au modèle de répartition hiérarchique rang–taille montre des résultats similaires (Lorenzen, Vaarst Andersen, 2005). La répartition de la classe créative est corrélée à la répartition de la population européenne selon la loi rang–taille. L'étude montre que le niveau d'attractivité de la classe créative est fort pour les territoires métropolisés, plus faible pour les villes de moindre importante. Les études menées depuis le milieu des années 2000 en Europe mettent également en évidence une corrélation entre présence de la classe créative, la présence de services et d'une vie culturelle, et la croissance économique (Clifton, 2008) (Andersen et al., 2008). Corrélations qui ne sont en rien des facteurs explicatifs. En quoi la présence de vie culturelle intense est facteur d'attractivité de cette nouvelle catégorie sociale métropolisée ? En quoi est-elle un vecteur de la croissance économique ? N'est-elle pas simplement, uniquement le reflet, un caractère de la métropolisation et non la cause ? On touche aux limites de l'analyse multi–variée et du modèle rang–taille. Limites qui sont également mises en avant par Mark Lorenzen et Kristina Vaarst Andersen dans l'article Centrality and creativity: does Richard Florida's creative class offer news insights into urban hierarchy? (Lorenzen, Vaarst Andersen, 2009). La forte présence de la classe créative tient surtout au nombre d'opportunités offertes dans le travail qui elles-mêmes dépendent du niveau de connectivité qu'offre et permet le territoire métropolisé. Les liens entre degré de connectivité, mobilité et travail ont été parfaitement montrés dans divers travaux de recherche (Boyle, 2006) (Casson, Giusta, 2007).

La mise en évidence ou plutôt en exergue de cette catégorie socio-économique, identitaire–ment rattachée à une classe sociale pour Richard Florida et certains de ses détracteurs, est liée pour l'essentiel à la valeur économique croissante qu'elle représente et aux effets démultiplicateurs des valeurs humanistes, sociales et libérales d'une modernité propre à la métropolisation, portée par les individus et pour laquelle l'économie libérale se veut le vecteur de dissémination et de profits.

Selon l'auteur, on assiste à l'avènement d'un nouveau cycle économique fondé sur la notion de créativité (Jourdan, 2008), élément clé vecteur de croissance et de développement, dans lequel le capital humain prend le dessus sur le capitalisme financier. Dans son modèle, trois facteurs entrent en compte pour évaluer un niveau d'attractivité et de compétitivité des territoires urbains et métropolisés : la technologie, le talent (défini par le niveau d'étude) et la tolérance (le niveau d'ouverture d'esprit des habitants). La démarche utilisée est des plus simples, basée sur des analyses de données statistiques bi–variées, multi–variées et des indices comme l'indice de tolérance basé sur le nombre de la population homosexuelle ou l'indice bohémien. Indices qui sont et ont été critiqués par leur manque de rigueur quant à la définition des termes ou de leur faible pertinence (Lévine, 2004).

On se retrouve devant une démarche plutôt classique propre à nombre d'études nord-américaines qui tendent à privilégier des indices macro–sociétaux donnant de fait une cartographie de la situation assez générale. Le modèle humaniste basé sur la prééminence de l'Homme sur le capital se caractérise par une contradiction interne forte : celle d'un déterminisme social dans lequel les populations les plus pauvres ou défavorisées seraient exclues de facto de la logique de créativité conduisant au développement économique et social. Ce qui est, du point de vue hexagonal politiquement et socialement inacceptable, du cadre de pensée humaniste dont il se réfère tout autant intolérable.

Il reflète plus une situation propre à un grand nombre de territoires en métropolisation ou mégapolisés situés dans les pays en développement où le déterminisme social impacte sur la capacité des individus et des populations les plus pauvres à accéder pleinement au développement. Pauvreté qui ne touche en rien la capacité des populations les plus déshéritées à développer des modèles alternatifs qui sont en tous points des modèles créatifs générant services et valeur ajoutée. Il reste que dans nombre de mégalopoles en développement, l'accès à l'éducation est conditionné par les revenus, agissant comme un puissant facteur discriminant. Déterminisme social qui est également le résultat des méthodologies de calculs utilisées, à savoir les analyses factorielles et des données statistiques utilisées sur 268 villes des Etats-Unis. Les résultats ont tendance à segmenter, à catégoriser, à lier des facteurs entre eux, qui certes sont concomitants, mais qui n'ont pas forcément une valeur explicative ou causale.

LES TERRITOIRES METROPOLISES : LIEUX DE CREATIVITE ET DE DEVELOPPEMENT

Dans l'étude menée sur le territoire des Etats-Unis, 15% de la population est classée comme exerçant des métiers créatifs, engendrant pas moins de 20 millions d'emplois. Elle concerne les métiers scientifiques, l'ingénierie, la recherche et le développement, les technologies industrielles, les arts, la musique, la culture et le design. Mais également, la santé, la finance et les métiers

juridiques. En somme, l'ensemble des métiers issus des révolutions industrielles de la fin du 19e siècle. La nouveauté vient plutôt de leur hybridation avec les technologies de l'information et de la communication (TIC) et de l'industrie des hautes technologies. L'imbrication des TIC avec les métiers issus des précédentes révolutions industrielles tend à accentuer la compétitivité de l'économie tout en augmentant les inégalités sociales et spatiales. Accentuation de la croissance économique qui va de pair avec le développement de la culture (Florida, 2004). Le développement de la culture est-il une conséquence de la croissance économique ou un élément moteur ?

Les territoires de la métropolisation sont les principaux lieux de la créativité, principal vecteur de la croissance économique et sociale. Ils sont ceux qui augmentent le plus vite (Glaesar, 2005). L'urbanisation est le lieu moteur clé de l'innovation et de la productivité. C'est en somme une entité et une variable géoéconomique de premier plan, le lieu et l'objet du développement économique. Le développement de la métropolisation est en grande partie lié au développement de l'économie, économie en partie globalisée, tirée depuis plus de vingt ans par les hautes technologies et depuis peu par une place croissante prise par les technologies de l'information et les métiers de la connaissance.

Métiers de la connaissance (intellectuels) qui doivent leur compétitivité au niveau de formation, d'innovation et d'investissement dans la recherche, qui font des salariés ou des individus des variables du capital de plus en plus précieuses par la valeur ajoutée qu'ils peuvent apporter. La croissance économique est pour l'essentiel le fait de la valeur du capital humain (Lucas, 1988) (Glaesar, 2004). Le capital humain devient dans certains secteurs de l'économie une variable de production à haute valeur ajoutée, un stock de connaissances et d'innovations d'où l'économie tire sa productivité et sa croissance. Il diffère des facteurs traditionnels de production par le fait que ce ne sont pas des biens manufacturés et/ou tirés de l'agriculture, de l'exploitation des ressources naturelles mais des flux de connaissances, de savoirs dont leur diffusion et production est dopée par les TIC. Connaissances, savoirs dématérialisés, intellectualisés ont changé (ou changent) de statut sociétal. Ils sont passés (ou passent) d'un statut idéologique et sociétal, porteur de développement humaniste et sociétal, d'un certain progrès et d'une croyance au développement de l'Homme, à celui de produits technologiques et industriels plus ou moins dématérialisés.

DES TERRITOIRES DE LA COMPETITIVITE

L'enjeu économique et de développement des territoires est de pouvoir capter, attirer le capital intellectuel à haute valeur ajoutée sur des territoires fortement interconnectés, métropolisés pouvant catalyser, intégrer, accélérer l'émergence d'innovations intellectualisées, technologiquement et industriellement formalisées (formatées), porteuses de plus-values économiques et de richesses.

Territoires habitables, durables, « débarrassés » des problématiques bio–environnementales créées par la deuxième révolution industrielle et le fordisme, c'est-à-dire, l'impact des pollutions sur la santé, l'environnement et les paysages. Métropolisation, habitat durable des territoires (Ferrier, 1998), bio–environnementale–ment « sains » (dépourvus de pollutions), interconnectés aux espaces terri–globalisés, aux hauts potentiels universitaires et de recherches, sont devenus les lieux, objets et catégories géographiques utiles de/pour la croissance économique.

Les territoires métropolisés, épicentres de la créativité, sont devenus des territoires de la compétitivité économique terri–globalisée. La maîtrise de la connaissance et de sa production au sens économique sont devenues les facteurs clés de la compétitivité dans le sens où elles sont les marches pieds menant à l'innovation, à la création de produits matériels ou immatériels. Dans le jeu de la mondialisation et de la globalisation des territoires, les espaces métropolisés en sont devenus les lieux moteurs mettant définitivement à mal les tenants de la fin de la géographie. Disparition de la géographique par une désagrégation de l'espace géographique au profit d'un espace standardisé, ubiquiste, induit par la mondialisation et les technologies de l'information et de la communication (Hospers, Pen, 2008). C'est bien le contraire qui est observé. Mobilités et TIC renforcent le caractère géographique de la mondialisation. La métropolisation en est son expression territoriale et spatiale. Plus qu'une disparition des distances, on assiste à une transformation du rapport distance, temps, espace au profit de distances non pas uniquement métriques, mais topologiques, connexes. C'est la notion de proximité qui prime dans l'émergence de nouvelles connaissances. Proximité et sociabilité qu'offrent les territoires de la métropolisation. Elles s'appuient aussi bien sur les contacts physiques entre les personnes que sur les TIC. C'est la notion d'interaction qui prime. Interaction entre les individus, les populations, les territoires de la métropolisation. Elle constitue le socle, le moteur, des transformations des territoires qui sont aujourd'hui observés.

Dans le même temps, à l'échelle de l'environnement de vie, de l'urbain, celle de l'urbanisme, on assiste à une standardisation, à une taylorisation des formes d'aménagement urbain et architectural. Elles sont une réponse standardisée à une normalisation imposée par la mondialisation de l'économie, des échanges, des modes de vie. Elle se traduit par une unification des infrastructures de mobilités, de services, de travail, les habitats, dans le but de permettre l'interaction et l'interopérabilité, de répondre aux normes environnementales et sociales, aux contraintes économiques et de sûreté. Elle est l'imposition d'un modèle occidental d'urbanisme et d'aménagement de l'espace géographique marqué par des formes d'organisation de l'espace géographique similaires, du moins au plan de l'urbanisme et de l'architecture.

L'économie de la connaissance est une économie des territoires, de la géographie qui se fait pour l'essentiel dans les territoires métropolisés. Elle asseoit de fait le caractère local et urbain de l'économie de la connaissance (Cooke, Morgan, 1998). Elle renforce de fait le rôle joué par les autorités locales (Hospers, Pen, 2008),

allant jusqu'à faire des territoires métropolisés des entités politiques pouvant concurrencer l'Etat lui-même.

L'attractivité d'un territoire, ce qui fait qu'il est métropolisé (génère de la métropolité) tient dans sa capacité à avoir et à attirer les vecteurs humains socio-économiques de la métropolisation : les populations hautement qualifiées. Populations de plus en plus mobiles à l'échelle internationale – régionale et continentale – ou intra–nationale qui pensent leur mobilité dans des rapports entre territoires métropolisés, que ce soient à l'échelle régionale ou nationale, internationale ou continentale en raison, notamment, du faible nombre de postes sur le nombre de territoires, concentrés sur certains, les territoires métropolisés et de la précarisation croissante des emplois au nom de la flexibilité du capital humain qui pousse à une mobilité toujours plus importante. Flexibilité et créativité qui sont aux yeux de l'économie la source ultime génératrice de croissance et de développement (Florida, 2004).

DEMATERIALISATION, NUMERISATION DU SYSTEME PRODUCTIF INTELLECTUEL ET TECHNOLOGIQUE

Une des transformations sociétale majeure en cours est la capacité à intégrer la mobilité comme une composante structurante des modes de vie, que ce soit pour le travail, la vie familiale ou les loisirs. Mobilité liée à la structure même du marché du travail des métiers de la connaissance, de l'innovation et des hautes technologies. Mobilité qui se pense et se structure autour de la distance temps et des infrastructures de mobilité dans des rapports de lieux à lieux. Rapports de lieux à lieux qui se font pour l'essentiel entre lieux–territoires métropolisés, qu'ils soient situés au sein d'une même région, d'un même pays ou entre un ou plusieurs pays. Cette mobilité métropolisée constitue un des fondements humain, matériel et immatériel de la mondialisation, mondialisation comme nous l'avons dit, qui se fait dans des lieux précis que sont les territoires métropolisés ou en phase de le devenir. Territoires qui sont devenus des produits markétings territorialisés, tout autant que les lieux carrefours de production, d'innovation de la mondialisation.

La dématérialisation des métiers intellectuels, des technologies et de la connaissance, constitue des générateurs et des multiplicateurs économico–culturels de la croissance et du développement grâce aux innovations qui peuvent en découler, de la valeur ajoutée tirée des images et symboles culturels, technologiques et sociétaux. Qu'on ne s'y trompe pas, la géomatique est l'un de ces vecteurs mêlant technologies de l'information et de la connaissance géographique, industrie géo–spatiale et questions sociétales de par ses applications, applicatifs et finalités. Elle est un des métiers portant la valeur symbolique, politique et sociétale des métiers de la connaissance (numérisée) en raison du nombre de ses applicatifs porteurs de certaines valeurs humaines et éthiques de la fin du 20e siècle : analyse et suivi de l'environnement, support au

développement, à la gestion de crises humanitaires, des catastrophes naturelles, etc. Métiers de la connaissance dont leur développement et leur diffusion se combinent avec les technologies de l'information et de la télécommunication, la numérisation des données, informations et le traitement informatique.

L'imbrication continue des unes dans les autres aboutit dans les démarches d'études géographiques de la métropolisation à une situation où le moyen d'analyse, de modélisation et de représentation des connaissances produites est dans le même temps un des vecteurs fondamentaux de la métropolité, de la mondialisation. C'est-à-dire, ce qui font en termes humains et économiques la métropolisation.

1.5. METROPOLISATIONS, SYSTEMES GEOMATIQUES ET TERRITOIRES DE L'INFORMATION

1.5.1. SYSTEMES GEOMATIQUES

La géomatique se trouve dans cette situation. Elle est à la fois une démarche scientifique géo–spatialisée et géographique de production de connaissances sur l'espace géographique, dans ses dimensions sociétales et géophysiques, un ensemble de systèmes technologiques et techniques de gestion et de surveillance des territoires, le cœur d'un ensemble d'architectures systèmes dédié aux moyens de transports et télécommunications, un support informationnel d'aide et de représentation de plus en plus mobile à destination des individus et des organisations.

Elle se caractérise par l'intégration et l'imbrication des concepts géographiques et géomatiques de base dans l'ensemble des déclinaisons des technologies de l'information et de la communication, à l'instar de la localisation (géo–localisation) ou de notions tirées de l'analyse spatiale avec, comme corollaire clé, la notion de situation caractérisée par la requête où.

Si de mêmes systèmes géomatiques renseignant et caractérisant spatialement les territoires métropolisés, déclinés en démarches scientifiques, comme support aux infrastructures produisant de la mondialisation et de la globalisation, de l'interaction sociale, comme outil de gestion, d'aménagement et de gouvernance, etc., ce qui est donné, produit, représenté, aux organisations et individus se limite à de la représentation d'informations, rarement à de l'analyse ou de la connaissance géographique. C'est ce qui démarque les démarches géomatiques à vocation ingénieriale, d'aide à la décision et utilitaires (support de diffusion de la connaissance, multi–vecteurs mobiles : Internet, Smartphones, etc.) des démarches géomatiques comme moyen de produire de la connaissance et de l'interprétation à travers des méthodologies objectivables qui dépassent le seul fait de produire de l'information inédite et pertinente.

Le cœur de cette évolution dans les démarches géographiques tient à quatre révolutions entrées en résonance et symbiose : l'informatique, la numérisation, la verticalisation de la mesure - spatiale et aéroportée - et les télécommunications. Formes qui se déclinent aujourd'hui par de nouvelles formes de représentation de l'espace géographique à l'observateur (le géographe) projetées à l'écran (géo–visualisation) qui transforment notre compréhension des processus géographiques grâce à la visualisation d'éléments, de mesures, d'objets géographiques complexes sous une forme lisible donc compréhensible au géographe. Les modèles de réalité virtuelle, encore peu ou pas diffusés (de par la lourdeur des infrastructures et leur prix, dissuasif, dans un environnement universitaire français qui tient de la misère), vont transformer ou plutôt faire émerger de nouvelles démarches de production de la connaissance géographique et de façons de penser l'espace géographique. Le géographe va entrer dans le cœur du système d'analyse géomatique, prenant, associant, décomposant à la main, au détriment de la pensée logique linéaire une pensée analogique, complexe, fonctionnant par association. L'immersion physique et virtuelle du géographe dans le système d'information géographique ou l'image de télédétection spatiale ou aéroportée, c'est-à-dire, au cœur d'un espace géographique conceptualisé, formalisé, virtualisé, sont un des futurs des démarches géographiques par la géomatique. Elles posent avec encore plus d'acuité la qualité et la pertinence des données et des informations géographiques, formalisations d'une réalité et/ou d'une pensée géographique.

La géomatique se pose comme un élément technologique et conceptuel produisant de la métropolité, de la mobilité, du réseau, de la métropolisation, des territoires informationnels numériques, etc.. En somme comme un acteur de la transformation des modes de vie, avec la métropolité, un vecteur de la mondialisation et des mobilités, un moyen de porter des territoires lointains (distants) à soi, contractant virtuellement et physiquement les rapports du moi à l'espace géographique et à la distance temps. La géographie ou certains de ses constituants à travers l'information géographique, portés à soi par l'intermédiaire de la géomatique, tendent à segmenter, à appauvrir la connaissance et la compréhension de la société et de l'espace générée sous le prisme de la géographie informatique, et à modifier la perception, le rapport de soi à des territoires distants métriquement de plusieurs dizaines ou milliers de kilomètres.

La géomatique a tendance à modifier les rapports de l'individu aux territoires. Elle introduit par la représentation numérisée et formalisée, en somme virtualisée, une distanciation à celui-ci, tout en le transposant mentalement dans son propre environnement géographique. De ce télescopage entre distanciation et interprétation mentale généré par la virtualisation, la particularisation (on présente une partie ou un élément de l'espace géographique) et la normalisation de la représentation de l'espace géographique, naît un rapport dans lequel la distance métrique se substitue à la distance topologique, à des rapports de connexité.

L'espace géographique porté à soi, visualisé sur un écran, est une portion de l'espace formalisé, virtualisé, normalisé, conceptualisé, pensé, ne représentant qu'une partie de la réalité géographique, voire une de ses extrapolations, un produit des mesures, de traitements, d'analyses, de formalisation, une prolongation d'interprétations ou de conceptualisations de l'espace géographique. Elles sont accentuées par la capacité des systèmes de mesures utilisés en télédétection spatiale à extraire des éléments non visibles de l'espace géographique et par les méthodologies d'analyses spatiales de créer de nouvelles données et informations sur la réalité de l'espace géographique.

La géomatique produit de la connaissance géographique et génère par les analyses qui en découlent, des modèles (ou à partir des modélisations des connaissances géographiques) de par les interprétations qui sont faites, des notions et des concepts géographiques. Les représentations géographiques et territoriales, spécialisées à des applications, à des processus ou des objets géographiques sont tout autant des outils et supports géo–informationnels d'ingénierie et d'aide à la décision dans des domaines comme l'urbanisme, l'aménagement, les infrastructures de transports, le BTP, l'exploitation des ressources naturelles et l'agriculture, que des supports géo–informationnels à l'action publique, la défense, le renseignement, la sécurité ou l'économie (optimisation des localisations, des flux, tourisme, etc.). Les représentations géographiques et territoriales sont des vecteurs catalysant notre rapport et notre représentation aux territoires, à l'espace géographique et au monde, inter-cessant avec la construction de notre identité territoriale en perpétuelle transformation. La géomatique produit de nouvelles formes de « sociabilisation », produit et contribue au développement des mobilités et des territorialisations à l'instar de la métropolisation et de la numérisation des territoires, à la production et à la construction de connaissances territorialisées et spatialisées. C'est un vecteur concourant à la métropolisation en tant que support d'ingénierie informationnelle indispensable aux échanges et à la mobilité, aux télécommunications, réseaux et services. Egalement à un des constituants de l'info–territorialisation numérique de l'espace géographique (société, environnement, surface de la Terre) et plus particulièrement des métropoles, indispensable à l'action publique ou politique (défense, sécurité, stratégie de développement) et à la gestion des territoires (impacts environnementaux, aménagement, urbanisme, etc.).

Ce qui fait probablement la force des métiers de la connaissance comme la géomatique, c'est la capacité à mêler, à fusionner, à associer en un même trait, technologies, informations et connaissances sur les sociétés et pour les sociétés, tout comme sur et pour les politiques, sur et pour les industries. Elles fondent leur modèle sur l'utilisation des technologies de l'observation et de la mesure dans la production d'informations, d'analyses et de connaissances nouvelles, immatérielles (numériques), dématérialisées, à forte valeur ajoutée de par leurs contenus, rendus et supports de production, à partir d'une réalité géographique, spatiale et territorialisée. La valeur symbolique qui leur est attribuée par

l'application leur donne un sens politique et social quasi immédiat. Soit sous la forme de systèmes et d'informations nourrissant de données et de représentations cartographiques et spatiales les infrastructures et les technologies faisant la mondialisation, les mobilités et les échanges (entre les territoires métropolisés ou en métropolisation). Soit sous la forme de systèmes servant à gérer les territoires de la mondialisation territorialisée, les espaces urbains et métropolisés, par la production de connaissances sur la réalité géographique et spatiale des processus de territorialisation, et d'outils de gestion géo–localisés et cartographiables (plans, cartes, visualisation 3D) pour l'aménagement, l'urbanisme et l'ingénierie territoriale.

La géomatique avec la télédétection spatiale, les systèmes d'information géographiques, l'analyse spatiale et la géo–visualisation sont l'un des vecteurs démultiplicateurs de puissance et de croissance. De puissance comme segment aval applicatif de la politique de l'industrie spatiale, de gestion et de contrôle des territoires, des sociétés et de l'environnement, de support géo–spatial clé intégré aux infrastructures de communications et de télécommunications, de support économique dans la production d'informations géo–localisées sur les ressources naturelles, forestières, agricoles, minières, etc. et d'aide à la décision dans leur exploitation et dans l'optimisation de la distribution des produits.

1.5.2. METROPOLISATION, DEMATERIALISATION, TERRITORIALISATION

Dans le sillon de la nouvelle économie, de nouvelles formes de travail sont apparues, orientées sur les métiers de la connaissance et de l'intelligence créatrice, comme les moteurs de la production de richesses et de la croissance économique territorialisée et terri–globalisée. Croissance basée sur une nouvelle catégorie d'individus, la nouvelle classe créative (Florida, 2002), avec l'émergence des modes de vie métropolisés, la métropolité, la globalisation des territoires et la mondialisation des échanges économiques, de mobilité et des flux de population, est l'un des vecteurs de la dématérialisation des savoirs et connaissances, tout autant que de leur production, au profit des supports numériques, pouvant s'échanger dans le flux des échanges de la mondialisation, se superposer, se fusionner, avec d'autres savoirs et connaissances numériques.

Ils constituent le générateur d'une certaine croissance économique grâce aux innovations qui peuvent en émerger. Les échanges tendent à se polariser dans les territoires métropolisés ou en métropolisation, induisant une trans–métropolisation des échanges. Les territoires métropolisés sont des carrefours de rencontres et d'échanges d'idées, d'innovations, de personnes et de concepts. Ils sont en outre des hubs où s'entrecroisent, se télescopent, s'internalisent, s'externalisent images et symboles culturels, sociétaux et innovations démultipliant de fait leurs valeurs, celles portées par les individus. Les territoires métropolisés sont les lieux créateurs de valeur ajoutée grâce à leur capacité à

capter, intégrer, générer, diffuser, savoirs, innovations, idées et connaissances, leur donnant une dimension trans–territoriale et globalisée. Une part de la valeur économique créée tire sa substance des connaissances, innovations, créations des individus, par essence immatérielle.

Comme nombre de métiers de la connaissance, la géomatique tend à un processus de dématérialisation des modes, lieux et structures de production des connaissances géographiques. La dématérialisation des structures de travail est liée aux mêmes technologies dont se nourrit la géomatique. L'apparition du champ de dématérialisation des modes de production d'une partie de la connaissance géographique dont la géomatique est l'un des catalyseurs pouvant ou devant tendre vers de nouvelles conceptions d'organisation du travail, de transformation et de réaffectation des lieux d'activité.

Il ne faut pas s'y méprendre, il serait naïf de croire à l'instar de la généralisation de l'Internet ou de la téléphonie mobile que le processus de dématérialisation d'une partie de la production de connaissances induite par les technologies de la communication et de l'information, va engendrer une forme de pseudo–ubiquité territoriale. Bien au contraire, le processus de dématérialisation de la production des savoirs et de certains services va profiter à certains territoires accentuant les ségrégations sociales et spatiales propres à la métropolisation. La fragmentation spatiale des territoires métropolisés renvoie à la pluralité des espaces fonctionnellement, socialement et spatialement ségrégés, socio économiquement duales où les territoires de la pauvreté s'additionnent aux lieux de richesses, formant, sans se toucher, un tout.

Elle se caractérise également par l'émergence de villages urbains, réhabilitation moderne de territoires, les villages, touchés par l'exode rural et la polarisation démographique dans les lieux métropolisés. Plusieurs projets européens ont été mis en place en 2000 sous l'égide de la Finlande pour développer des laboratoires de recherches interconnectés grâce aux TIC en milieu rural à travers le concept de Smart Rural Living Lab. (SRLL) (http://www.openlivinglabs.eu/). L'idée est de créer des centres de recherches interconnectés intégrés à la vie des habitants, du territoire et de l'environnement en valorisant l'espace rural comme espace de vie privilégié. Le développement de ces modes d'organisation s'appuie sur les TIC, la dématérialisation du travail et le nombre de produits créés, essentiellement de la connaissance et des services ne nécessitant pas d'une logistique ou d'infrastructures lourdes. Le corollaire est la question de la mobilité et la présence d'infrastructures à proximité comme les aéroports, hubs d'interconnexion avec d'autres territoires métropolisés. Les TIC ne peuvent suppléer que partiellement la mobilité des personnes.

L'Internet constitue le cœur des projets d'aménagements. En 2010, en France, l'Internet représente 3,7% du Produit intérieur brut et il est à l'origine de la création de 7000000 d'emplois sur 16 ans. Son impact en termes de productivité, de rentabilité et d'économie d'échelle est important dans les petites et moyennes entreprises de moins de 250 employés. Leur niveau d'exportation à l'étranger est

le double des entreprises peu ou pas dématérialisées même si ce niveau reste faible en moyenne (4%) (Bughin, Hazan, Said, 2011).

L'impact des TIC sur la structure des territoires n'est pas, en 2011, visible par télédétection spatiale ou aéroportée. Son inscription spatiale est faible, voire nulle pour être détectée. Ce n'est pas tant l'inscription spatiale de la cybernétisation de la société et des modes de vie, des formes d'organisation du travail, induites par les TIC qui est visible sur le territoire, que sa capacité à interagir avec soi, sur soi et en soi. C'est une transformation qui touche les individus par l'intrusion ou, selon la vision que l'on se fait du processus en cours, l'hybridation des supports technologiques en soi, portant l'information, notamment géographique au cœur de soi.

Les transformations des modes de vie liées aux TIC, à la numérisation et à la dématérialisation de l'information et des connaissances n'ont qu'un impact encore faible sur les transformations territoriales en cours, par l'absence d'inscription physique identifiable par imagerie spatiale, sur la réalité matérielle de l'espace géographique, rendant a priori caduques les démarches géomatiques caractérisées par l'entrée spatiale, du moins temporairement. Les pratiques sociales et économiques peuvent être mises en évidence, en SIG et en analyse spatiale, avec l'utilisation de données géo localisées et de modélisation des flux et des réseaux à la condition de pouvoir accéder aux données, ce qui est, trop souvent le critère bloquant. Critère bloquant, reléguant trop souvent la recherche française à un mauvais classement, alors que les méthodologies, outils et démarches géomatiques sont des plus innovantes, en télédétection et traitement d'images. L'avance anglo-saxonne des années 1980, 1990, a été supplémentée par une non évolution de l'architecture des SIG, un arrêt des recherches en modélisation et en analyse spatiale aux profits des applications (Gadal, 2006), permettant de rattraper le retard et de le dépasser.

Rien n'est moins sûr que les TIC n'engendrent pas des transformations territoriales dans le futur ou du moins accentuent les processus de polarisation urbaine et métropolitaine des populations et des entreprises, lieux de concentration des infrastructures TIC. L'absence d'inscription territoriale visible, matérialisable, tient à deux éléments : les réseaux de télécommunications couvrent la quasi-totalité des bassins de vie des populations, le caractère individu–centré des TIC en fait un système univoque liant l'utilisateur à d'autres utilisateurs sur x niveaux d'échelles géographiques : local–local, local–régional, local–national, local–transnational (ou local–global) sans pour autant qu'il y ait une transformation structurelle a priori du territoire visant à permettre ce rapport d'échelle (de l'individu au Monde, du Monde à l'individu).

La question est de savoir si et quand, les transformations des modes d'organisation et de fonctionnement de la société et de l'économie, les contraintes environnementales remodèleront les territoires et sous quelles formes ? Quelles seront leurs inscriptions spatiales et territoriales ? Quels seront leurs niveaux de détectabilité, de caractérisation par télédétection ? Les niveaux

de détectabilité révèlent la teneur et l'ampleur de phénomènes géographiques de transformation de l'espace et de la société majeurs.

La métropolisation positionne les territoires dans un jeu et une logique de réseaux que les TIC ne font que mettre en exergue. Le local devient le lieu des échanges de l'espace global (mondialisé). La métropolisation est un phénomène ambivalent d'agglomération et de fragmentation interne générant des espaces aréolaires, générant de fait, une assez importante diversité des modes et types d'occupation et d'utilisation des sols.

Les territoires métropolisés sont les réceptacles, les carrefours et les émetteurs des migrations et des mobilités. Ils touchent une part croissante de la population, plus particulièrement les populations pauvres ou paupérisées, ou celles liées par une forte mobilité, à savoir les professions intellectuelles supérieures à la recherche de postes en adéquation avec leur niveau de compétences et de spécialisation. Les populations migrantes pauvres génèrent des flux migratoires importants qui sont caractérisés par de faibles fréquences.

La géomatique, comme système et outil de gestion, d'aménagement et d'urbanisme, s'inscrit dans les méthodes et concepts technologiques des smarter cities ou villes (*plus*) intelligentes. Les territoires urbains, mégapolisés, métropolisés sont les lieux de vie et les espaces économiques.

Elle tient ses potentialités par son hybridation aux TIC, conférant aux systèmes géomatiques une connotation informatique (architecture système, etc.) marquée.

Les TIC participent au développement d'une économie du savoir et la dématérialisation des formes et des lieux de production tendent à converger pour faire apparaître de nouvelles logiques territoriales. Logiques territoriales qui déterminent plus que jamais la mobilité des acteurs et la circulation des savoirs. Si les TIC sont en train de s'imposer comme des éléments structurants majeurs de l'espace géographique, leur impact physique est encore difficile à évaluer. Les TIC ne seraient être les seuls. Les infrastructures de transports, l'accessibilité, la qualité de l'environnement de vie, les services, les loisirs sont tout autant des éléments déterminants.

1.5.3. LIMITES DES SYSTEMES GEOMATIQUES ET DE LA TELEDETECTION

En décembre 2001, plusieurs limites à l'étude de la métropolisation et plus particulièrement sur la télédétection des ses formes spatiales ont été identifiés : elles étaient essentiellement d'ordre technique et conceptuelles. Certains aspects définissant la métropolisation n'avaient pas été développés comme l'analyse des mobilités par télédétection spatiale. Les problèmes et les problématiques identifiés étaient au nombre de six :

- ✓ Les méthodes d'identification des objets bâtis par morphométrie et les reconnaissances symboliques intermédiaires n'ont pu être générées sur l'ensemble des scènes Spot 3 panchromatiques en raison de la puissance de calcul nécessaire. La base de données morphométriques orientée objet, générée sur Casablanca, « pesait » plus de 2Go.
- ✓ Les problèmes d'interopérabilité entre les formats de résultats et de normalisation des données ont rendu difficile leur combinaison pour estimer la qualité des résultats dans le cadre de démarches multi–capteurs, multi–sources.
- ✓ La restructuration des données nécessaires pour leur intégration en système d'information géographique n'avait pas été développée.
- ✓ L'aspect temporel de l'analyse de la métropolisation avait été laissé au profit du développement de méthodologies de reconnaissance et d'identification par télédétection de la métropolisation robustes et reproductibles.
- ✓ La caractérisation de la métropolité, des pratiques et des usages perçus et vécus par les habitants n'avait pas été abordée. Les travaux avaient porté sur les formes générées, ses potentialités, ses structures, ses modes d'organisation. Avec les données à très hautes résolutions spatiales et à très hautes résolutions spectrales, il est néanmoins possible d'approcher certains de ces aspects, notamment, par l'intermédiaire de la notion de *bâti–habitat–habiter*. Essayer de faire en sorte que la télédétection prenne en compte la dimension identitaire et culturelle et le caractère sociologique de la métropolisation.
- ✓ La télédétection de la mobilité, faute d'une capacité de calcul suffisante et de temps pour développer des méthodologies d'analyse du potentiel de mobilité, n'a pu être menée.

Les recherches doctorales étaient en outre confinées à un seul territoire d'étude : le Maroc et sa Métropole Atlantique, la MAM. La validité des méthodologies de reconnaissance et d'identification, si elle avait été testée sur d'autres territoires pour en dégager les niveaux de robustesse et de reproductibilité, les chaînes de traitement créées ne demandaient qu'à être utilisées sur d'autres territoires en métropolisation et être améliorées. L'étude des territoires en métropolisation appartenant à des contextes géoculturels, économiques, politiques et géophysiques pour les moins variés vont être le moyen de corriger les problèmes d'analyse d'images, de traitement des bases de données géographiques générées ou intégrées dans les analyses multi–dates, multi–sources, multi–échelles. Sans pour autant être exhaustif, l'analyse comparative systématisée qui va être faite, a comme intérêt de mettre en évidence ce qui relève d'une forme de mondialisation des processus de métropolisation et des aspects locaux et régionaux. En outre, l'intérêt de ne travailler que sur des territoires en développement ou qui ont été fortement marqués par le modèle soviétique est de s'affranchir du « filtre » des théories, des définitions et des modèles qui ont été élaborés sur des données empiriques, socio-économiques ou démographiques aux Etats-Unis ou en Europe occidentale. Les territoires en métropolisation ne

« répliquent » pas forcément de la même façon dans les pays en développement, développés et en transition. Les conditions et les modes de vie ne sont pas les mêmes, les référents culturels également, les masses de population en jeu tout autant, de quelques millions dans les Pays baltes à plusieurs centaines de millions en Inde du nord-ouest. Les niveaux de développement économique sont divergeants, les structures politiques, étatiques et administratives différentes. De même, si les conditions géographiques, économiques et humaines de l'Afrique de l'ouest, de l'Inde du nord-ouest et des Pays baltes engendrent des logiques d'urbanisation et de métropolisation spécifiques, voire inédites, leur stade de développement pour le moins temporellement et spatialement différencié accentue le caractère spécifique à la fois local et universel de la métropolisation. Elle impose le développement de modèles normalisés pour comparer des processus à des stades d'évolution plus ou moins comparables ou étriqués selon les lieux.

2. CONSTRUCTION DE SYSTEMES GEOMATIQUES INTEGRES DE SUIVI ET D'ANALYSE TERRITORIALE

2.1. CADRE THEORIQUE : TELEDETECTION, SIG ET METROPOLISATION ENTRE APPROCHE CLASSIQUE ET APPROCHE EFFECTIVE

L'étude des processus de métropolisation par télédétection et SIG place le géographique dans une double tension épistémologique : c'est un système d'observation et de mesure de la métropolisation. Il est externe au processus de métropolisation. C'est également un objet social produisant de la métropolisation. Il est intrinsèque à la métropolisation.

2.1.1. APPROCHE CLASSIQUE

Dans les démarches classiques en science et plus particulièrement dans les démarches géographiques basées sur les systèmes d'observation, la portion d'espace étudiée représente une réalité extérieure à l'observateur. Les propriétés de la portion de surface de la Terre analysée – le Monde réel – sont indépendantes de l'observateur qui l'étudie. Les propriétés mesurées sont déterminées par le système d'observation. Il mesure certaines propriétés de la réalité du Monde. Il ne peut représenter la totalité des propriétés géographiques et spatiales de la réalité de l'espace. C'est un filtre de la réalité mettant en évidence une de ses facettes. Facette à partir de laquelle seront construites des analyses et des interprétations de la réalité géographique.

Le filtre introduit par le système d'observation génère la détection ou la non détection des objets qui ont une réalité physique et ontologique. Objets qui sont caractérisés par leurs propriétés biophysiques et morphologiques. Le système d'observation introduit la notion de règle (repère normé) et de mesure. Les objets ont une position, un mouvement spatial et temporel qui sont définis par le système d'observation. Il pose la question de la nature de la réalité observée.

Les systèmes d'observation géographiques, les systèmes géomatiques, produisent une « image » du Monde, celui-ci étant en perpétuelle transformation. « Ce » monde en perpétuel changement, formalisé à travers le concept d'espace géographique, participe lui-même à la transformation des savoirs et des connaissances géographiques. La géographie est un savoir dynamique.

L'étude de l'espace géographique est statique, limitée à une ou des séries de dates données qui sont temporalisées par des successions d'états de l'espace géographique et des analyses diachroniques. Les objets géographiques évoluent,

changent, mutent. Ils ont des trajectoires spatiales qui sont spécifiées par leurs localisations successives. Celles-ci diffèrent selon l'échelle d'analyse. Les objets géographiques ne sont pas forcément identiques, ni morphologiquement, ni sémantiquement. Ils représentent une autre dimension spatiale et temporelle d'une même réalité. Cette contrainte nécessite d'aborder la réalité de l'espace (géographique) à différentes échelles géographiques appelées également niveaux géographiques en référence aux contraintes introduites par le système de mesure (par exemple, en référence aux résolutions spatiales et spectrales des capteurs de télédétection).

Ils donnent une « vision », une représentation du monde qui peut être totalement différente selon le système d'observation ; système d'observation qui, en géographie, peut être sur le terrain, le géographe lui-même. De la mesure, de la description et de la représentation du Monde vont émerger des concepts ou une transformation des concepts préexistants qui vont eux-mêmes transformer notre filtre de pensée et d'analyse sur l'espace géographique et le Monde. Les systèmes d'observation géographiques par télédétection ont permis de passer, en géographie, d'une logique d'observation directe, orientée par nos sens, telle qu'on la voit, à celle d'une observation de la surface géographique d'une même réalité géographique dans le « non visible ». La nature des données spatiales de télédétection, les résolutions spatiales, l'observation de l'espace géographique dans des intervalles spectraux hors du champ visible de l'œil, permettent de voir une autre facette d'une même réalité géographique. Les systèmes d'observation géomatiques sont une extrapolation de nos capacités sensorielles. Ils permettent de « voir le non visible géographique ».

La nature des données produites par les systèmes d'observation géomatiques et les méthodologies de traitements qui sont mises en place permettent au géographe de rendre intelligible l'espace géographique. Mesures, données, traitements et modèles génèrent une simplification de la réalité.

2.1.2. MODELE SPATIAL ET REALITE GEOGRAPHIQUE

Les modèles produits donnent une représentation des processus, des dynamiques, des formes et des modes d'organisation de l'espace géographique. Ils acquièrent le « statut » de modèles réalistes, voire décrivant une « vérité ou une véracité » géographique lorsqu'ils permettent de décrire et d'expliquer une facette de la complexité de la réalité de l'espace géographique. Description et explication qui sont prises à travers les modèles produits trop souvent comme des vérités immuables, du moins non critiquables ou ne pouvant être soumises à la contradiction scientifique. La critique du modèle de Christaller développé par le géographe nazi du même nom, passé après la seconde guerre mondiale au stalinisme, a fait l'objet d'âpres débats (Nicolas, 2009).

La construction des modèles géographiques s'insère dans un contexte politique, culturel, social, technologique et une représentation du Monde qu'il contribue à modifier ou à affirmer. Chaque modèle fait appel à ses propres concepts et déterminants géographiques avec une question en filagramme : quel est le niveau de réalisme atteint dans la modélisation du réel et sa compréhension ? Quel est leur apport à la « cartographie » de la réalité géographique ?

En l'état des technologies géomatiques actuelles (télédétection, SIG, modélisation et analyse spatiale, mathématiques appliquées, informatique) nous ne pouvons cartographier que des portions de la surface de la Terre, portions de l'espace géographique qui sont assemblées pour former un Tout et représenter, décrire, modéliser, expliquer à la fois le tout géographique et les parties. Les avancées technologiques actuelles nous permettent de couvrir, mesurer, analyser des situations spatiales et géographiques particulières à un moment, une situation et un instant déterminés. La modélisation de l'évolution territoriale des portions de l'espace géographique se fait par une modélisation et une analyse chronique et linéaire par des successions d'états de surface à des moments, des instants, des dates différentes.

Les modèles spatiaux qui sont développés peuvent être pris comme des marqueurs de l'évolution de la pensée de l'Homme :

- ✓ Ils peuvent se rattacher à l'école de pensée ionienne : la mise à jour de lois fondamentales sous-tendant les phénomènes observés ; ces lois générales se rapportant à un certain nombre de principes « simples ». Les rares écrits qui sont indirectement attribués à Thalès de Milet partent du postulat que la nature obéit à des principes que l'on peut déchiffrer. Le Monde est compréhensible et les évènements complexes peuvent se réduire à des principes simples et s'expliquer.
- ✓ Ils cherchent également à déterminer les causes des phénomènes géographiques et peuvent également se rattacher à la pensée aristotélicienne.
- ✓ Les démarches scientifiques actuelles par télédétection partent du principe que la réalité est extérieure à l'observateur (le géographe) ; principe qui peut se rattacher à la pensée platonicienne.
- ✓ Elles mettent également en avant l'importance des conditions « initiales », se référant à Descartes.

La construction des modèles spatiaux visant à décrire et à expliquer la réalité géographique de l'espace terrestre n'est pas neutre. Elle est une sorte d'agencement condensé de différentes représentations théoriques et rationnelles du Monde qui se sont succédées.

Les modèles géographiques et spatiaux acquièrent le statut de loi lorsque la règle établie par l'observation d'une régularité permet d'énoncer des prédictions qui dépassent les situations immédiates les engendrant : de simuler en somme les évolutions du ou des territoires observés, modélisés et analysés. Simulations qui peuvent servir à prédire le futur ou reconstruire le passé.

2.1.3. LES MODELES GEOMATIQUES : DES MODELES DEPENDANTS ?

La question mérite d'être posée en raison de la dépendance des modèles aux caractéristiques et aux performances des systèmes d'observation géomatiques et aux méthodes d'analyses et de traitements de données. La réalité n'existe pas en tant que concept indépendant de son image, ce qui est le cas dans les approches géomatiques. Elle dépend des méthodes de mesures et d'analyses, de la théorie qui la sous-tend et que sous-tendent, également, les démarches et les technologies utilisées. Une même réalité, un même phénomène, un même processus géographique peuvent être analysés, étudiés en faisant appel à des cadres théoriques et conceptuels distincts.

La connaissance théorique qui est extraite est dépendante de la connaissance empirique produite par l'observation d'une des dimensions et parties de la réalité géographique. La « réalité » spatiale et géographique produite correspond à la façon de percevoir les objets. Les modèles spatiaux générés sont en phase avec le système d'observation utilisé. On peut parler dans le cas des démarches géomatiques, plus particulièrement par télédétection, de modèle dépendant.

On peut parler de modèle dépendant en télédétection dans le sens où les objets géographiques et les entités spatiales reconnues existent en fonction des échelles géographiques (niveaux d'analyses géographiques déterminés par la résolution ou le niveau d'agrégation spatiale des données géo-spatiales). Chacune des échelles géographiques est caractérisée par des temporalités, des objets géographiques et des dynamiques qui lui sont propres.

L'étude de la réalité géographique est-elle indépendante de l'observateur ? Est-elle propre à l'observateur ? Est-elle dépendante du cadre conceptuel d'analyse présent : l'espace géographique ? Les réponses sont oui. Le modèle spatial est dépendant du système d'observation, la réalité est indépendante du système d'observation géomatique. Le concept d'espace géographique et celui de métropolisation déterminent les indicateurs géographiques et les objets géographiques à reconnaître. Ils donnent le cadre conceptuel d'analyse dans lequel les processus des transformations territoriales, d'urbanisation et de métropolisation observés vont être modélisés. Les démarches par télédétection se rapprochent de fait des théories effectives.

Les modèles spatiaux créés en géomatique à partir des images de télédétection spatiale ou aéroportée génèrent leur propre réalité (par extrapolation une dimension de la réalité en raison des caractéristiques spectrales et spatiales des données). Réalité qui est construite à partir de mesures spectrales, spatiales et temporelles de la réalité géographique – la surface de la Terre – par la reconnaissance des objets géographiques et entités spatiales connues du géographe.

A l'instar des modèles spatiaux créés par télédétection spatiale ou aéroportée, les modèles dépendants se caractérisent par le peu d'éléments arbitraires ou

ajustables de par la nature du système d'observation utilisé. Ils s'accordent et s'expliquent avec l'ensemble des observations effectuées. Ils peuvent être empiriquement simulés pour prédire des observations à venir (Hawking, Mlodinow, 2010).

2.1.4. CONSTRUCTION DES SAVOIRS ET CONNAISSANCES GEOGRAPHIQUES

L'approche géographique est à la fois sensible et rationnelle. Sensible par la représentation subjectivée de l'espace géographique à travers la description des paysages et des territoires dans laquelle elle est insérée comme observateur et acteur. Rationnelle par la description systématisée et mathématisée des paysages, territoires composant l'espace géographique avec en filagramme la recherche de « lois » régissant les processus et les dynamiques géographiques. « Lois » géographiques qu'il faut aller rechercher dans le non-visible (notamment par l'intermédiaire des mesures de télédétections spatiales) en dépassant la description apparente des paysages, des territoires, des populations. L'intérêt des démarches géomatiques est de permettre au géographique d'aller au-delà de l'apparence des choses qui s'offrent à nous dans la description et l'explication des dynamiques et des structures de l'espace géographique. Une description de la réalité (ou d'une des facettes de la réalité) qui passe par une conceptualisation rationnelle du Monde. Conceptualisation rationnelle qui vient à travers une formalisation des mécanismes qui régissent son fonctionnement. Un mécanisme rendu compréhensible par la construction de modèles géographiques et spatiaux. Donc à portée de la compréhension du géographe.

Adopter le cadre d'analyse des démarches géomatiques, c'est postuler à la dimension scientifique de la géographie. C'est également mettre l'accent sur la description et la modélisation des mécanismes qui régissent les structures et les processus de l'espace géographique à quelque niveau, domaine ou dimension qu'ils soient. Les démarches géomatiques gouvernent notre représentation de l'espace géographique et du Monde. Elles façonnent nos connaissances, les rapports entre les choses, en somme, elles construisent une forme de conscience de notre rapport au Monde. Elles structurent les modèles, les modes de formalisation, les rapports entre les objets géographiques.

Les démarches géomatiques nous font approcher une réalité des choses. Les modèles, les concepts développés sont des médiateurs de notre appréhension et compréhension de la réalité géographique. Concepts, connaissances, modèles descriptifs et explicatifs qui, une fois maîtrisés, deviennent des objets structurants et organisateurs de l'organisation de l'espace géographique, pouvant le transformer dans ses multiples dimensions physiques et humaines.

Chaque démarche géographique, à l'instar des approches géomatiques par télédétection, nous contingente dans la production et la construction de savoirs géographiques qui nous mènent à l'élaboration de nouvelles connaissances sur

les territoires et le Monde. Une connaissance qui permet d'identifier la nature des éléments et de comprendre les interactions, les processus, les dynamiques, les structures qui donnent et font ce Tout qu'est l'espace géographique. La géomatique est un moyen d'analyser dans sa totalité, ses parties, ses temporalités et sa multiplicité, l'espace géographique.

L'élaboration de connaissances géographiques se fait via un médiateur, le concept, celui d'espace géographique et de filtres, les méthodes géomatiques. De la nature du concept, du filtre plaqué sur la surface de la Terre va émerger une nouvelle prise de conscience qui mène à construire de nouveaux savoirs, une nouvelle connaissance géographique de l'homme, de la société, des territoires. Une connaissance qui est et reste partielle. Elle renvoie également à une transformation de la pensée contingente, « temporalisée », partialisée, du géographe vis-à-vis de la réalité du Monde.

2.2. METROPOLISATION ET GEOMATIQUE : ENJEUX SOCIETAUX

2.2.1. SYSTEMES GEOMATIQUES ET FONCTIONNEMENT DES TERRITOIRES METROPOLISES : ENJEUX INFORMATIONNELS

METROPOLISATION, INFORMATIONS ET CONNAISSANCES GEOGRAPHIQUES

L'utilisation des systèmes géomatiques, des données et des informations géographiques tient une part centrale dans le fonctionnement des territoires métropolisés, de l'économie, des échanges et des mobilités. Les besoins en données géo–localisées dans les systèmes d'informations géographiques et spatiales, de connaissances géographiques, sanitaires, infrastructurelles, environnementales, etc. sur les territoires sont croissants. Ils sont devenus indispensables. Aucun système de télécommunication, de communication, de sécurité, de gestion ou d'aménagement, ne peut fonctionner sans.

Les besoins en informations géographiques vont probablement tendre vers le développement de bases de connaissances géographiques et d'informations géographiques contextualisées. C'est-à-dire d'informations géographiques composites, d'informations géo–localisées prenant en compte le contexte géographique à une échelle ou un niveau spatial donné ou encore associant de la connaissance géographique. Connaissances géographiques qui seraient le fruit d'analyses, de modélisations ou de traitements géographiques qui peuvent, dès aujourd'hui, être formalisés sous des formes hypertextuelles, d'images, de cartes, de symboles graphiques (sémiologie graphique, chorèmes, etc.), d'animations dynamiques, de vidéos, de bases de données associées à l'objet ou des objets géographiques et à des lieux. Le besoin de connaissance géographique va se substituer à celui d'information géographique. Une connaissance géographique

de plus en plus complexe qui va devoir prendre en compte les différentes dynamiques géographiques, humaines, sociétales et environnementales et les processus de mutation territoriale dans leurs différentes temporalités et échelles.

Plusieurs problèmes doivent être résolus :

- ✓ Avoir la capacité de produire une ou des connaissances géographiques de façon normalisée à des niveaux de contextualisation spatiaux et territoriaux plus ou moins importants.
- ✓ Créer des modèles de traitement de l'information géographique suffisamment robustes et reproductibles afin de générer de la connaissance géographique. Jeux de connaissances géographiques produites qui doivent pouvoir être compris de manière simple et immédiate. Le développement de modèles sémantiques utilisant la géo–visualisation 3D et/ou avec les modèles de simulation et de représentation dynamique constitue une voie pas assez exploitée. Elle reste à l'état de reconstruction d'un paysage ou de simulation dynamique d'un processus géographique, qu'il soit géomorphologique, l'évolution d'un talweg par exemple, ou humain, la croissance urbaine. Les modèles de représentation sémantique (sémiologiques) dynamiques restent à établir.
- ✓ La mise en forme informatisée des connaissances géographiques, c'est-à-dire, conceptualisée et structurée d'un point de vue informatique. Elle relève de deux évolutions : (1) les architectures des systèmes d'information géographiques et des bases de données à gérer des bases de connaissances et de représentations qui seront de plus en plus complexes au fur et à mesure des avancées en géographie. Les avancées restent pour le moment modestes, pour ne pas dire insignifiantes. Les ouvrages en écriture dans ce domaine (Podobnikar et Čeh) ne font que reproduire des modèles d'architecture de données pensées et formalisées en SIG depuis les années 1980. (2) L'identification des éléments géographiques fondamentaux constituant l'espace géographique, le définissant ontologiquement. Recherche des ontologies géographiques, d'ontologies si possible universelles, qui est rendue nécessaire par le besoin en géomatique de reconnaître, d'identifier (sémantiquement, de donner un nom à l'objet ou/et le lieu géographique, un sens au processus de transformation territoriale), de formaliser et de modéliser les structures et les dynamiques de l'espace géographique. Dans les années 1990, plusieurs modèles ontologiques basés sur la phénoménologie et la pensée ont été développés (Smith, Mark, 1998) (Smith, 1999).

Le rôle, de plus en central joué par les systèmes géomatiques, est relativement récent dans la recherche appliquée aux sciences sociales et environnementales, même en géographie. La géomatique, pensée, organisée, positionnée comme des outils, des techniques, dénuée de toute valeur scientifique, intellectuelle et sociétale, notamment par des pans entiers de la géographie, a été et est cependant un vecteur fondamental de production de connaissances spatiales, géographiques et territoriales. C'est-à-dire, un des supports théorique, conceptuel et méthodologique à la construction de savoirs géographiques, d'analyses, d'interprétations et de pensées sur l'espace social et physique, l'espace géographique. La géomatique, objet de production d'informations, de connaissances et d'analyses, génère une construction systématisée, formalisée et intellectualisée de l'espace géographique, géo–localisée, rattachée à un lieu, formalisée souvent graphiquement, statiquement, mathématiquement, de plus en plus souvent textuellement.

Le niveau d'abstraction produit via le filtre de la cybernétique et du traitement numérisé des données, informations et connaissances géographiques, permet de « simplifier », de « synthétiser », de rendre « intelligible » un environnement géographique complexe à l'esprit humain. Tout comme nombre de démarches en géographie sociale, les démarches géomatiques en géographie s'appuient sur des postulats, des concepts et des théories qui sont trop souvent peu ou pas exprimés. Cette absence d'expression ou plutôt d'explication de la posture théorique prise dans les démarches géomatiques, que ce soit en télédétection, SIG, modélisation spatiale, etc., peut se comprendre de différentes façons :

- ✓ Le fait que les démarches géomatiques intègrent en elles, postures théoriques et conceptuelles.
- ✓ La géomatique est devenue une composante des pratiques sociales, une strate technologique totalement intégrée dans la quotidienneté et les pratiques des populations des territoires métropolisés ainsi que dans un nombre croissant de pays en développement. C'est, de ce fait, un indicateur du niveau de développement technologique et d'intégration des pratiques techno–sociétales, vecteur de l'insertion des sociétés et des territoires dans la mondialisation et la métropolisation. Elle forme un des socles techno–informationnels de mondialisation, du libre-échange et du libéralisme. Sa diffusion dans la sphère sociétale, économique, industrielle et politique tient, pour une large part, à la libération de l'économie avec l'émergence d'une industrie géo–spatiale et géomatique dynamique. Elle répond à une demande sociétale croissante en matière d'informations et de connaissances géographiques, tout comme de géo–localisation et de contextualisation des objets géographiques dans l'espace géographique ou leur environnement géographique. La valeur et la vocation sociétale déclinées dans leurs multiples dimensions tiennent à

leur capacité à lier spatialité, géographies physiques et sociales, géo–localisation des lieux, objets et individus, à associer, fusionner, lier, intégrer, analyser, produire des informations et des connaissances.

2.2.2. ENJEUX GEOPOLITIQUES

UN INDICATEUR ET UN VECTEUR D'UN CONTROLE SOCIETAL CROISSANT

La géomatique est une composante sociétale structurelle de la métropolisation et de la mondialisation. Elle est un facteur tout autant d'une valeur structurant des pratiques sociales, de l'organisation, de la gestion et de l'aménagement des territoires, des mobilités et de l'économie. Elle le tient du fait que c'est une « couche » intégrée à part entière des technologies de l'information qui occupe une place de plus en plus centrale, un vecteur de transformation des sociétés par sa capacité à produire de la connaissance, de la diffuser et à rendre intelligible l'espace géographique, ses processus, ses dynamiques, ses organisations, ses structures, etc. Elle est un moyen de techno–connaissance politique façonnant la vision géopolitique, les réflexions, les prises de conscience et les décisions des individus, des politiques et des administrations, un secteur économique en pleine croissance depuis trente ans qui a bénéficié d'un besoin croissant en données, informations et connaissances géographiques, en systèmes de traitement, de suivi et de gestion géographique des territoires avec la numérisation des territoires et de la société dans de multiples dimensions et a bénéficié du développement, puis de l'omniprésence des systèmes d'information à tous les niveaux d'organisation de la société, des entreprises, des administrations, infrastructures, vecteurs de mobilités (avions, véhicules, trains, navires, etc.). Son rôle s'est encore accru avec la fin de la guerre froide et le glissement des systèmes de surveillance et d'analyse spatiale, militaires et de renseignements aux applications duales civiles, environnementales, économiques (productions, ressources, subventions, etc.) et « sécuritaires » (risques environnementaux, protection des citoyens, etc.). Le contrôle territorial s'est déplacé vers le sociétal dans la sphère civile par le géographique et le spatial, c'est-à-dire les SIG, la modélisation spatiale et la télédétection. Le glissement du militaire vers le civil a ouvert une brèche dans laquelle le sujet sociétal, la société, l'économie, les hommes, l'environnement, les territoires, deviennent des objets de surveillance, d'analyse, de contrôle, de gestion, d'optimisation, plus que d'interprétation et de réflexion devant conduire à une amélioration de la condition de l'Homme. L'Union européenne par son programme *Global Monitoring Environment and Security (GMES)* tient à imbriquer les questions sociétales et environnementales aux questions sécuritaires, ces dernières prenant le pas sur le militaire. On pourrait répondre que l'hybridation des problématiques environnementales et sociales au sécuritaire vient de l'impossibilité des programmes de l'Union européenne à financer des programmes de défense. Ils apparaissent dans des

programmes civils dans la partie « sécurité ». Il est cependant difficile de croire que c'est la structure même des appels d'offre qui conditionnent la mise en place de systèmes d'observation et de surveillance sécuritaires appliqués à l'espace géographique et à l'environnement.

L'intrusion du sécuritaire et du renseignement dans la sphère civile est justifiée par des impératifs de protection des citoyens (expositions aux risques naturels, etc.), économiques (Politique agricole commune, gestion des ressources naturelles) et migratoires (protection des frontières de l'Union européenne, contrôle des mobilités). Son aire de surveillance ne se cantonne pas à l'Union européenne et à ses marges. Elle s'étend dans nombre de domaines dédiés à l'observation de la totalité de la surface de la Terre (évaluation et modélisation des impacts d'un tremblement de terre par télédétection spatiale et aéroportée à titre d'exemple). La géomatique et ses applications sécuritaires dédiées au contrôle et à la surveillance, à travers notamment les programmes de GMES, se présente surtout comme une réponse géopolitique à trois étages :

- ✓ L'affirmation politique interne des prérogatives de l'Union européenne donnée par les Etats membres par une politique géo-spatiale de surveillance et de contrôle sur ces mêmes Etats membres. Elle se caractérise par de la recherche opérationnelle avec la mise en place de méthodologies plus ou moins automatisées de traitement de vastes étendues visant, par exemple, à identifier les types de cultures et les comparer avec les bases de données fournies par les ministères de l'agriculture de chaque Etat membre.
- ✓ Un essai de positionnement géopolitique externe (à l'international) à travers le double prisme de la domination informationnelle d'origine spatiale et géographique et le soutien (informationnel) à l'aide apportée aux populations touchées par un conflit, une catastrophe naturelle, etc. Cette approche se confond avec les applications géomatiques de soutien aux opérations d'assistance mises en place par la Food and Agriculture Organisation (FAO).
- ✓ Une réponse à la politique étasunienne de domination informationnelle (Information Dominance). Politique de domination et de contrôle de l'info–sphère géographique qui se fait à travers des SIG à vocation commerciale, politique et utilitaire comme Google Earth ou Virtual Earth, la mise à disposition gratuite des données images (Landsat series, NOAA, etc.), cartographiques (vectorielles), topographiques (Surface Relief Terrain Model), de l'US Global Survey (USGS), de la NASA ou du National Geospatial Agency (NGA), etc. L'objectif des Etats-Unis est, par la gratuité apparente des données géographiques, de générer une dépendance aux systèmes de production de données géo–spatiales et un contrôle informationnel indirect de la qualité et de la pertinence des informations, analyses et résultats produits à partir de celles-ci. Cette dépendance est particulièrement forte pour les utilisateurs institutionnels, scientifiques, économiques ou industriels dépendant des sources produites par les

agences géo–spatiales étasuniennes. La dépendance économique est également de plus en plus marquée avec le développement d'un nombre croissant d'applications géomatiques pour l'aménagement, le tourisme, le markéting territorial, la sensibilisation à l'environnement, etc. sur les plateformes Google Earth ou Virtual Earth.

La réponse ou plutôt l'affirmation de l'autonomie de l'Union européenne en matière de bases de données géo–spatiales se fait à travers la production des bases de données géo–spatiales CORINNE LAND COVER, la construction d'infrastructures d'informations dans le cadre du programme INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community) et de ses trente-quatre thématiques ou, par exemple, du programme SEIS (*Shared Environmental Information Service*).

Les systèmes géomatiques, moyen d'ingénierie techno–informationnelle de la mondialisation, des territoires métropolisés et de la société de l'info–connaissance, sont avant tout des objets technologiques de connaissance géographique et sociétale. Ils constituent un enjeu économique, géopolitique et social, les trois sphères interagissant et s'imbriquant l'une à l'autre.

Ils sont passés, en sciences sociales et plus particulièrement en géographie, du statut d'outil technique à celui de démarches scientifiques privilégiant, d'une part, les entrées par l'espace - le spatial - la localisation – le ponctuel - et les lieux – identification des limites – et, d'autre part, les entrées par la mesure biophysique des objets géographiques non directement visibles en télédétection (fenêtres particulières du spectre électromagnétique), l'analyse, la combinaison, la modélisation d'entités spatiales conceptualisées et géo–localisées, les objets géographiques que ce soit en SIG, en modélisation spatiale ou en traitement d'images.

Si le rôle des systèmes géomatiques est bien établi comme moyen techno–informationnel et d'ingénierie support des vecteurs technologiques concourant à la mondialisation et à la métropolisation, à l'émergence de modes de vie et de pensées métropolisées, leur apport aux sciences sociales et à certaines démarches en géographie sociale est quelque peu mitigé.

Il tient de moins en moins à la complexité des démarches géomatiques qu'à l'utilisation des systèmes géomatiques conçus. Les progrès dans les interfaces homme–machine, l'automatisation de requêtes, de traitements et d'analyses, la diffusion de SIG ouverts ou libres en ligne (par Internet), les rendent en apparence plus faciles d'utilisation. Ils se limitent cependant à la géo–visualisation en 2D ou 3D des données ou informations géographiques indexées ou non à une base de données attributaire ou hypertextuelle, à leurs superpositions ou à la géo–localisation de certains lieux par des requêtes de type Structured Query Language (SQL).

L'intégration de raisonnements fondés sur la spatialité, la localisation, les lieux et les objets conceptualisés et formalisés mathématiquement et graphiquement (par une sémiologie) dans les démarches géographiques en sciences sociales, n'a

pas eu le même impact que dans d'autres disciplines s'en réclamant ou s'identifiant aux sciences de l'Homme et de la société ou de l'environnement. La notion d'espace, celle de lieu et de localisation connaît depuis une vingtaine d'années une large diffusion dans les sciences sociales et environnementales que ce soit en économie, sociologie, histoire, biologie, écologie, etc. Diffusion qui en économie s'appuie sur les travaux de géographes et d'économistes « spatiaux » en modélisation. Qui dans d'autres disciplines s'appuie sur l'intégration, voire l'assimilation des concepts géographiques et ontologiques des constituants spatiaux de l'espace géographique. Assimilation qui est aujourd'hui rendue possible grâce à l'existence d'ensembles logiciels d'analyse spatiale, de SIG et de traitements d'images commerciaux intégrant les modèles et les méthodologies standards du traitement d'image et de l'analyse spatiale. Les besoins en données géo–référencées sont importants et croissants, tout comme les modèles d'analyses spatiaux (Goodchild, Janelle, 2010).

GEOMATIQUES : SCIENCE OU INGENIERIE GEOGRAPHIQUE ?

Les démarches d'analyses géomatiques, du fait de la spécificité de leur entrée par l'espace et la géo–localisation, contiennent en elles-mêmes une posture théorique. Elles sont dans le même temps un objet social structurant les territoires, un indicateur du niveau de développement technologique et un cadre d'analyse de la société. L'insertion des concepts géographiques et spatiaux dans les systèmes et technologies de l'information permet de mesurer à la fois le rapport de la société et des individus aux technologies de l'information et leur relation à l'espace géographique. Les démarches géomatiques sont dans le même temps des outils d'aide à la décision et des supports informationnels à l'ingénierie territoriale (aménagement, urbanisme, génie civil, etc.). Les besoins de l'ingénierie territoriale portent, pour l'essentiel, sur l'information géographique dédiée, des analyses (production de connaissances pour la prise de décisions) et la représentation cartographique, graphique ou image des objets géographiques dans leur environnement spatial ou du territoire dans son ensemble (les orientations « objet »).

Le caractère multidimensionnel des démarches géomatiques et multifonctionnel des applications a généré une prémices de débat sur la nature et la valeur de la géomatique : des outils ou une science (Pickles, 1997) ? Mon positionnement est sans ambiguïté : la géomatique est avant tout une démarche scientifique qui, du fait de son caractère technologique et informationnel, en fait également un objet de recherche dans les sciences de l'information et de la communication et un système d'ingénierie territorial, géographique et spatial. La géomatique, contrairement à ce qui est trop communément présenté en géographie, n'est pas un outil. Elle est le résultat de positionnements théoriques en géographie qui ont été juxtaposés, puis intégrés par le jeu de l'interdisciplinarité avec les théories de l'information et la cybernétique. Posture scientifique pluridisciplinaire entre la

géographie cartographique du 19e siècle (géographie et cartographie ne faisaient qu'une (Nicolas, 1997)), informatique, mathématique qui, à partir des années 1990, s'est enrichie des sciences de l'information et de la communication et des apports conceptuels, méthodologiques de la révolution introduite par la géographie théorique et quantitative dans les années 1960, 1970 et 1980. Sur le plan scientifique, la géomatique résulte d'une mise en phase, d'une mise en application des concepts géographiques dont, par la suite, elle est elle-même génitrice, productrice. La géomatique est de ce fait une démarche de pensée scientifique créatrice de connaissances géographiques, spatiales et territoriales, de modèles, de conceptualisation et de représentation du Monde. La géomatique tient son « étiquette » d'outil, du fait qu'il est un des premiers produits matérialisés issu de la forme informatique des concepts géographiques grâce aux progrès enregistrés par les sciences et technologies de l'ingénieur, de l'information et de la cybernétique. Elle se veut le point final ouvrant de nouveaux champs de connaissances géographiques et de compréhension de l'espace géographique, du Monde, d'une évolution de la pensée de l'Homme sur l'espace géographique et la manière de l'aborder, l'analyser, l'interpréter et le représenter.

Devant la diversité des applications, des entrées disciplinaires et des approches (télédétection, SIG, cartographie, analyse et modélisation), la géomatique se définit comme la *science of geographic information systems, the science of geographic information* (Pickles, 1997), science géo–spatiale, science géomatique, etc. Elle prend, en fonction de la nature des applications, différentes terminologies : systèmes d'informations spatiaux, systèmes d'informations urbains, systèmes à références spatiales, systèmes d'informations territoriaux, etc. Quelle que soit la nature des applications, les systèmes géomatiques se rapprochent ou selon, se confondent avec les technologies concourant à la surveillance, au suivi, au contrôle et à des « cartographies » diagnostiquant, caractérisant par exemple une situation socio-économique ou socio–environnementale, un état de l'espace géographique, que ce soit son organisation, ses structures territoriales, ses dynamiques spatiales et les processus géographiques. Une tendance lourde, structurée par des méta–projets de surveillance mondialisée, comme LandScan, Global-Eyes aux Etats-Unis ou GMES en Europe, tendent à croiser intérêts géopolitiques et connaissances géographiques, spatiales et territoriales. Ce qui n'est en rien nouveau en géographie.

IMBRICATION DU MILITAIRE DANS LE SOCIETAL, DU SECURITAIRE DANS L'ENVIRONNEMENTAL

Nous sommes face à un glissement des intérêts géopolitiques et militaires sur le sociétal, le sécuritaire et l'environnemental. Les intérêts géopolitiques et militaires pour les questions énergétiques ne sont pas nouveaux. Ceux touchant

aux questions environnementales, à l'émergence de nouvelles formes d'organisation territoriales à l'instar des espaces métropolisés et au changement climatique, sont devenus un axe prioritaire de la géopolitique de défense étasunienne depuis les attentats du Wall Street Center du 11 septembre 2001. L'objectif est de diversifier les sources énergétiques et d'approvisionnement en promouvant les énergies « vertes », l'écologie et l'environnement pour réduire autant que ce peut la dépense des Etats-Unis à l'Arabie saoudite et aux sources d'approvisionnement en pétrole moyen-oriental.

Sur le plan géographique, cette nouvelle orientation géopolitique passe par la création de nouvelles formes d'aménagement et d'urbanisation, le renforcement de l'utilisation des technologies de l'information et de la communication, de la géomatique pour optimiser la gestion, l'organisation et le fonctionnement des territoires tout autant que leur planification. Elle passe également par un renforcement intégré, holistique et particulier de modélisation et d'analyse multi–échelles en temps réel ou décalé (mises à jour régulières sur des périodes de temps déterminées) des processus de transformation de l'espace géographique et de leur interaction avec les phénomènes climatiques, les catastrophes, les conflits ou tout autre évènement.

L'imbrication croissante du contrôle sécuritaire sur les territoires, l'environnement et les populations ne fait que renforcer une tendance forte héritée des années 1990 issue de la révolution dans les affaires militaires (RAM) : l'insertion du civil dans le militaire, du militaire dans le sécuritaire, du privé et de l'institutionnel dans le contrôle des populations, de l'économie et territoires, la privatisation des opérations par le civil à travers les entreprises privées, notamment en géomatique et plus particulièrement en télédétection. Cette privatisation des systèmes d'observation, de la production des données, informations et connaissances géographiques, des analyses, modélisations et interprétations qui s'est opérée au milieu des années 1990 a renforcé le caractère dual civil, militaire et sécuritaire des applications, données, informations, analyses, connaissances géographiques. Elles peuvent dans le même temps revêtir une dimension sociétale, environnementale humaniste ou sécuritaire (le plus souvent être utilisées à l'insu du géographe). Ce caractère « hybridé » dans lequel le sociétal, l'environnemental, le sécuritaire et le militaire tendent à se confondre ou se superposer, est renforcé par la délégation de certains Etats du contrôle des territoires (pouvant aller jusqu'à la géo–localisation et le suivi géo–spatialisé de l'individu sur le territoire) par le privé ou des institutions supranationales comme l'Union européenne. La privatisation des systèmes d'observation, de traitement et d'analyse des données n'a fait que renforcer cette tendance. La notion de contrôle territorial et sociétal n'est plus uniquement le fait de services étatiques spécialisés mais d'un champ beaucoup plus large rassemblant acteurs économiques et civils. Elle n'a fait que renforcer le flou croissant entre civil et militaire, sciences géographiques et intérêts géopolitiques, contrôle économique et sociétal, renseignement territorial et production de connaissances sur l'espace géographique à des fins humanistes, de

compréhension des phénomènes sociétaux et des progrès que l'on peut en « retirer » pour le bien-être et le futur de la société.

Le contrôle sociétal délégué à des institutions civiles nationales ou supranationales, publiques et privées, se caractérisant par un désengagement partiel des Etats tient à trois raisons :

- ✓ La disparition des frontières « symboliques » entre sciences et sécurité, sciences, contrôle territorial et renseignement spatial. Elle est portée par l'avance technologique, scientifique et analytique des sciences géomatiques et des applications développées dans les sciences sociales et géographiques depuis la fin des années 1990. Elle fait de la géomatique, de ses démarches et applications un objet scientifique, d'information et de connaissance couvrant un très large spectre d'usages : connaissance scientifique, aménagement, gestion territoriale, contrôle sociétal et environnemental, renseignement spatial, humanitaire, etc.
- ✓ L'insertion dans l'économie de marché libérale des sciences géomatiques et de l'information géographique comme produit et outil économique. Produits économiques qui tiennent leur légitimité commerciale aussi bien des besoins croissants en systèmes géomatiques, informations et connaissances géographiques, que d'une nécessité de justifier l'utilité des programmes spatiaux d'observation de la Terre.
- ✓ La délégation à des instances privées et supranationales de certaines applications qui ne peuvent pas être éthiquement ou politiquement acceptables pour un Etat : contournement de certaines applications peu ou pas en phase avec la législation, la morale politique ou l'éthique sociétale, délégation de certaines fonctions pour des raisons de politique intérieure (délégation du contrôle des subventions agricoles par exemple auprès de la Commission européenne, pour éviter des conflits avec certaines catégories d'électeurs, etc.).

Elle pose une question éthique qui semble, pour la société civile, d'avantage toucher à la précision des données spatiales et géo–localisées, plutôt qu'à leur traitement et analyse. L'enjeu n'est plus, contrairement au 20e siècle, la précision, l'accès ou la question de la disponibilité des données, mais leur traitement, analyse et interprétation. Les données géographiques et spatiales n'ont qu'une valeur informationnelle et d'utilisation limitée, sans analyses, traitements, modélisations et interprétations. La capacité d'extraire de la connaissance géographique est très limitée sans traitements et analyses.

L'enjeu, aujourd'hui, n'est plus de disposer de masses de données, mais de pouvoir les catégoriser, les classer, les traiter et surtout les analyser et les interpréter. Ce qui demande des capacités en termes humains, de compétences, de formations, importantes et onéreuses. Ce qui peut ou pourrait en partie expliquer le besoin de glisser vers des applications duales, « hybridées », floues dans lesquelles militaires, scientifiques et civils se confondent pour pouvoir disposer plus ou moins directement des compétences scientifiques et

ingénierales qui manquent aux institutions étatiques ou supra–étatiques. Cette approche permet une démultiplication des systèmes d'observation de la Terre complémentaires, voire similaires, des méthodologies de traitement et d'analyse, la création et la mise à jour des bases de données géographiques et une multiplication des analyses et interprétations qui ont, malgré une relative hétérogénéité, l'intérêt d'être produites, conçues, pensées dans un cadre d'analyse contraint et normalisé.

La nature des applications détermine-t-elle le caractère scientifique ou non des démarches géomatiques ? La géomatique se retrouve à l'interface entre sciences, technologies et applications sociétales et plus particulièrement géographiques. Ce qui en fait un objet scientifique et technologique aux multiples entrées. Une démarche technoscientifique qui par la spécificité de ses entrées par le géo–spatial (mesures spatialisées systématisées de l'espace géographique, géo–localisation, géo–référencement) sur les territoires, en a fait un objet géopolitique, d'ingénierie et commercial de production de connaissances géographiques (sociétal, environnemental, physique).

DE L'OBJET SCIENTIFIQUE A L'OBJET DES PRATIQUES SOCIALES

La mise en cause du caractère scientifique des démarches géomatiques tient à ses dimensions applicatives aux métiers de l'ingénierie spatiale et territoriale dans les années 1990, à la généralisation de ses usages dans différentes disciplines et au fait que c'est devenu un marché de plusieurs dizaines de milliards d'Euros soutenu par une industrie géo–spatiale dynamique, largement subventionnée par les Etats ou les instances supra–étatiques. L'absence de réelle réflexion sur les objets scientifiques de la géomatique, la captation de sa dimension applicative à haute valeur ajoutée par un marché en pleine croissance, le restreignant à ses attributs techniques et informatiques, ont fait des approches géomatiques, des objets, des modes de pensée, perçus sans réelle valeur intellectuelle. L'absence de valeurs scientifiques et intellectuelles de la géomatique, perçue telle quelle par de nombreux géographes, a été longtemps accentuée par les difficultés structurelles de la géomatique à penser ses objets d'étude en raison même de son caractère transdisciplinaire. Les objets de recherche en géomatique sont bien mieux formalisés en informatique, mathématique ou en sciences de l'information et de la communication qu'en géographie. Cela tient probablement en partie à :

- ✓ La prégnance des démarches en géographie sociale, fortement ancrée dans le paysage universitaire français, avec ses objets, ses méthodes et ses postures théoriques et sociétales.
- ✓ La présence d'un fort courant de géographie descriptive, également fortement ancré dans ses méthodes et postures scientifiques.

Ce qui a eu pour conséquence de positionner ce mode de pensée de l'espace géographique qu'est la géomatique, en raison même de la nature

«technologique», dans une configuration interdisciplinaire pour renforcer son assise dans le paysage académique et s'affirmer comme et dans le champ scientifique au contact des sciences informatiques, mathématiques ou physiques.

Cela tient également au fait que les quelques géographes universitaires qui se sont investis dans le développement de la géomatique ont été progressivement dépossédés de leur objet d'étude au profit des applications d'analyse et d'ingénierie territoriales avec la montée en puissance des entreprises privées soutenues par un marché à haute valeur ajoutée en pleine croissance. Avec l'entrée d'une partie de l'humanité dans l'ère de la société numérique et de l'information, la géomatique, avec la numérisation de l'économie, de l'espace géographique et l'informatisation des modes de gestion des territoires, a été et reste un vecteur de transformation et de « modernisation » du champ sociétal. Les géographes qui avaient et devaient jouer un rôle important dans ce processus de transformation de la société ont été quasi absents du fait de la place faite à la géomatique académique. Rôle restreint à une vision technique et productive d'informations géographiques et de cartes. Les difficultés de la géographie française de définir le rôle des sciences géomatiques (comme ce fut le cas pour la démographie ou les sciences de l'environnement) en son sein a, durant plus de deux décennies, durablement fragilisé la géomatique. La question de sa légitimité dans la géographie a même été posée. Devant l'absence de soutiens et l'émergence d'une masse critique suffisante, le rôle central joué par les géographes sur une discipline qu'ils ont créée, s'est effiloché au profit d'autres disciplines et du secteur privé.

De par sa posture, la géographie s'est coupée d'un des moteurs fondamentaux participant aux changements sociétaux en cours, concourant à la restructuration et à la modernisation de l'économie, de la politique et des modes de vie (Pickles, 1997). La géographie est totalement passée à côté du rôle scientifique et sociétal qu'elle aurait dû assumer, une nouvelle fois, par son incapacité à peser et à penser le Monde ou la Société, qu'en dehors d'une description d'un présent déjà passé, trop souvent à travers des filtres idéologiques ou politiques érigés en dogmes, qu'en démarches d'analyses clairement assumées (avec ses objets, intérêts, limites et contraintes).

La géomatique, démarche d'analyse de l'espace géographique, est devenue un objet de pratiques sociales qui n'a pas ou peu fait de réflexions épistémologiques, sociales ou éthiques en dehors de la question de la production, de l'accès et de l'utilisation de données individuelles géo–localisées (et géo–référencées).

2.2.3. ENJEUX DE LA GEOMATIQUE EN GEOGRAPHIE

Les analyses et les développements méthodologiques basés sur les entrées spatiales, les lieux et la localisation des objets géographiques ne sont plus aujourd'hui uniquement le fait de la géographie. Elles font de la géomatique un système d'analyse, de traitement et de modélisation, transdisciplinaire qui, par ses capacités d'intégration est capable de générer ou, du moins, d'associer des strates d'informations et de connaissances issues de différentes disciplines. Cette capacité d'intégration transdisciplinaire des démarches géomatiques est sous exploitée, bien que réelle. L'utilisation des systèmes géomatiques en santé ou épidémiologie environnementale est un excellent exemple : les analyses mettant en évidence les facteurs socio–environnementaux sur la santé des individus intègre les structures et les morphologies urbaines, les répartitions des populations et des individus, l'occupation et l'utilisation des sols, les mobilités et les lieux de vie, etc.

La diffusion des démarches et des applications géomatiques aux sciences sociales et de l'environnement est également portée par les relatifs progrès dans l'interface homme/machine et leur relative facilité d'utilisation pour les fonctions basiques. L'automatisation de certaines procédures et la modélisation ont renforcé la diffusion de la discipline à travers les SIG, la modélisation spatiale et la télédétection. Il reste que la géomatique à travers la télédétection spatiale, les SIG, la modélisation spatiale, l'analyse de données malgré d'importants efforts déployés, reste encore relativement marginalisée en géographie humaine et sociale. La diffusion des démarches et des méthodes a été et reste surtout contrainte par les nécessités de formation en géomatique en masters pour répondre aux besoins du marché de l'emploi au détriment de la recherche. La géographie humaine en France est plus portée par la sociologie, la géographie descriptive ou les approches post–modernes que par les réflexions relatives au raisonnement spatial, géographique ou territorial, qui est intrinsèque aux démarches géomatiques. La relative faible diffusion en géographie et l'appropriation du champ disciplinaire par d'autres branches de la Science sont confortées par le peu de géographes, géographes « académiques » qui sont de surcroit fortement segmentés en différentes « écoles » scientifiquement, conceptuellement et politiquement et la nécessité de la géographie professionnelle de répondre à des besoins du marché de plus en plus larges.

Les enjeux scientifiques liés au raisonnement spatial, géographique et territorial, s'ils sont croissants dans les autres disciplines, risquent d'échapper à la géographie, notamment sur l'un des points forts de la géographie théorique et quantitative, le raisonnement spatio-temporel et les raisonnements dynamiques (mobilités) et temps–réels. Raisonnements qui, pour comprendre les dynamiques de vie métropolitaines et l'émergence des territoires métropolisés et les processus y conduisant, sont primordiaux. Les modèles spatio-temporels à travers la géo–visualisation dynamique en 2D ou 3D et la facilité de

compréhension qu'ils offrent sont un exemple des potentialités qui sont données aux géographes et aux non géographes. Encore faudrait-il que l'avance qui a été acquise par plus de quarante années d'investissements avec et aux frontières des mathématiques, de l'informatique, des sciences de l'information et des sciences cognitives ne soit pas, une fois de plus, un rendez-vous manqué comme ce fut le cas avec la démographie, l'aménagement, l'environnement ou la césure opérée avec la géographie physique (la séparation entre géographie physique et géographie humaine, la fin du paradigme Homme/Nature marque symboliquement le postulat de la primauté de l'Homme et de la Société sur l'espace géographique/ physique/ environnement).

Les besoins exponentiels en connaissance et en intelligence géographique et spatiale formalisées, s'appuient sur deux concepts clés de la géographie : l'espace et le lieu (Nicolas, Marcus, 1999) (Gadal, Nicolas, 2000) (Goodchild, Janelle, 2010). La recherche des concepts géographiques clés, des ontologies géographiques constitue un des domaines de recherche clé dans la recherche de la modélisation des processus géographiques et des dynamiques territoriales. L'idée est de rechercher et d'identifier des règles spatiales et géographiques (des lois ?), de développer des modèles spatiaux en identifiant et formalisant des ontologies géographiques qui font, structurent et organisent l'espace géographique. Idée qui passe par l'organisation des SIG et la structuration de leurs bases de données et modèles d'analyse spatiaux en fonction des ontologies géographiques, conceptualisés et formalisés en géomatique à travers la notion d'objet géographique. Objet géographique (sémantique) qui a un lieu, une localisation, qui a une sémiologie, une morphologie, une signature biophysique (spectrale), une histoire, un sens, une symbolique. L'intérêt est de savoir s'il est possible de créer des SIG, des modèles spatiaux qui ne soient pas contraints par les données légales (cadastres, recensement, bases de données géographiques, etc.) et les architectures SIG créées en conséquence mais qui soient structurés par rapport à des objets ontologiques constitutifs de l'espace géographique.

Les images de télédétection spatiale sont de ce fait une entrée privilégiée. Elles n'ont a priori que peu de contraintes par rapport aux bases de données géographiques légales. (Le choix des caractéristiques des capteurs est guidé par les utilisations possibles des données de télédétection, les avancées et contraintes technologiques du moment de conception). Elles enregistrent les caractéristiques biophysiques de la surface de la Terre, l'espace géographique, dans un domaine spectral et une résolution spatiale particuliers, en couvrant une surface de l'espace géographique déterminée. Les images de télédétection spatiale sont une mesure biophysique d'une réalité qui est non visible à l'œil ou qui peut l'être partiellement selon les caractéristiques spectrales et spatiales du ou des capteurs. Les données issues de la télédétection sont relativement « vierges » des contraintes légales et formelles qui façonnent les bases de données géographiques orientant de ce fait avec plus de force les analyses et les résultats. Les plus faibles niveaux de formalisation et d'abstraction des images de télédétection, dégagés de toutes contraintes légales comme les entités

administratives, permettent par traitement et analyse d'images de reconnaître, d'identifier et de formaliser les objets, formes et ontologies géographiques à l'instar des lieux.

2.3. UNE APPROCHE INTEGREE MULTI–NIVEAUX, TEMPORELLE ET REGIONALE

2.3.1. UNE APPROCHE MULTI–CAPTEURS, MULTI–RESOLUTIONS

APPROCHER LE MULTI SCALAIRE EN GEOMATIQUE

Analyser la multiplicité des relations multi–scalaires en géomatique n'a été que partiellement explorée. Elle implique l'utilisation de modèles basés sur la théorie des graphes et les réseaux de neurones (Gadal, 2004) pour prendre en compte la multiplicité des relations multi–scalaires entre les niveaux géographiques.

Ce rapport « d'échelle » entre les niveaux géographiques propres à la métropolisation remet en cause les modèles hiérarchiques d'organisation du territoire ou selon, se greffe sur les structures spatiales hiérarchisées existantes court-circuitant de fait l'organisation (plus ou moins) pyramidale des territoires basée pour l'essentiel sur les hiérarchies urbaines. Par exemple, l'individu métropolisé, pris comme objet géographique, est une composante du niveau local, urbain, régional et mondial du territoire métropolisé, lieu de la mondialisation. Il interagit directement quel que soit le niveau géographique au sein même du territoire métropolisé ou un autre territoire métropolisé avec par exemple un individu, le niveau local ou régional. Cette imbrication directe entre les niveaux géographiques, le « *glocal* » ou l'imbrication du local dans le global ou du global dans le local pose le problème de sa mesure, analyse et représentation en géomatique.

Modéliser, représenter en géomatique l'aspect multidimensionnel et multi–scalaire de la métropolisation a été expérimenté dans le cadre de la modélisation de la dynamique des objets géographiques incluant l'utilisation d'images satellites métriques et d'un système d'information géographique dans lequel avait été implémenté un modèle d'analyse neuronale pour étudier la dynamique des objets géographiques urbains et périurbains à différentes échelles (Gadal, 2004).

Si approcher la dimension multi–scalaire de la métropolisation dans les relations individualisées permet de comprendre la complexité des connexions, liens, dépendances et des mobilités des objets géographiques donc d'en analyser les dimensions sociogéographiques qui font la métropolité, l'analyse de l'inscription spatiale des processus de métropolisations s'accommode mal des démarches multi–scalaires. Il est difficile, voire pour le moment impossible de mesurer, modéliser, analyser et représenter spatialement l'évolution des territoires autrement que par des approches multi–niveaux.

Générer de véritables liens multi–niveaux en géomatique est limité à un nombre restreint de méthodologies. La modélisation des liens multi–niveaux se fait généralement par un emboîtement de régions en sous-régions, du Tout, la Terre, en Parties et sous Parties, des ensembles régionaux, suivant un modèle d'arbre ensembliste (Gadal, Jeansoulin, 2000).

En fonction des caractéristiques des capteurs embarqués sur les vecteurs spatiaux ou aéroportés, chacun des quatre niveaux caractéristiques et caractérisant la métropolisation identifiés comme pertinents (Gadal, 2001), (Gautier et al., 2003), les niveaux local (l'habitat), urbain, régional et mondial (global) vont être étudiés avec l'emploi d'images DMSP ou MétéoSat Seconde Génération (MSG) pour le niveau global, des images Spot XS, BI et Landsat MSS, TM, ETM+ pour les niveaux régional et urbain, Kompsat-2 ou Ikonos 2A pour les niveaux urbain et local.

L'analyse des différents niveaux géographiques répond à des démarches méthodologiques et à des objectifs heuristiques différents :

- ✓ Les contributions à la connaissance géographique diffèrent en fonction des niveaux géographiques. Si les niveaux global et urbain ont été largement étudiés que ce soient en économie géographique ou en télédétection notamment avec les images prises de nuit du capteur kilométrique OLS-PMT embarqué sur le vecteur DMSP, force est de constater que le niveau régional et le niveau local ont été peu étudiés. Taylor fait également la même remarque dans les démarches économiques (Taylor et al., 2002).
- ✓ Ce déficit de connaissances est également caractérisé par une carence de connaissances empiriques sur la réalité spatiale et géographique des processus de métropolisation. Les mêmes auteurs, Taylor, ..., tout comme Gautier, Lacour et Puissant font le même constat : [...] *So, even if the word metropolization is apparently well know, it suffers from serious evidential deficit of empirical findings* (Taylor et al, 2002) (Gautier et al, 2003). Ce manque de connaissances sur l'inscription géographique et spatiale de la métropolisation est également mentionné par Brenner dans l'article "Decoding the newest metropolitan regionalism in the USA: a critical overview" (Brenner, 2002) : [...] *However, the reality and the relevance of*

regional metropolitanization need to be more discussed and better identified [...]

- ✓ Les méthodologies de traitement d'images développées vont faire l'objet d'approches différentes dans la construction des chaînes de calcul en raison et en fonction des données de télédétections utilisées qui vont des images centimétriques mono–spectrales radars Ramses aux images météorologiques multi–spectrales MSG, en passant par les jeux de données hyper–spectraux Themis 100T et les images multi–spectrales métriques Kompsat-2 ou Egypsat-1. La pluralité des méthodes de traitement et d'analyse d'images développées se confond avec la multiplicité des capteurs. Multiplicité des capteurs qui va permettre d'analyser les processus de métropolisation à différents niveaux géographiques et mieux cerner à la fois les données images et les méthodologies les plus pertinentes. Approche multi–capteurs qui va permettre de confronter, de compléter les résultats, les informations géographiques produites, d'enrichir les connaissances géographiques sur les phénomènes de métropolisation en cours.

APPROCHE MULTI–CAPTEURS, MULTI–NIVEAUX, MULTI–ECHELLES

DEMARCHE MULTI–CAPTEURS

L'approche multi–capteurs permet d'analyser les processus de métropolisation dans leurs différentes dimensions scalaires : de l'échelle subcontinentale au bâti. La résolution spatiale et subsidiairement la résolution spectrale des capteurs utilisés donnent le niveau d'analyse géographique à travers les objets géographiques que l'on peut ou non détecter et l'échelle d'analyse géographique. La résolution spatiale est indirectement proportionnelle à la surface couverte par l'image de télédétection. Les images DMSP permettent de couvrir des portions de l'espace géographique de 3000 × 3000 kilomètres avec une résolution spatiale en smooth mode de 7,29 km². Les images métriques Kompsat-2 d'une résolution spatiale de 1m² en mode panchromatique couvrent des surfaces de 15 × 15 km. L'altitude de croisière des satellites joue sur le rapport surface couverte/résolution spatiale au sol.

La résolution spatiale des images de télédétection détermine le niveau d'analyse géographique, c'est-à-dire des types objets géographiques détectables, défini par : (surface des objets/résolution spatiale) ramené à la résolution spectrale. Pour être reconnu, un objet doit être couvert par au moins six pixels dans sa dimension critique (FLIR, 2011). Couverture qui selon le critère de Johnson (FLIR, 2011) peut être abaissée à quatre pixels. Selon le niveau de détection et de reconnaissance d'un objet géographique, il est possible :

- ✓ Avec quatre à six pixels connexes de radiométries similaires ou identiques, de voir qu'il existe quelque chose (une entité spatialisée).

- ✓ A partir de 14-15 pixels connexes de radiométries similaires ou identiques, de reconnaître un objet.
- ✓ Au-delà de 29-30 pixels, de reconnaître et d'identifier un objet.

Le nombre de pixels pour reconnaître et identifier sémantiquement un objet est déterminant d'autant plus que le pixel seul n'a pas ou rarement de sens en géographie. C'est une mesure. Ce sont les agencements de pixels qui permettent de donner un sens avec la reconnaissance et à l'identification des objets géographiques structurant et transformant l'espace géographique.

Dans certains cas, le contexte géographique permet à un niveau et une échelle géographique donnés et une résolution spectrale particulière, de détecter des objets géographiques comme par exemple un village, représenté par un unique pixel. La structure de l'espace géographique enregistrée par un capteur à une résolution spatiale et spectrale données, à une date donnée, dans un environnement bioclimatique donné, joue dans la sur–détection de certains objets géographiques. Leurs radiométries diffèrent en général fortement du contexte géographique (radiométrique) dans lequel ces objets sont localisés. Leur sur–détection sera d'autant plus aisée s'ils sont localisés dans un environnement radiométrique différent et relativement homogène spectralement.

Il est possible, sur la base des données de télédétection utilisées, de définir les niveaux et les échelles géographiques d'analyse des processus de métropolisation :

Tableau 1 : démarche multi-niveaux, multi-capteurs.

Niveau d'analyse géographique	Vecteurs / Capteurs	Niveau théorique de détectabilité surfacique (critère de Jonshon)
Continental/sub–continental	DMSP	> 30 km²
	MSG	> 36 km²
Régional	DMSP	> 30 km²
	MSG	> 36 km²
	Landsat MSS,	> 25600 m²
	Landsat TM, ETM+	> 3600 m²
	Spot 1/2/3/4	> 1600 m²
	Spot 5 B	> 400 m² (>1600m² en MIR)

Urbain	DMSP	> 30 km²
	Landsat MSS,	> 25600 m²
	Landsat TM, ETM+	> 3600 m²
	Spot 3 XS /4 B	> 1600 m²
	Spot 5 B	> 400 m² (>1600m² en MIR)
	Spot 3/4 PAN	> 400 m²
	Spot 5 PAN	> 100 m² (>25 m² en super mode)
Intra–urbain	Spot 4 B	> 1600 m²
	Spot 5 B	> 400 m² (>1600m² en MIR)
	Spot 3/4 PAN	> 400 m²
	Spot 5 PAN	> 100 m² (>25 m² en super mode)
	Kompsat-2 MSI	> 64 m²
	Ikonos 2A MS	> 64 m²
	Kompsat-2 PAN	> 4 m²
	Ikonos 2A PAN	> 4m²
Objet urbain	Kompsat-2 PAN	> 4m²
	Ikonos 2A PAN	> 4m²
	Ramses X	> 5184 cm²
	NASA 100T HS VNIR	> 2500 cm²
	Camera soviétique VIS	> 900 cm²

Les niveaux théoriques de détectabilité surfacique et les surfaces couvertes par les images des différents capteurs font qu'ils peuvent être utilisés sur deux niveaux d'analyse géographique. Par exemple, les images DMSP peuvent être utilisées pour mettre en évidence les processus de métropolisation à l'échelle de l'Inde, au niveau régional ou de l'urbain. La sensibilité spectrale des capteurs et la surface couverte par l'objet géographique urbain sont un élément surdéterminant la détection d'un même objet géographique à différentes échelles géographiques.

Les démarches par agrégation de données permettent d'étudier à différents niveaux d'analyse spatiale la structure de l'espace géographique à partir d'un type de données spatiales ou aéroportées, le niveau plafond étant la résolution surfacique au sol du pixel. L'intérêt est de pouvoir pallier, en partie, le manque de données spatiales relatives à des niveaux géographiques différents comme la commune, le canton ou la région, etc.

Tableau 2 : résolution spatiale, échelle cartographique, niveau géographique.

Résolution spatiale	**Niveau spatial**	**Echelle géographique**
Démarche multi-résolutions	**Démarche multi-niveaux**	**Démarche multi-scalaire**
Niveau de mesure de l'espace géographique	Niveau d'étude des objets géographiques	Echelle (niveau) de figuration des objets géographiques
La résolution spatiale d'un document géographique comme une image satellitaire ou aérienne marque le niveau de mesure et détermine en ce sens le niveau de détection/non détection de l'objet géographique. Le niveau de perception dépend des résolutions spatiales de l'image (on ne visualise pas les mêmes objets avec une résolution spatiale au sol de 1m² ou de 900m²) et spectrales (les objets géographiques sont plus ou moins identifiés selon leur réponse spectrale).	Par exemple, les procédures d'agrégation et de désagrégation sur des données statistiques ou des images satellitaires permettent d'identifier, à chaque niveau d'agrégation, des entités géographiques : la parcelle, le groupe de parcelles, [...] le terroir...	Par exemple, un même objet géographique comme un bâtiment, peut être figuré à des échelles allant du 1 : 5000^{e} au 1 : 25000^{e}. (Au-delà, cet objet ne peut être graphiquement représenté).

Résolution spatiale et niveau d'analyse géographique interdépendants. La résolution spatiale détermine le ou les niveaux d'analyse géographique.

L'agrégation de données peut se faire selon deux logiques :

- ✓ Agrégation des données individuelles de base, les pixels.
- ✓ Agrégation sur des données déjà agrégées (agrégation à partir du niveau spatial précédent).

Le niveau d'agrégation est fonction de la taille de la fenêtre mobile (de 11 x 11 à 301 x 301, soit une portée spatiale de 110 x 110 m à 3010 x 3010 m avec des images d'une résolution de 100 m² à l'instar des images multi-spectrales Spot-5 BI). La taille de la « portée » spatiale détermine le niveau des variables contextuelles prises en compte.

Figure 2 : agrégation par données individuelles de base.

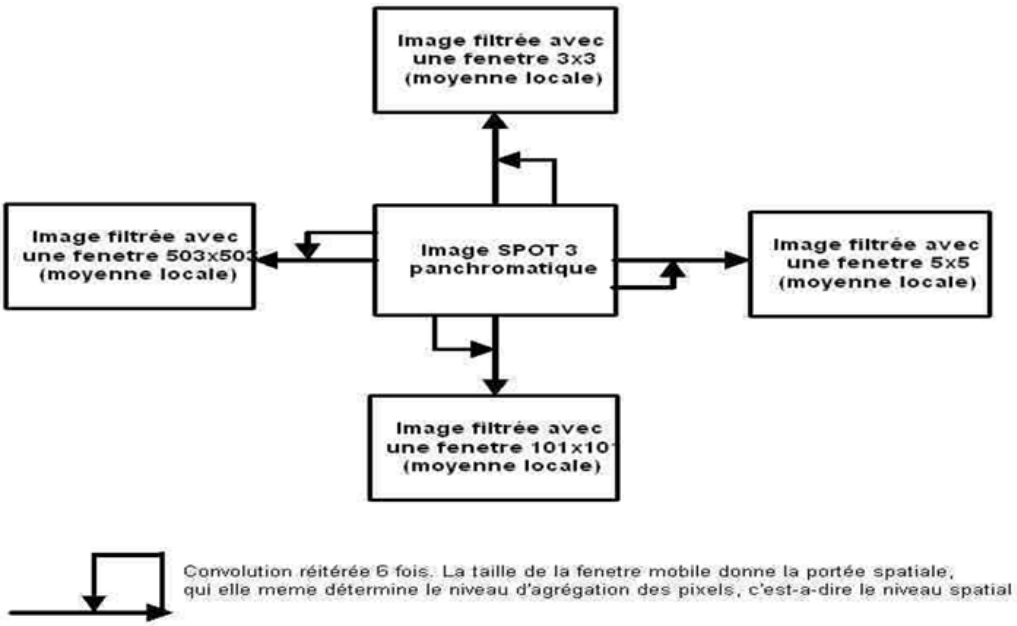
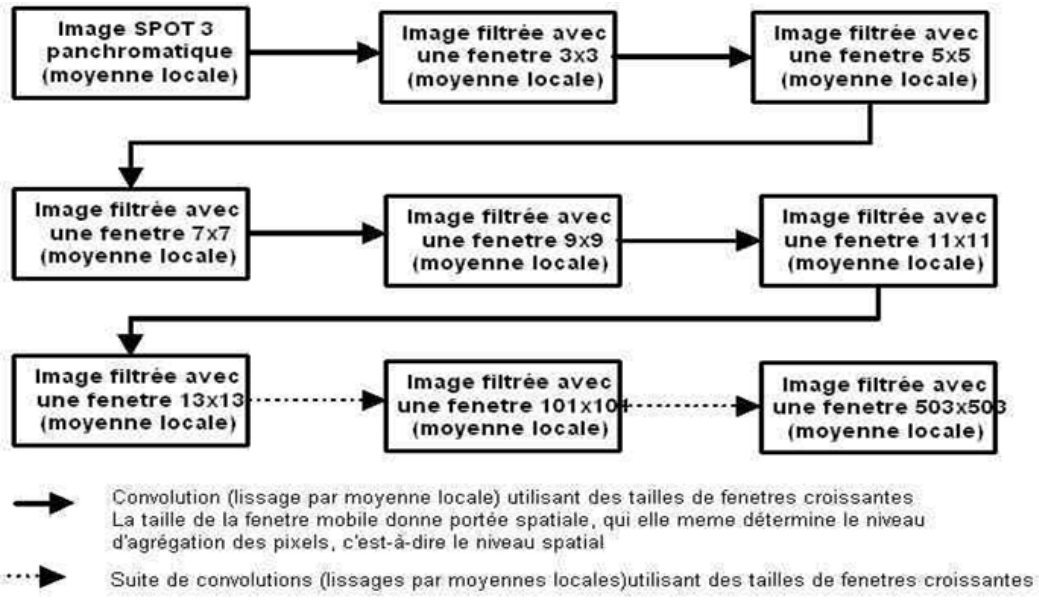


Figure 3 : agrégations successives (par emboîtement).



On identifie les mêmes objets géographiques quelle que soit la démarche. La différentiation entre les objets géographiques est plus marquée avec l'agrégation de données déjà agrégées.

A chaque niveau spatial correspond un type d'objets géographiques donc un mode d'organisation spatial pour chaque niveau géographique. Il y a un effet de seuil (stationnarité). Apparition de nouveaux objets géographiques, c'est-à-dire, de nouvelles formes de structuration de l'espace géographique uniquement à certains niveaux d'agrégation des données. Entre, il y a une non continuité des

morphologies et des structures, c'est-à-dire, des effets de seuil. On remarquera que la variance est similaire quel que soit le niveau spatial d'agrégation (même distribution statistique à chaque niveau spatial). La « stationnarité » de la distribution statistique s'explique par la méthode d'agrégation (opération de convolution par moyenne locale). On obtient :

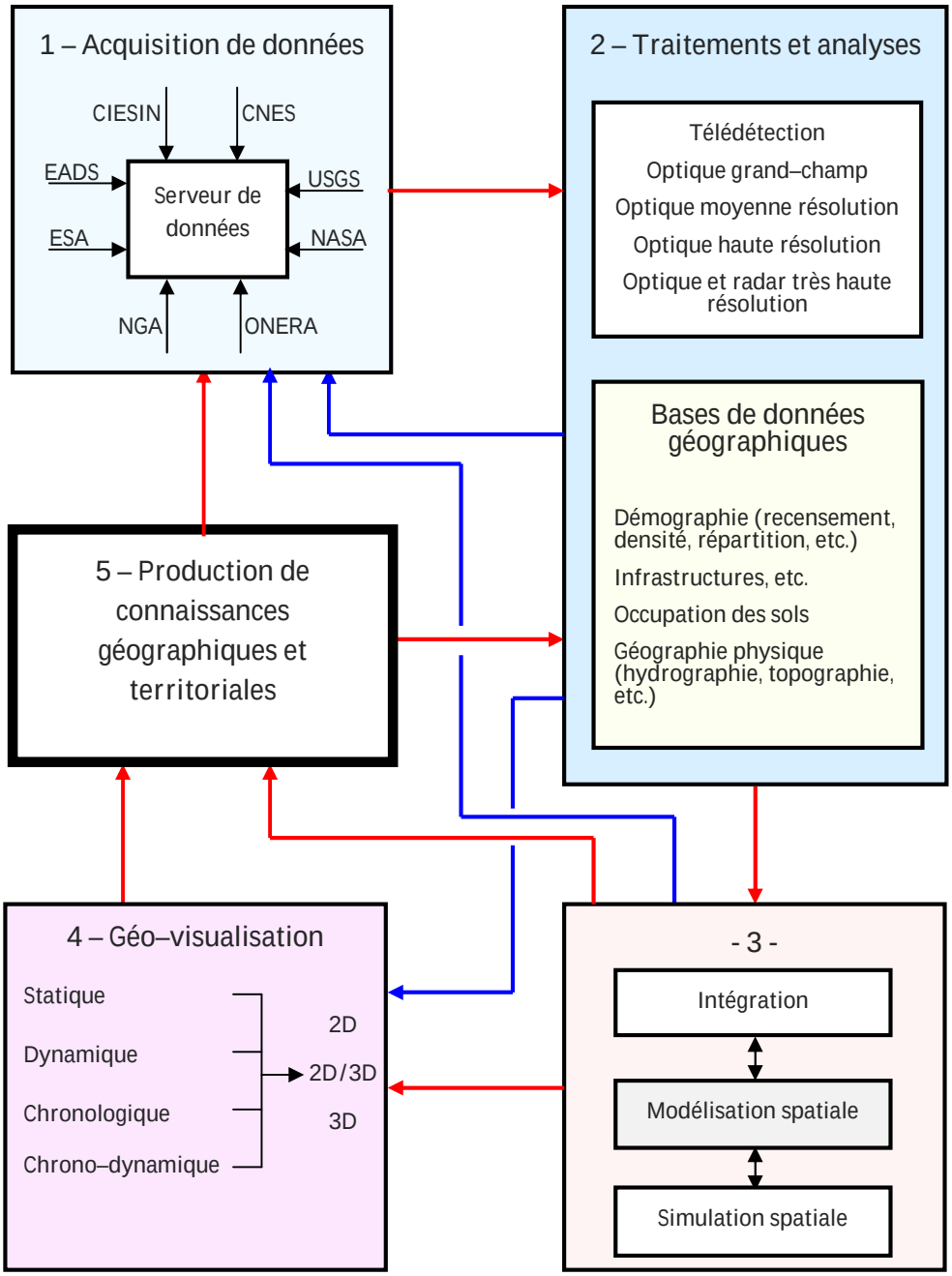
- ✓ une image lissée, à l'exception des bords de l'image dont leur taille varie selon l'envergure de la fenêtre mobile.
- ✓ des variances « similaires », c'est-à-dire, marquées par de faibles écarts entre elles, quelle que soit la taille de la fenêtre mobile du fait que le calcul de la variance prend à la fois en compte la partie « lissée » de l'image et les bords qui n'ont pas été traités. C'est pourquoi on observe de faibles écarts entre les variances des images lissées avec des fenêtres de tailles différentes. Si l'on enlève (« coupe ») les bords, c'est-à-dire, les parties non traitées de l'image, la taille des images va en diminuant au fur et à mesure que l'on augmente les tailles des fenêtres mobiles. On observe de forts écarts entre les variances : dans le calcul de la variance, il y a une division (écarts par rapport à la moyenne) par le nombre total de pixels de l'image.

2.3.2. DU SIGNAL ELECTROMAGNETIQUE AU MODELE EMPIRIQUE DE SIMULATION 3D

UNE MAITRISE DE LA TOTALITE DE LA CHAINE D'ACQUISITION, DE TRAITEMENT, DE MODELISATION ET DE GEO–VISUALISATION

L'analyse des processus de métropolisation par géomatique intègre quatre ensembles de traitement et d'analyse de données, de production d'informations et de connaissances géographiques spatiales, multi–échelles et temporelles auxquels il faut ajouter une phase initiale de recherche et d'acquisition des données spatiales et géographiques.

Figure 4 : organigramme méthodologique.



L'objectif de la démarche mise en place est, à partir des données de télédétection spatiale et aéroportée, d'analyser les processus de métropolisation par la description formalisée (modélisation) des processus de transformations territoriaux en associant des données et informations géographiques provenant des enquêtes de terrain et des bases de données préexistantes produites par les agences et instituts de recherche nord-américains (NASA, National Geospatial Agency, USGS, CIESIN).

L'analyse des processus de métropolisation s'appuie sur les mesures du rayonnement électromagnétique émis et renvoyé par la surface de la Terre à différentes échelles géographiques, niveaux spatiaux, temporalités et intervalles spectraux. Plusieurs types de capteurs et de vecteurs ont été mobilisés en fonction de leur disponibilité et accessibilité : MSG-8, DMSP (F10 à F16), Landsat (1 à 7), Spot (3 à 5), Kompsat-2, Ikonos 2A, Ramses X, caméra THR centimétrique.

L'ensemble des analyses spatiales et géographiques ont été élaborées à partir des informations produites à partir des données spectro–spatiales (de façon directe à partir des images satellites acquises ou de bases de données géographiques générées à partir de la télédétection comme les Modèles numériques de terrain SRTM utilisés) conduisant à la création de modèles spatiaux de changement d'occupation des sols, de changement territorial, de simulation empirique et de géo–visualisation dynamique 2D et 3D.

TELEDETECTION

En doctorat, une partie des recherches était centrée sur le développement de méthodologies de caractérisation morphologique (géométrique, texturale) et sociale (fonctions) des éléments bâtis sur des images panchromatiques Spot et sub–métriques Onera 40, sur la caractérisation socio–spatiale des centres urbains avec les images thermiques de nuit Landsat-5 TM (canal 6) (Gadal, 2008), l'identification des principales villes et l'estimation de la densité de population avec l'utilisation d'images thermiques de nuit prises par NOAA-14 AVHRR (Gadal, 2008) et d'identification des bâtiments avec les images aéroportées hyper–spectrales DAIS 79 (Gadal, 2011). La zone d'étude couverte était relativement restreinte. Elle concernait l'espace littoral de la Métropole atlantique du Maroc (MAM) entre Rabat et Casablanca.

La multiplication des zones d'étude prenant en compte l'espace littoral et leur hinterland en Afrique de l'ouest, sur les Pays baltes et en Inde du Nord-Ouest pour l'essentiel, sur plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres, sur des périodes de trente à cent vingt ans a modifié les démarches. Les méthodologies mises en place sont centrées sur l'utilisation d'une gamme de données spatiales beaucoup plus large d'images satellites et aéroportées multi–spectrales, centimétriques, métriques, kilométriques et de bases de données géographiques et territoriales (plan d'aménagement, etc.). L'idée sous-jacente est d'évaluer les apports qu'elles peuvent apporter individuellement dans la construction d'indicateurs géographiques de l'urbanisation et de la métropolisation et de privilégier les complémentarités par une démarche multi–capteurs, multi–résolutions (spectrales et spatiales), multi–échelles (en termes de précision au sol et de surface couverte).

La multiplication des données images issues des vecteurs satellites et aéroportés conduit à développer, à la fois, de nouvelles méthodologies de traitement

d'images pour la reconnaissance et l'extraction d'informations à caractère géographique, social et territorial. Elle conduit, également, à développer des stratégies d'approche multi–capteurs et de gestion des bases de données images de plusieurs dizaines de gigabits. A titre d'exemple, une scène enregistrée à partir du capteur hyper–spectral Themis 100T « pèse » 20 Go. Elle nécessite une puissance de calcul et de stockage sans cesse plus importante et de nouvelles stratégies de traitements dans un contexte où les développements de nouveaux algorithmes de calcul tendent à stagner depuis plusieurs années. L'arrivée des méthodologies de segmentation et de classification d'images fondées sur les notions d'hyper–connectivité sont les seules avancées réelles enregistrées ces dix dernières années.

Les recherches par télédétection spatiale vont s'orienter vers des démarches intégrant toute la chaîne d'analyse : de production de l'information géographique, de modélisation, d'analyse et de représentation spatiale. De l'approche exclusivement basée sur la télédétection va se substituer une démarche par télédétection spatiale, aéroportée, de terrain, etc. intégrant SIG, modélisation spatio-temporelle multi–échelles et géo–visualisation :

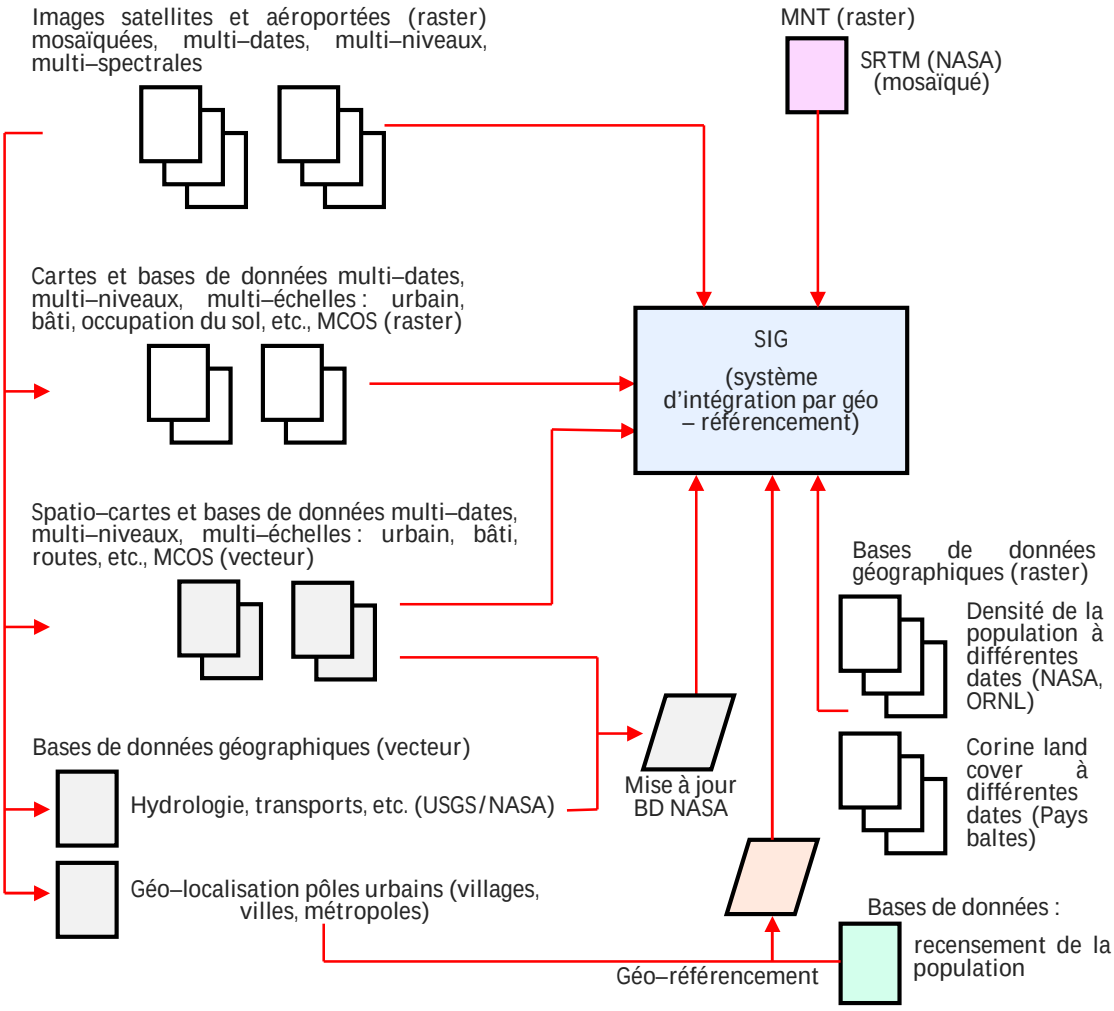
- ✓ Acquisition et évaluation des données par télédétection aéroportée et spatiale.
- ✓ Méthodologies de traitement des images très haute résolution spatiale (métriques et sub–métriques), grand champ (météorologiques), hyper–spectrales : production de bases de données d'informations géographiques.
- ✓ Intégration en Systèmes d'information géographiques : construction de SIG spatio-temporels gérant plusieurs centaines de giga-octets de données hétérogènes.
- ✓ Production de modèles SIG d'informations géographiques.
- ✓ Modélisation diachronique et dynamique des transformations spatiales et de l'évolution des territoires, simulation spatiale.
- ✓ Représentation dynamique en 3D, 2D/3D ou 3D de l'urbanisation (géo–visualisation).
- ✓ Production de connaissances géographiques.

SGIMT (SIG, D'ANALYSE ET DE MODELISATION SPATIALE)

L'expérimentation des potentialités d'extraction d'informations, puis, par analyse, de « production » de connaissances géographiques à partir d'images satellites et aéroportées très haute résolution spatiale, grand–champ, radar et hyper–spectrales, s'est accompagnée d'une série de travaux sur la conception de systèmes d'information géographiques ayant pour base géographique informationnelle les données de télédétection. Si l'extraction d'informations géographiques, la production de connaissances, la création de modèles spatio-temporels, la fusion de données et d'informations spatiales se font sans avoir à

intégrer les données, les informations et les résultats dans un SIG, la création de systèmes de suivi de l'évolution des territoires associant données et informations hétérogènes, ponctuelles, spatialisées, géo–localisées, géo–référencées aux formats raster, vecteur, texte, sous la forme de bases de données unifiées dans un même système géodésique (système de projection cartographique) ne peut se faire qu'en SIG.

Figure 5 : Intégration des bases de données géographiques et images dans le SIG (SGIMT).



Une attention particulière a été portée sur l'organisation et la structuration des bases de données géographiques pour pouvoir utiliser les modèles conceptuels de données géographiques conçus sur différents logiciels SIG.

Le développement de ce type de simulation spatiale et de modélisation des processus socio–spatiaux se distingue des modèles généralement utilisés en géographie, modèles qui se basent sur des méthodologies multi–facteurs multi–acteurs et qui sont générateurs de connaissances géographiques. Ces modèles basés généralement sur les systèmes multi–agents (SMA) permettent une certaine forme de « compréhension » des processus de métropolisation. Ils s'inscrivent dans une logique systémique d'interaction entre les différents objets géographiques physiques et sociaux organisant, structurant, transformant les territoires. Ils permettent, par la mise en interaction des différents facteurs environnementaux et acteurs sociaux, de rechercher les liens, les causes, des facteurs explicatifs, les SMA modélisent mal les formes et les structures spatiales générées par les transformations des modes de vie urbains ou métropolisés et les types de territorialités qui pourraient en découler.

A contrario, les modèles de simulation morphologique et fractale rendent bien compte de l'évolution des structures spatiales consécutives à la transformation de l'espace géographique, conséquence des aménagements découlant des mutations sociales, économiques, politiques et culturelles de la société. Ils ont, par contre, un pouvoir explicatif faible. L'interaction entre SMA et modèles morphologiques (ou plutôt morphogénétiques), l'intégration des deux, est pour le moment à l'état de concept. Elle est absente dans la littérature scientifique.

La création de modèles de simulation empiriques en SIG à partir d'images de télédétection spatiale semble plus pertinente. C'est cette voie qui a été explorée et développée durant les deux dernières années. Cette approche complète, d'une part, les approches spatio-temporelles par modélisation empirique de la transformation de structures géographiques. Le choix des modèles empiriques de modélisation territoriale vise également, dans la mesure du possible, à s'extraire du champ politico–conceptuel dans lequel certains d'entre eux tendent à s'enfermer : SMA pour l'aide à la décision, utilisation de modèles de simulation pour concevoir des modèles d'organisation urbaine, de l'espace géographique comme réponse à une commande politique partisane ou à une idéologie.

Ils se distinguent également des modèles morphogénétiques développés en doctorat et post–doctorat. Ces modèles, générés à partir du traitement d'images satellites, modélisent les gradients de discontinuité spatiale séparant les objets géographiques, les types d'occupation et d'utilisation des sols, c'est-à-dire, les modes de territorialisation organisant et structurant l'espace géographique. Ces modèles ont permis de nouvelles avancées dans la conceptualisation sémantique et ontologique de l'espace et des objets géographiques. Les travaux théoriques en cours, que ce soit en Europe ou aux Etats-Unis visent à contribuer au développement de nouvelles architectures SIG et de modèles de raisonnement spatial.

Les aspects liés à la représentation des données et des résultats issus des traitements d'images satellites et aéroportées, de la construction interactive ou automatique de spatio–cartes, de modèles numériques de terrain, etc. ont été également développés. Ils s'inscrivent dans le prolongement de la construction des SGIMT en Inde, dans les Pays baltes et en Afrique de l'ouest.

Figure 6 : géo–visualisation 2D de la structure urbaine de la région de Delhi en 1992 et en 2009 faite à partir des images DMSP-OLS F-10 et F-16.

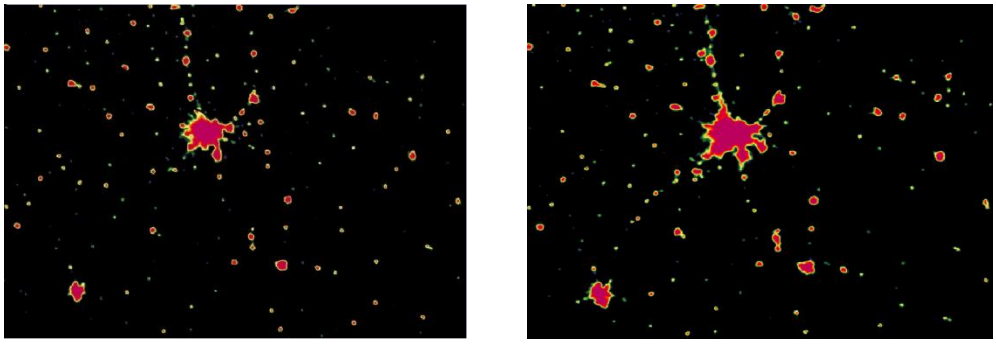
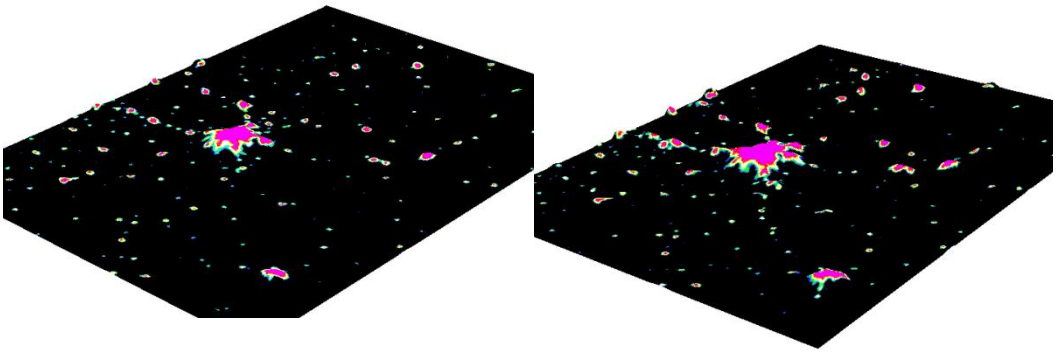
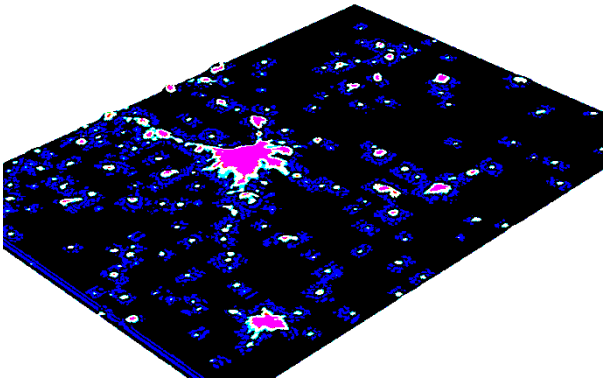


Figure 7 : géo–visualisation 2D/3D statique de la structure urbaine de la région de Delhi en 1992 et en 2009 intégrant le poids démographique (hauteur), générée à partir de traitements effectués sur DMSP F10 et F-16, fusionnée avec la base de données des densités de population.



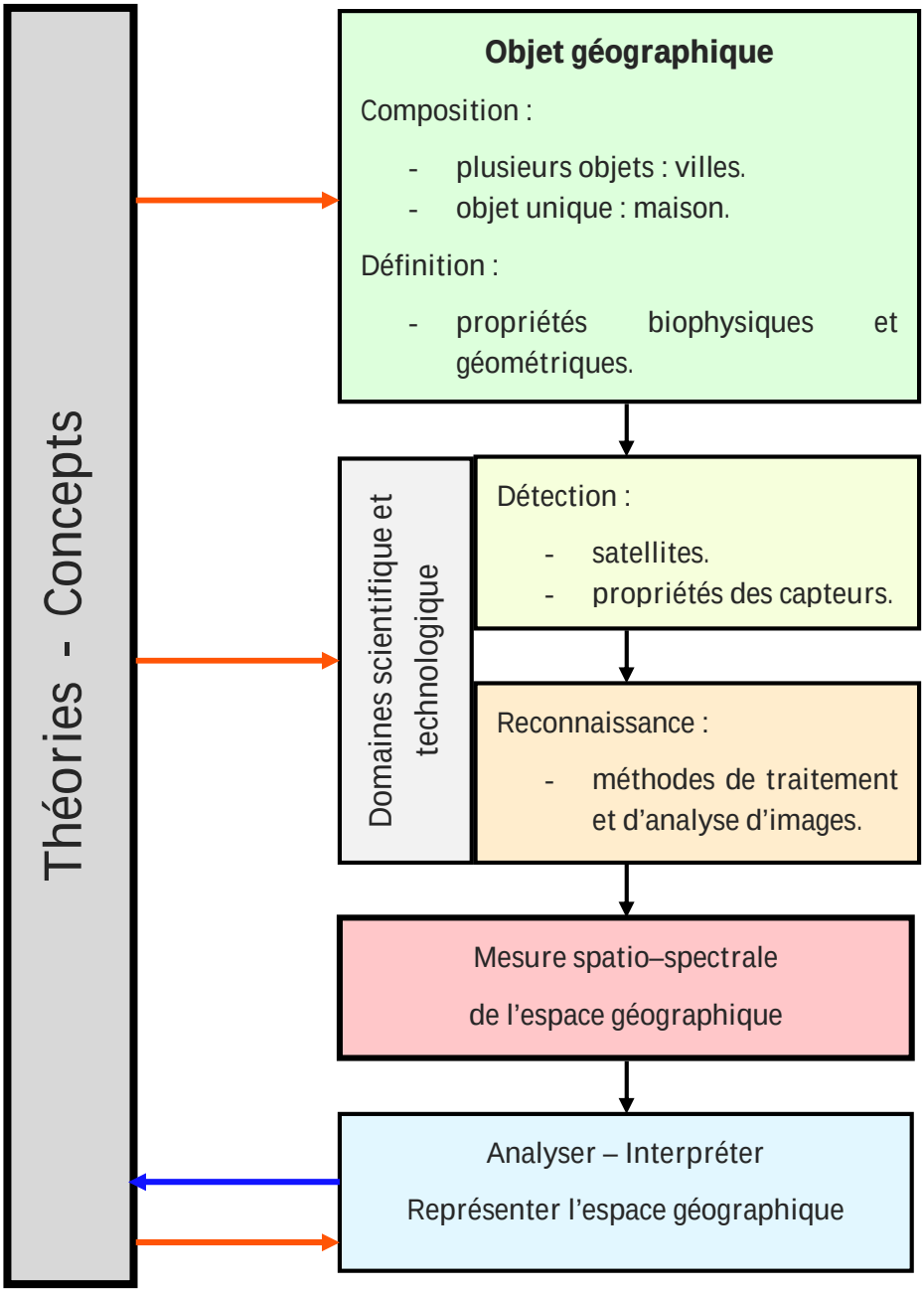


Simulation des futures zones d'extension urbaine de la région de Delhi (zone bleu clair et zone bleu foncé).

La généralisation de la géo–visualisation 2D/3D ou 3D réelle, tout comme la modélisation spatio-temporelle, la cartographie dynamique et interactive, appellent aussi à travailler en aval de l'analyse et du traitement d'images, sur les nouvelles possibilités de produire des modèles d'organisation de données géographiques sociales, territoriales, environnementales.

Nouvelles architectures de données, de modèles de connaissance et de représentation des modèles géographiques et spatiaux qui concourent à une meilleure compréhension des phénomènes géographiques étudiés. L'intégration des possibilités données par la géo–visualisation, la modélisation et la représentation dynamique met en avant l'interdépendance croissante ou, du moins, l'intégration nécessaire entre télédétection, systèmes d'information géographiques, informations socio–environnementales et modélisation spatiale.

Figure 8 : organigramme méthodologique.



2.4. DE LA MESURE SPECTRALE ET TEMPORELLE A L'IDENTIFICATION DES OBJETS GEOGRAPHIQUES

2.4.1. IMAGES DE TELEDETECTION ET INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES

L'intégralité des démarches développées en géomatique est basée sur l'exploitation des images de télédétection numérique d'origine spatiale et

aéroportée. Images de télédétection spatiale qui, pour l'essentiel sont des données issues de capteurs optiques passifs météorologiques grand champ à basse résolution (spatiales) - MétéoSat seconde génération (MSG 14), *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP F-14, F-16) - et d'observation de la Terre, à moyenne ou à haute résolution spatiale : Système pour l'observation de la Terre (SPOT 2, 3, 4 et 5), *Land Satellite* (Landsat 1, 2, 5 et 7), EgyptSat 1, et Kompsat-2.

C'est à partir des données satellites que sont créées les informations, puis générées les connaissances géographiques, les bases de données et de connaissances géo–spatiales en systèmes d'information géographiques, les modélisations spatio-temporelles et les modèles de géo–visualisations temporels 2D ou 3D.

Des images issues de trois capteurs aéroportés centimétriques, un radar bande X (ONERA RAMSES, 37 x 37cm), un hyper spectral VNIR (NASA 100T, 1000 bandes spectrales, 25 x 25 cm) et un optique VIR (Caméra soviétique, 15 x 15cm) ont été utilisés pour évaluer leurs potentialités.

Les images satellites mono–spectrales et multi–spectrales utilisées constituent la structure informationnelle de base à partir de laquelle a été construit le système géographique d'information territorial sur lequel s'appuient les analyses des processus de métropolisation, la reconnaissance, l'identification et l'évolution de leurs formes et structures spatiales et territoriales. C'est ce système géographique d'observation et de suivi des processus d'urbanisation et de métropolisation multi–échelles, spatiale et temporel qui va servir à décrire, analyser, modéliser et représenter les processus de métropolisation et d'urbanisation de façon simultanée entre trois différents espaces et lieux géoculturels : la côte ouest–africaine (Nouadhibou - Banjul), l'Inde du nord-ouest (Delhi-Mumbai) et l'espace balte post–communiste (Tallinn-Gdansk). Ce système d'observation spatio-temporel, globalisé par sa capacité à observer et à analyser différents territoires aux échelles subcontinentales, régionales et locales, permet de comparer le caractère mondialisé ou non des processus de métropolisation touchant des espaces urbanisés, leurs similitudes et différences dans l'espace et le temps.

Le choix des images satellites pour analyser et produire de la connaissance géographique sur les processus de métropolisation répond aux contraintes suivantes :

- ✓ Pallier au manque de données et d'informations géographiques : données absentes, obsolètes, incomplètes, peu adaptées à la problématique d'étude.
- ✓ Nécessité de couvrir de façon continue les vastes portions de l'espace géographique, les territoires métropolisés couvrant parfois plusieurs centaines de kilomètres.
- ✓ Nécessité d'avoir des mesures homogènes pour analyser les processus de métropolisation sur la totalité de leur continuum spatial.

- ✓ La répétitivité des prises de vues images permet un suivi régulier des processus de métropolisation et de mesurer les transformations territoriales induites.
- ✓ L'existence d'archives images numériques depuis les années 1960 avec les données panchromatiques CORONA, Landsat et DMSP depuis les années 1970 ou encore SPOT à partir de 1986 permet de suivre la genèse des processus de métropolisation et leur inscription spatiale. L'apparition du phénomène de métropolisation en Europe est concomitante à l'apparition et à l'exploitation des premières images numériques de télédétection spatiale et aéroportée.
- ✓ Possibilité de fusionner par traitement d'image ou d'associer en SIG les images satellites avec d'autres sources d'informations géo-référencées (cartes, plans, bases de données géographiques).
- ✓ L'ubiquité des mesures par télédétection spatiale permet de s'affranchir des erreurs introduites par les données géographiques légales rattachées à des limites administratives ou produites en géomatique. Elle permet de ne pas être confronté aux problèmes induits par la modification des limites, la disparition ou la création des entités administratives lors des analyses diachroniques.
- ✓ Mesures systématisées, comparables et relativement normalisées (prise en compte du vieillissement des capteurs induisant une modification de la sensibilité spectrale, etc.).
- ✓ Capacité d'analyses multi–niveaux et multi–échelles, sur des périodes et échelles de temps définies.
- ✓ Possibilité de détecter, mesurer des objets géographiques dans des champs du spectre non visibles à l'œil humain.
- ✓ Capacité de créer nos propres indicateurs géographiques et les objets géographiques à reconnaitre, identifier et extraire. Les images de télédétection sont un élargissement de notre champ de vision : verticalisation, embrassement de portions de l'espace géographique sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés, extension de notre capacité à voir et à mesurer la réalité de l'espace géographique dans des intervalles spectraux et des résolutions spatiales non accessibles à l'œil humain.

2.4.2. CONTENU DES IMAGES DE TELEDETECTION

L'IMAGE DE TELEDETECTION NUMERIQUE

L'ensemble des analyses, résultats et modélisations est basé sur l'exploitation et le traitement du contenu numérique des images de télédétection.

Sans pour autant répéter ce qui a été maintes fois écrit, il semble nécessaire de revenir sur les éléments clés concourant à la construction des images de télédétection pour en comprendre les fondements, les intérêts et les limites.

« *Une image de télédétection est une représentation plane (bidimensionnelle) de la distribution du rayonnement électromagnétique (REM) réfléchi ou émis par des objets*. Les variations du REM dans l'espace sont traduites sur cette image par des variations de la teinte de gris et perçues par l'homme comme des variations de brillance. Ces variations de brillance créent la sensation visuelle du contraste, de la texture et de la forme des objets » (Timoulali, Medouri, 2000). Ce sont ces éléments constitutifs des images, les contrastes, textures et la forme des objets qui vont être utilisés pour reconnaître, identifier et extraire les objets géographiques et plus particulièrement les éléments bâtis.

Les images numériques de télédétection spatiale et aéroportée sont des matrices numériques de chiffres entiers généralement codées sur 256 niveaux, c'est-à-dire, 8 bits. L'image de télédétection est un ensemble de valeurs discrètes. Chaque unité de la matrice numérique, appelée en anglais pixel ou *picture element*, codée sur l'un des 256 niveaux, représente la variation d'intensité du REM enregistrée (de la surface de la Terre) par le capteur dans un intervalle spectral donné. Un REM trop faible sera codé sur 0, un REM saturant le capteur (le filtre servant à REM dans un intervalle spectral déterminé), codé à 255. Le REM enregistré dans une portion donnée du spectre électromagnétique est codé sur la forme d'une matrice numérique et traité mathématiquement : statistiques (par exemple les analyses factorielles), statistiques locales associées aux méthodes de convolution, morphologie mathématique, morphométrie, etc. Chaque code est associé à une couleur, l'ensemble des codes sur 256 niveaux a une palette de couleur, le plus souvent en niveau de gris, le noir étant généralement associé au code 0 (pas d'enregistrement du REM), le blanc au code 255. Chaque code représente une valeur du REM enregistrée par l'unité spatiale mesure au sol ou unité élémentaire, représentée dans l'image par un pixel.

L'UNITE DE MESURE ELEMENTAIRE : LE PIXEL

Le pixel est un élément structurant fondamental de l'image :

- ✓ Le code qui lui est associé donne la radiométrie (l'intensité de l'énergie enregistrée codée en des niveaux de valeurs entières allant de 0 à 255 pour une résolution radiométrique de 8 bits). La résolution radiométrique qui détermine en partie le niveau de sensibilité du capteur et la capacité à la restituer sous forme numérique est déterminée par le nombre de bits par lequel l'énergie enregistrée est répartie.
- ✓ C'est la valeur de code, un chiffre entier, qui est traitée mathématiquement pour reconnaitre, identifier et extraire des objets géographiques, produire de l'information géographique, générer de la

modélisation spatiale, des bases de données statistiques géo–localisées et géo–référencées, etc., à partir desquelles seront développées les analyses et les interprétations sur les processus de transformation de l'espace géographique conduisant à l'émergence de territoires métropolisés ou selon le positionnement théorique choisi, induits par la métropolisation.

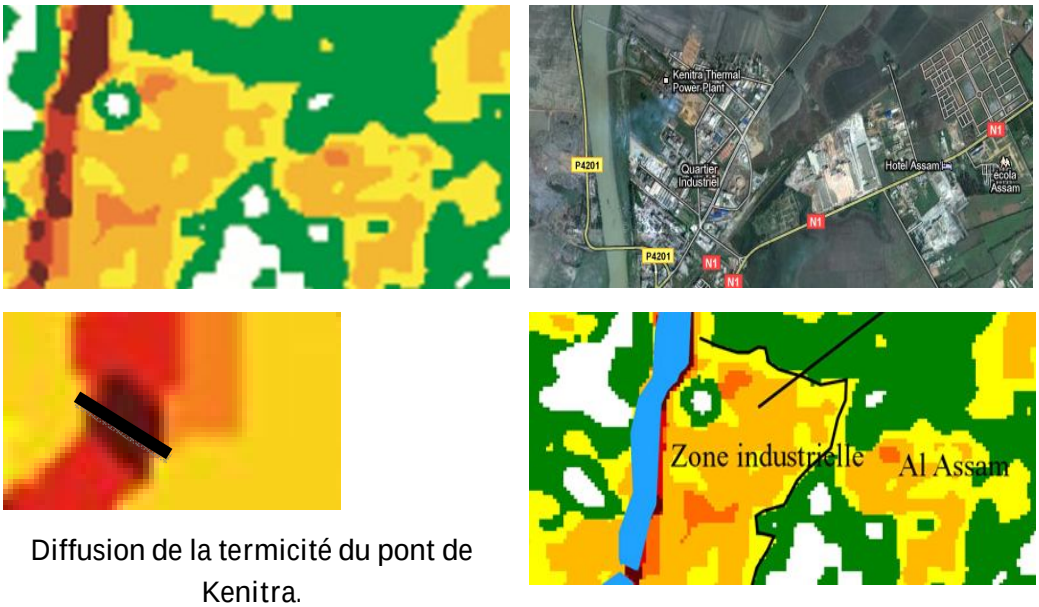
- ✓ Le pixel, comme représentation dans l'image de l'unité de mesure du REM au sol réfléchi ou émis, est localisé dans la matrice en X et Y (colonnes et lignes de la matrice). Elle donne la position de chaque unité élémentaire de mesure, qui elles-mêmes peuvent être rapportées à un système de coordonnées géodésique spatial comme GLONASS, GPS, ou terrestre (UTM, Lambert, etc.). C'est par ce biais qu'il est possible de lier et associer les images satellites avec les autres données et bases de données géographiques géo–référencées, le plus souvent en SIG ou de fusionner des images ou des portions d'images.
- ✓ La résolution spatiale, tout comme le ou les domaines d'observation et de mesure du spectre électromagnétique choisi, est fondamentale dans le niveau de détection et la non détection géométrique des objets géographiques. La résolution spatiale détermine la précision (avec la sensibilité spectrale et la résolution radiométrique) de la mesure au sol. Appliquée de façon aléatoire, la matrice de mesure au sol de l'espace géographique est aléatoire. Selon la résolution spatiale, plusieurs objets géographiques peuvent composer le pixel, la valeur radiométrique d'un pixel peut être une valeur moyenne de plusieurs réflectances. Du fait de la trace du satellite, les objets géographiques peuvent être mesurés, puis codés entre deux ou plusieurs pixels. La matrice de mesure « posée » aléatoirement ne tient pas compte de la répartition et de la disposition des entités géographiques et spatiales. Dans le cas, par exemple, des résolutions spatiales au sol sub–métriques, un objet, c'est un ensemble de pixels qui va mesurer un objet géographique. Ensemble de mesures qui peuvent être proches et qui nécessitent dans certains cas d'être harmonisées par une opération statistique locale comme, par exemple, une moyenne ou un filtre médian. L'hétérogénéité radiométrique qui peut découler d'une résolution spatiale trop fine par rapport à la surface des objets géographiques pris comme indicateurs géographiques impose des prétraitements visant à homogénéiser leurs valeurs radiométriques pour les distinguer de leur contexte, les reconnaitre, les identifier et les extraire (si besoin). A l'inverse, des résolutions spatiales et des sensibilités spectrales trop faibles, imposent d'accentuer l'amplitude entre les valeurs radiométriques différentes.

Dans certains domaines du spectre électromagnétique, dans la partie du spectre d'émissivité maximale du thermique infrarouge (10,4-12,5 µm), des objets géographiques qui ont des surfaces inférieures à la résolution spatiale au sol de l'image thermique peuvent être détectés. Selon la composition biophysique de l'objet, le REM dans le TIR a tendance à se diffuser sur 180°.

Figure 9 : thermicité du pont de Kenitra, Maroc.

Extrait de la Land surface temperature produite à partir de Landsat-5 TM bande 6

Extrait Google Map



Diffusion de la termicité du pont de Kenitra.

Pont

Sources : Gadal, S. (2004), « La thermicité de l'embouchure de l'oued Sebou par télédétection : hypothèses préliminaires », Gadal, (2008), « Télédétections thermiques infrarouges des concentrations urbaines au Maroc ». Google map, 2011.

LA RESOLUTION SPATIALE

Le pixel, seul, est une unité de mesure au sol. Il acquiert une signification géographique et sémantique, celle d'objet ou d'entité géographique, lorsqu'il est un élément d'un ensemble de pixels connexes aux radiométries proches ou identiques. A l'inverse, il est également possible de lui donner une signification géographique lorsque la réponse spectrale enregistrée est associée à une structure géographique.

La résolution spatiale détermine les seuils d'agrégation des données de télédétection dans les analyses multi–niveaux.

Elle détermine également le niveau de précision spatiale en termes de géo–localisation, le pixel étant l'unité de référence spatiale (x, y, z) de la matrice et du système de coordonnées géodésique (cartographique). La résolution spatiale du pixel est fondamentale dans le sens où va se déterminer la précision de la géo–localisation et son taux d'erreur. Elle est tout autant importante dans deux autres cas de figures : l'extraction des portions communes de l'espace géographique lors

des analyses diachroniques. Le géo–référencement des images satellites et aéroportées, des bases de données géographiques, des cartes, etc. dans un même référentiel géographique et spatial, phase essentielle dans la construction des bases de données, leur harmonisation et la création d'une « métadonnée » permettant de lier des données et informations géographiques, géo–référencées et spatiales qui sont hétérogènes (contenus, formats, géométries, etc.). Le niveau de précision est essentiel car le modèle d'harmonisation des données géographiques et des images aux résolutions spatiales différentes et de structuration de la base de données SIG (SGIMT) construite est basé sur la notion de référence géo–spatiale commune.

Le choix d'avoir développé un métafichier pour la structuration et l'harmonisation des données géographiques, pour l'essentiel d'origines images et cartographiques, sur les coordonnées géographiques plutôt que sur des modèles de métafichiers basés sur le géocodage et les « adresses », tient à cinq contraintes :

- ✓ Le peu de bases de données géographiques attributaires sur les zones d'études, qui plus est sur des inter–périodes de dix ans ou plus, voire sur une seule date.
- ✓ La difficulté, comme avec les bases de données statistiques, de les harmoniser statistiquement, géographiquement, spatialement et temporellement.
- ✓ Un non contrôle des erreurs générées dans le géocodage et l'adressage des objets géographiques représentés (formalisés géographiquement) dans les bases de données. Erreurs qui sont généralement nombreuses.
- ✓ Des niveaux de formalisation (représentation d'une réalité de l'espace géographique) qui ne correspondent pas forcément aux problématiques à étudier.
- ✓ Des problèmes d'interopérabilité en termes de formats et d'échanges de données.

Figure 10 : spatialisation des erreurs d'une base de données géographiques vectorielles et d'un scan Topo IGN, Landes, France.

BD vecteur IGN, composition colorée Ikonos 2A : les bâtiments sont mal géo-localisés. Ils sont représentés sur leurs anciens emplacements.

Scan Topo IGN, composition colorée Ikonos 2A. La parcelle agricole sur l'image satellite de février 2006 a remplacé la parcelle forestière représentée sur le Scan Topo IGN.

Sources : Gadal, S., Gazel, H., Lekaviciute, J. (2006). « Conception d'un SIG d'aide à la décision pour l'optimisation de la gestion forestière ».

LA REPETITIVITE TEMPORELLE

La répétitivité temporelle : elle est tout aussi fondamentale que les résolutions spatiales et spectrales dans le sens où elles déterminent :

- ✓ Le temps de revisite, c'est-à-dire, de passage et de mesure spectrale sur une même zone d'étude, détermine le suivi et l'évolution des territoires ou d'objets géographiques particuliers.
- ✓ Elle est fortement contrainte, en imagerie optique, par le niveau de nébulosité et la teneur en vapeur d'eau dans certaines couches de l'atmosphère. Dans le domaine intertropical, les fortes teneurs en vapeur d'eau ont tendance à perturber le signal réfléchi et/ou émis par la surface de la Terre et, par ricochet, d'avoir des mesures bruitées (images dégradées).
- ✓ Les dates des prises de vues saisonnières sont déterminantes pour la mesure, l'analyse et le suivi de certains objets géographiques (cultures, états végétatifs, etc.) ou de leur détection ou non-détection selon le contexte géographique et bioclimatique.

Le contexte géographique détermine à l'instar des résolutions spatiales, spectrales, du niveau de répétitivité temporelle (prises de vues effectives sur un territoire que nous pouvons avoir, par exemple, sur une année), la détection ou la non détection des objets géographiques. La date de prise de vue, la saison, les états de surface, la structure de l'espace géographique déterminent la détection ou la non détection des objets géographiques. Le niveau de détectabilité d'un objet géographique est déterminé par le rapport entre la surface qu'il couvre et la résolution spatiale de l'image, par l'intervalle spectral ou la combinaison d'intervalles spectraux des mesures effectuées et la structure même de l'espace géographique. Structure, forme, organisation, « nature » de l'espace géographique qui vont se décliner sur l'image de télédétection par un gradient de radiométrie, la différence de radiométrie permettant de détecter, reconnaître (avec l'aide de méthodologies de traitement d'image ou non) et d'identifier (par analyse d'image), une entité spatiale, un objet géographique l'un par rapport à l'autre. Des objets géographiques, sémantiquement différents, pouvant avoir des radiométries similaires dans un ou plusieurs intervalles spectraux. Par exemple, le fait de procéder à des prises de vues images lors de l'optimum végétatif au printemps dans le domaine méditerranéen ou dans le domaine sub-sahélien permet de mieux différencier radiométriquement l'urbain du non urbain (sols nus, effleurements calcaires, sable, etc.) d'autant plus que nombre de matériaux de construction utilisés sont issus de carrières à proximité qui ont des caractéristiques spectrales (signatures spectrales) similaires.

Figure 11 : signatures spectrales de toitures produites à partir des images hyper-spectrales DAIS 79.

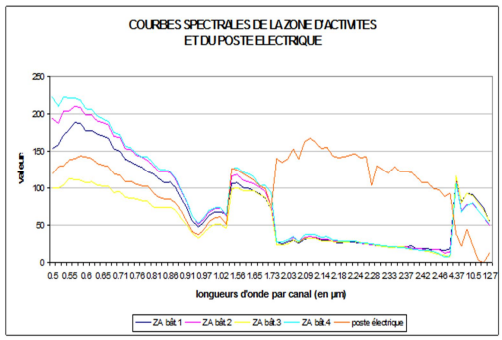
Zone industrielle de Maillane, France. Bande 33 infra–rouge moyen (1,502 – 1,55 µm)

Zone industrielle de Maillane, France Bande 74 infra–rouge thermique (8,447 – 9,347 µm)

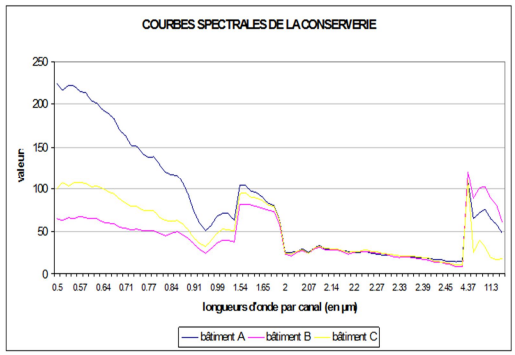
Zones tests

Photo du poste électrique

Courbes de réponses spectrales



Conserverie

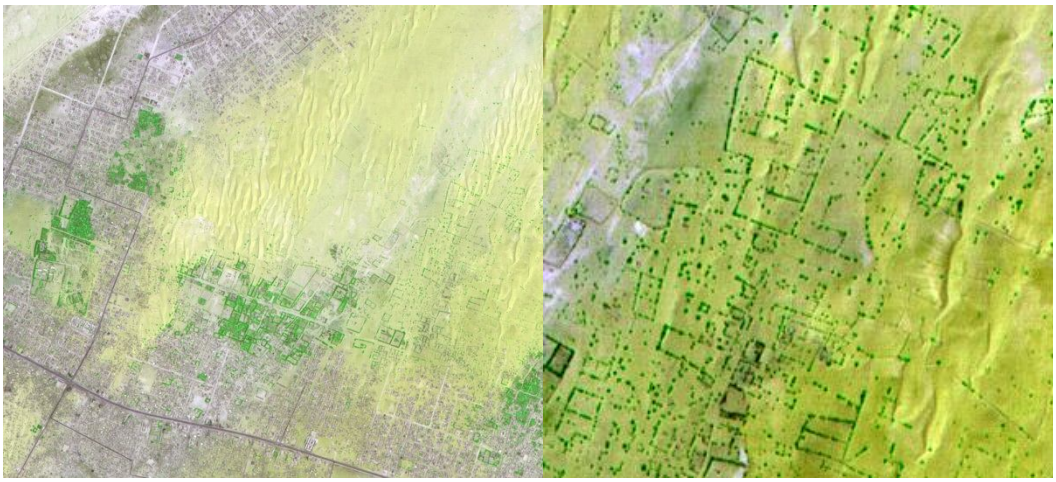


Des villes, des villages seront plus difficilement identifiables à certaines saisons qu'à d'autres en fonction du contexte géographique et bio–climatologique local (du degré de différentiation radiométrique), c'est-à-dire, du degré de végétalisation (activité chlorophyllienne) des espaces non–urbains. Cette question est particulièrement prégnante dans les domaines désertiques, subdésertiques et sud–méditerranéen.

La variabilité spatio-temporelle des mesures de télédétection spatiales et aéroportées, la détection, la reconnaissance et l'identification des objets géographiques sont également contraintes par la sensibilité des capteurs. Nous avons avec le capteur Multi spectral Scanner Imaging (MSI) des niveaux de sensibilité spectrale marqués dans le domaine du spectre chlorophyllien qui, dans le domaine désertique, permet de « sur–détecter » les éléments végétalisés (arbustes, lotier, etc.).

Figure 12 : reconnaissance de la végétation, Nouakchott, Mauritanie à partir de données multi-spectrales Kompsat-2.

Fusion ensembliste de néo-canaux de la tranformée de Karhunen-Loeve filtrée (filtre gaussien, filtre minimum, rehaussement laplacien)	Zoom : fusion ensembliste de néo-canaux de la tranformée de Karhunen-Loeve filtrée (filtre gaussien, filtre minimum, rehaussement laplacien)



La variabilité spatio-temporelle de la mesure de télédétection peut-être mise à contribution pour évaluer la robustesse et les niveaux de reproductibilité des méthodologies mises en place. Les tests de robustesse des méthodologies de reconnaissance, d'identification et d'extraction des objets urbains comme les bâtiments qui ont été effectués entre 1998 et 2001 à partir de l'information spectrale contenue dans les images de télédétection (basées pour l'essentiel sur les méthodes de classification par analyse factorielle) étaient caractérisés par une grande variabilité des résultats selon le contexte et l'environnement géographique – le territoire -, les dates des prises de vues et la météorologie (temps sec, forte teneur en eau des surfaces après un évènement pluvieux, etc.). La variabilité géographique, spatiale et temporelle des méthodes de traitement factorielles des images de télédétection, plus particulièrement celles basées sur les méthodes de classifications (spectrales), nous a conduit à explorer deux voies :

- ✓ Les méthodes de traitement morpho–métriques en partant du postulat que la géométrie des objets géographiques détectés varie peu ou pas selon le contexte géographique et temporel. Méthodes qui permettent également, par l'exploitation de la géométrie des objets détectés, de les reconstruire et les représenter en trois dimensions, de traiter, d'analyser et d'exploiter les images sub–métriques.
- ✓ L'exploitation des images hyper–spectrales permet de s'affranchir partiellement des problèmes de variabilité spatiale et temporelle de la mesure de télédétection, de mieux détecter, reconnaître, de caractériser plus finement et identifier les objets géographiques en raison de la plus grande finesse des signatures spectrales (donc des radiométries enregistrées) grâce à des intervalles de mesures spectrales très fines de

l'ordre de 0,01 à 0,1 µm sur le domaine du spectre électromagnétique défini (par exemple le visible proche infrarouge). Nous pouvons avoir jusqu'à 3000 mesures radiométriques différentes sur un même pixel ou ensemble de pixels (constituant la surface d'un objet géographique). Sans s'affranchir des problèmes de variabilité spatio-temporelle de la mesure, les démarches basées sur l'imagerie hyper–spectrale permettent de mieux discriminer les objets géographiques, de diminuer les erreurs de classification, de reconnaissance et d'identification et, par conséquent, de réduire les risques de confusion spectrale entre deux objets géographiques sémantiquement différents. L'idée de départ est par la finesse des signatures spectrales enregistrées « d'individualiser » (*d'individuer*) chaque objet géographique (sémantique) et chacun de ses composants (caractéristiques) biophysiques. Chaque objet géographique et chaque état de surface ont théoriquement une signature spectrale qui leur est unique. La télédétection hyper–spectrale part de ce principe.

2.4.3. VARIABILITE SPATIO–TEMPORELLE ET MODELE SEMANTIQUE D'INVERSION

La variabilité spatiale et temporelle de mesure de télédétection a également un impact direct sur les démarches, méthodes et méthodologies d'analyse en géographie. La raison tient à la quasi–impossibilité de mettre en place des modèles d'inversion radiométriques. Raison qui tient à x choses :

- ✓ Une culture de la télédétection spatiale qui, en géographie, est fortement imprégnée de l'héritage de la photo-interprétation et de la photo–analyse. Héritage qui a tendance à privilégier les méthodes d'analyse d'images.
- ✓ Des manques de moyens financiers et techniques qui, mis à part dans les applications à la frontière avec l'agriculture ou l'océanographie, il est difficile, voire illusoire de mobiliser. C'est-à-dire caler dans le même temps, mesures radiométriques au sol, terrain et heure d'enregistrement de l'image de télédétection spatiale ou aéroportée. Faiblesse des moyens qui tient également aux objets d'étude même des sciences géographiques en France et plus particulièrement en géographie humaine. Géographie humaine qui accorde encore, malgré la révolution quantitative des années 1970, peu ou pas de cas à l'expérimentation contrairement à la géographie physique.
- ✓ Dans le même temps, ce sont les objets même de la géographie humaine qui vont orienter les méthodes d'analyse en télédétection et en géomatique et permettre de sortir de l'impasse du modèle physique d'inversion.

Au modèle physique d'inversion va se substituer un modèle sémantique d'inversion. Un modèle basé sur la reconnaissance d'objets géographiques qui ont une réalité physique et/ou conceptuelle. Objets géographiques caractérisés par

une surface (ou une géométrie), un lieu, une localisation, une situation. Modèle sémantique d'inversion dont les mesures vont être confrontées à d'autres informations sémantiques d'origines géographiques ou spatiales comme des bases de données géographiques existantes, des cartes, des statistiques, d'autres résultats issus d'images satellites ou aéroportées ou cognitives avec les enquêtes de validation de terrain. Les enquêtes de terrain vont permettre, tout comme la fusion des résultats avec d'autres informations géographiques, d'enrichir, de compléter les mesures obtenues par imagerie aéroportée ou spatiale.

La nécessité de lier ce qui est détecté, reconnu, identifié, puis éventuellement cartographié, quantifié statistiquement ou géométriquement, extrait ou modélisé, vient de l'impossibilité de lier temporellement mesures de télédétection et mesures physiques au sol. Cette différence temporelle peut, entre l'acquisition, la réception, l'utilisation et le traitement de ou des images de télédétection, être de quelques jours à plusieurs mois, voire années. Dans le cas des analyses diachroniques, comme en Afrique de l'ouest, en Inde du Nord-Est ou sur les pays Baltes, ce sont pas moins trente à cent ans qui séparent les images, photographies aériennes ou cartes de leur traitement et analyse. Les modèles physiques d'inversion ont un intervalle de validité temporel qui ne dépasse pas les quatre heures au pire entre la mesure radiométrique au sol et la prise de vue par télédétection aéroportée ou spatiale sur la zone d'étude. Nous sommes des temporalités de mesures radiométriques des objets aux sols qui sont inconnues. La validité des mesures, la caractérisation des états de surface ne peuvent être établies qu'à travers l'établissement d'un lien sémantique entre ce qui est reconnu, puis identifié sur l'image et la réalité physique ou géographique de l'objet ou l'entité spatiale extraite. On parle de transfert sémantique entre la forme de l'entité spatiale et son identification en qualité d'objet géographique. La validité du modèle d'inversion dépend du rapport entre la capacité de la mesure de télédétection (caractéristiques des capteurs) à détecter des entités géographiques spatialisées qui seront mises en évidence (reconnues) par traitement et analyse d'images. L'analyse numérique des images permet la reconnaissance des éléments contenus dans l'image. Elle s'appuie sur leur traitement numérique dans le but d'améliorer la « qualité » radiométrique (niveau de discrimination radiométrique exprimé numériquement), de mettre en évidence des états de surface, des structures spatiales, des entités spatiales et d'en extraire de l'information géo–localisée. C'est par l'analyse d'image, c'est-à-dire, par la reconnaissance, l'identification et la catégorisation des entités spatiales en qualité d'objets géographiques que l'on génère de l'information géographique, des analyses et des interprétations sur le territoire ou la portion d'espace géographique étudiée. Nous passons du traitement physique des images à celui de l'analyse d'image, c'est-à-dire, la caractérisation.

2.4.4. L'ANALYSE ET LE TRAITEMENT D'IMAGES

L'ANALYSE D'IMAGES

L'analyse d'images ne constitue pas un ensemble homogène de méthodes. Leur choix dépend des types d'images à analyser et des objectifs recherchés. L'analyse d'images peut-être divisée en deux grands domaines (Coster, Chermant, 1989) :

- ✓ L'identification des formes des objets en les comparant à des formes types d'objets. C'est ce que l'on appelle la reconnaissance de formes. Elle est surtout utilisée en robotique, pour la reconnaissance de caractères, etc.
- ✓ L'analyse morphologique des structures et leur quantification par des paramètres. C'est ce que l'on appelle l'analyse quantitative d'image. Elle concerne les démarches par télédétection utilisées en géographie pour étudier l'espace géographique. L'analyse morphologique des structures et des dynamiques de l'espace géographique et de ses objets permet à la fois de les quantifier, de les caractériser ontologiquement et de les catégoriser. La quantification des paramètres de formes permet de générer des liens avec les caractéristiques biophysiques des objets géographiques, voire de les fusionner. La quantification des caractéristiques de l'espace géographique, des indicateurs et objets géographiques se fait par la description morphologique et biophysique des entités spatiales détectées en imagerie aéroportée ou spatiale ou par celle des objets géographiques figurés sur les cartes numériques, etc.

L'analyse d'images s'appuie, pour l'essentiel aujourd'hui, sur le traitement numérique des images. Le traitement d'images est né de l'idée et de la nécessité de remplacer l'observateur humain par la machine (Cocquerez, Philipp, 1995).

On distingue en analyse d'images deux niveaux de traitements : les traitements de « bas–niveaux » et les traitements de « hauts–niveaux ». La différence qui est faite tient au caractère sémantique et ontologique de l'entité spatiale. Existe-t-elle ? A-t-elle une signification ou une valeur géographique ?

Les traitements sont qualifiés de bas–niveaux lorsque les opérations mathématiques appliquées sur l'image de télédétection n'ont pas de rapport (direct) avec une réalité géographique, qu'elle soit de nature biophysique, sociale ou conceptualisée (un territoire par exemple). Les méthodes de segmentations automatiques d'images, appliquées indistinctement sur l'image, sont qualifiées de traitement de bas–niveaux. Elles sont basées sur les seules valeurs des radiométries des pixels et de l'opérateur mathématique appliqué.

Les traitements sont dits de haut–niveau lorsqu'ils s'appliquent sur des entités spatiales qui ont une réalité géographique. Ces entités spatiales qui ont une signification géographique sont souvent qualifiées d'entités symboliques du fait qu'elles sont rattachées à une sémantique. Ce sont, d'un point de vue

mathématique, des objets symboliques et d'un point de vue géographique, des objets sémantiques. Objets sémantiques qui sont géo–localisés et ont une spatialité.

Les traitements appliqués sur les images numériques de télédétection, les cartes numériques, etc., sont théoriquement qualifiés de hauts–niveaux. Les images de télédétection sont une mesure de la réalité biophysique et sociale de la surface de la Terre, les cartes numériques figurant des informations sémantiques.

Dans le cas des traitements de bas–niveaux, les résultats des transformations de l'image opérés par le traitement mathématique, sont analysés par comparaison avec la réalité géographique perçue, connue ou comparée à d'autres résultats ou informations géographiques. C'est à partir des résultats que le géomaticien va rechercher des entités spatiales qui ont une signification géographique, c'est-à-dire, une réalité ontologique et sémantique pour le géographe.

L'ANALYSE D'IMAGES EN GEOGRAPHIE (TELEDETECTION)

La difficulté, voire l'impossibilité de synchroniser sur un même intervalle de temps, mesures physiques (radiométriques) et sémantiques (objets) au sol avec la prise d'images spatiale oriente de fait la presque totalité des démarches géographiques par télédétection. L'approche sémantique ou objet permet de lier les démarches d'étude des territoires par télédétection et géographie. Les objets de la géographie humaine peuvent être télé–détectés et analysés, c'est-à-dire, mesurés spectralement et modélisés spatialement. L'analyse de l'espace géographique et des processus de territorialisation en cours par télédétection se fonde sur la reconnaissance des objets de la géographie humaine. Du fait de son caractère spatialisé, elle prend en compte à la fois les dimensions physiques, environnementales, sociétales à travers la mesure (spectrale) de leur inscription spatiale sur l'espace géographique. La reconnaissance des objets géographiques nécessite d'avoir une connaissance *a priori* des objets et entités géographiques à reconnaître, caractériser et représenter. Connaissance *a priori* qui passe également par une analyse *a postériori* des entités spatiales détectées et reconnues qui ne sont pas identifiées. L'approche objet nécessite d'avoir des bases de connaissances préexistantes qui peuvent être informatisées sous la forme de bases de données ou cognitives (connaissance géographique du territoire étudié, l'expérience, etc.). Le lien entre objets de la géographie et objets détectés par les mesures spectrales ou reconnus en analyse d'images par les traitements de données se fait par analogie.

OBJECTIVATION DE LA REALITE DE L'ESPACE GEOGRAPHIQUE

L'analyse d'images se base sur les mesures « spectro–spatiales » (spectrales rapportées à l'unité de mesure élémentaire qui est représentée sur l'image sous la forme d'un pixel) de la surface de la Terre. Elle nous place dans une approche orientée sur la « reconnaissance objet », l'objet (géographique) étant à la fois une entité physique (un indicateur géographique ou une composante d'un indicateur géographique composite ou complexe). Le fait de baser nos analyses d'images sur la reconnaissance objet nous positionne dans une démarche faisant appel à une conceptualisation et représentation a priori de l'organisation du territoire et de la structure de la portion de l'espace géographique étudiée, tout comme des phénomènes et des processus géographiques le transformant. Les analyses et modélisations qui vont être générées vont affirmer (confirmer), modifier et transformer notre représentation et conceptualisation a priori du territoire. Elles sont basées sur le traitement mathématique et informatique des données, c'est-à-dire, sur une approche « subjectivité » par les référentiels géographiques acquis et innés permettant au géographe de reconnaître, identifier des objets géographiques, d'analyser et d'interpréter les résultats. Résultats objectivables du fait que les analyses s'appuient sur le traitement numérique de mesures spectrales d'une réalité physique et sociale, l'espace géographique et/ou sur des bases de données géographiques. Démarche qui pourrait être qualifiée d'objectivée du fait que les données numériques de télédétection aéroportées et spatiales utilisées sont un ensemble de mesures biophysiques et sociales discrétisées du continuum géographique ou également que les informations géographiques produites, qui sont également employées, sont des représentations pensées, conceptualisées d'objets géographiques structurant l'espace géographique.

L'analyse d'images a pour but la reconnaissance, la caractérisation et l'identification des objets géographiques. Elle se base sur le traitement mathématique et l'analyse des composantes informationnelles de l'image issues des mesures spectro–spatiales de la surface de la Terre. L'analyse des processus de métropolisation par télédétection est une démarche fondée sur une réalité objectivée par la mesure spectrale. Mesure spectrale qui décrit un phénomène physique, une réalité géographique et spatiale localisée à la surface de la Terre : l'espace géographique.

L'image, au sens général, est une représentation planaire d'une scène spatiale ou aéroportée de l'espace géographique. L'information élémentaire, le pixel, est une grandeur biophysique enregistrée et codée par le capteur en général sur 256 ou 512 niveaux de gris.

Les images de télédétection, au format raster, sont des matrices numériques. Chaque élément de la matrice, le pixel, est l'unité de mesure élémentaire spatiale et spectrale exprimant une radiométrie dans un intervalle donné du spectre électromagnétique. Elle nous place dans le choix des méthodes d'observation.

La radiométrie enregistrée n'est jamais « pure ». Elle est considérée par certains comme une mesure qui est par défaut fausse (Widlowski et al., 2004). Elle est le résultat de la moyenne des réflectances en interaction de la portion de surface de la Terre mesurée dans un intervalle spectral en raison des multiples interférences des rayonnements incidents, réfléchis, polarisés, plus ou moins connexes (proches), des distorsions de fréquences introduites par les différentes couches de l'atmosphère, etc., de la sensibilité des capteurs, des prétraitements et de la surface couverte par les pixels, la résolution spatiale. Selon la résolution spatiale, le pixel peut être la mesure radiométrique d'un objet géographique (ce qui est rare), d'une partie de celui-ci ou être le résultat d'une mesure composite d'un ensemble d'objets : des bâtiments avec un jardin et un parking par exemple.

En géographie, le pixel pris seul n'a pas de sens. Il représente une mesure d'une réalité biophysique de la surface de l'espace géographique. Il exprime une réalité physique. Il n'a pas de réalité géographique. Cela tient au mode de mesure discontinu de la surface de la Terre, l'espace géographique. Les matrices numériques que sont les images de télédétection sont des alignements de mesures unitaires exprimant une radiométrie : les pixels. Cet alignement de mesures discrètes confère, permet de rendre compte de l'aspect continu et discontinu de l'espace géographique, celui-ci étant un continuum spatial couvrant la surface de la Terre, composé d'entités géographiques générant des discontinuités. C'est l'agencement des unités de mesures élémentaires que sont les pixels qui donne un sens géographique et sémantique.

La reconnaissance des entités ou des objets géographiques sur l'image de télédétection numérique au format raster tient à la sensibilité des capteurs, aux résolutions spectrales, spatiales et à la date de la prise de vue, c'est-à-dire à son niveau de détectabilité. Sur l'image de télédétection, ce sont les agencements de pixels aux radiométries similaires (exprimées par des valeurs numériques proches ou identiques) qui permettent de reconnaître les objets géographiques. Chaque ensemble de pixels de valeurs similaires exprime un même contenu biophysique, textural et géométrique à partir duquel vont être reconnus, caractérisés, puis identifiés les objets géographiques à l'aide des méthodes de traitement mathématique des images ou visuellement. C'est à partir de contenus

biophysiques et texturaux similaires que l'on va reconnaitre des entités spatiales. Entités spatiales qui ont une géométrie. L'agencement des pixels aux radiométries similaires et connexes entre-elles permet de reconnaitre les entités spatiales et de reconstituer par analyse d'image les objets géographiques localisés à la surface de la Terre.

Reconstitution qui fait appel généralement à la reconnaissance de « régions » de l'image à l'aide d'opérateurs de « filtrages » et de « segmentations » d'images. En traitement et analyse d'images, une région est un ensemble connexe de pixels ayant des propriétés communes (intensité, texture, etc.) qui les différencient des pixels des régions voisines. Une segmentation est un traitement de bas–niveaux qui consiste à créer une partition de l'image en sous-ensembles appelés « régions » (Cocquerez, Philipp, 1995). Le choix de la méthode de segmentation d'image est lié :

- ✓ A l'objectif (mesure, reconstruction 3D, spatio–cartographie, identification d'un objet géographique particulier, etc.).
- ✓ Aux données disponibles, à la nécessité d'opérer des prétraitements pour améliorer le contraste radiométrique (par la transformation des valeurs statistiques de l'image).
- ✓ A la qualité de l'image (bruits, stries, etc.),
- ✓ Aux primitives de l'image à exploiter. Choix qui est à la fois fonction de l'objectif, des données et de leur qualité : intensité (radiométrie), régions, formes, textures, contours, etc.,
- ✓ A la puissance de calcul disponible.
- ✓ L'ensemble de ces éléments conditionne le niveau de précision de la segmentation d'image.

ANALYSE D'IMAGES, SEGMENTATION ET NOTION DE FRONTIERE

Les méthodes mathématiques d'analyse d'images peuvent être divisées en deux approches et quatre ensembles d'opérateurs.

La segmentation d'image s'appuie sur quatre notions : la similarité, la connexité, la différenciation et la limite. Quatre notions qui, combinées, ont donné naissance à deux ensembles de méthodes de segmentation : les approches « frontières » et les approches « régions ».

La reconnaissance des entités spatiales ou des objets géographiques peut se faire à partir des notions de similarité de la mesure spectrale, d'une ou plusieurs des primitives de l'image. Similarité qui peut être associée à celle de connexité. Les pixels doivent être contigus un à un. La limite de l'objet géographique ou de l'entité spatiale est déterminée par les pixels ayant des valeurs numériques différentes. C'est-à-dire par une mesure montrant un autre état biophysique de la surface de l'espace géographique. C'est la différence (ou la variation) de

radiométrie qui permet de différencier les entités spatiales entre-elles, c'est-à-dire, les états de surface de l'espace géographique.

Dans le cas de l'utilisation des méthodes de classification (analyses factorielles), seule la notion de similarité joue. Les pixels de valeurs similaires sont classés un à un dans un même ensemble, les pixels pouvant être ou non connexes.

Les approches de segmentation « régions » utilisent généralement les méthodes basées sur les classifications multidimensionnelles (analyses factorielles), les méthodes markoviennes et les méthodes structurales.

Les approches « frontières » en segmentation d'image désignent les opérations de reconnaissance des contours des objets géographiques. Selon le type d'opérateur mathématique utilisé, il faudra procéder à la fermeture des limites désignant le contenant des objets géographiques. Par opposition, le contenu, c'est-à-dire la région, est défini topologiquement comme l'intérieur d'une ligne fermée (Cocquerez, Philipp, 1995).

Les approches « frontières » sont généralement basées sur les méthodes dérivatives, morphologiques, surfaciques, neurologiques, variationnelles ou markoviennes.

Les approches « frontières » et « régions » s'appuient sur quatre ensembles d'opérateurs mathématiques qui peuvent être combinés (chaînés) :

- ✓ Les méthodes de traitement du signal basées sur l'utilisation d'opérateurs linéaires (filtrage linéaire ou convolution que l'on peut assimiler à des méthodes statistiques locales), la transformée de Fourier ou les opérateurs de dérivation. Ce sont des méthodes qui opèrent une transformation des images avec la modification des valeurs radiométriques des pixels.
- ✓ Les méthodes statistiques sont plus tournées vers l'extraction d'informations que ce soit au niveau du pixel à l'instar des classifications multidimensionnelles ou du groupe de pixels. Les pixels extraits sont regroupés à l'aide de modèles déterministes, statistiques de type multidimensionnel ou taxinomique (Coster, Chermant, 1989).
- ✓ Les méthodes syntaxiques. Elles se caractérisent par la reconnaissance d'un certain nombre de primitives de l'image de télédétection comme les segments de droites, les arcs de cercles, etc. et de les associer avec des règles grammaticales. Nous pouvons par ce biais caractériser géométriquement et morphologiquement les objets géographiques.
- ✓ Les méthodes de morphologie mathématique, méthodes qui sont basées sur la théorie des ensembles.

Si les approches « frontières » et « régions » et les différentes méthodes de calcul mathématique permettent de reconnaître et de caractériser les entités spatiales et géographiques structurant l'espace géographique, objets et entités géo–localisés à la surface de la Terre, la plupart ne permettent pas l'extraction ex nihilo des entités spatiales, des objets et des indicateurs géographiques.

L'extraction des objets géographiques reconnus et sémantiquement identifiés sur l'image à l'aide des opérateurs mathématiques est, en analyse d'image, une étape importante. Elle permet d'isoler et d'analyser les objets géographiques, de les intégrer dans une base de données géographiques en système d'information géographique ou de les représenter sous une forme cartographique ou image 2D/3D ou 3D.

Elle permet également de modifier le format dans lequel l'objet ou l'indicateur géographique est enregistré : base de données orientée objet, format vecteur pour l'essentiel.

Les méthodes d'extraction d'objets géographiques, en analyse d'images numériques, peuvent être divisées en quatre groupes :

- ✓ Les méthodes d'extraction interactives par reconnaissance et identification visuelle des objets (photo–analyse) et numérisation manuelle des objets.
- ✓ L'extraction semi-automatique des objets géographiques par seuillage statistique d'une image (segmentation structurale). Le géomaticien détermine interactivement les seuils statistiques et structuraux (le plus souvent visuellement) pour extraire l'objet ou les objets géographiques correspondant à cet intervalle radiométrique (ou statistique si l'image a été préalablement transformée).
- ✓ Les méthodes d'extraction automatisées par reconnaissance des radiométries des objets géographiques enregistrées sur l'image de télédétection.
- ✓ Les méthodes d'extraction automatisées par reconnaissance syntaxique.

La qualité des méthodes d'extraction dépend des niveaux de contrastes radiométriques de l'image. Contrastes radiométriques qui sont liés à la qualité des capteurs, aux bandes spectrales utilisées, aux types de traitements ou de prétraitements appliqués et aux connaissances préalables que l'on a des objets à extraire (cognitif, bases de connaissances spectrales ou morphologiques), de l'impact de la variabilité spatio-temporelle, tout comme de l'adéquation entre la taille surfacique des objets et la résolution spatiale de l'image.

Les primitives de l'image de télédétection spatiale ou aéroportée concernent les éléments que l'on peut extraire des mesures radiométriques du continuum géographique et des objets géo–localisés et spatialisés le constituant et les utiliser pour reconnaître, caractériser et identifier sémantiquement les entités spatiales télé–détectées.

Nous pouvons classer ces primitives selon l'approche « frontière » ou « région » choisie. Dans l'ensemble des travaux effectués, l'approche « région » a été privilégiée, les limites, frontières, gradients, discontinuités étant reconnues et extraites une fois les entités spatiales et les objets géographiques (« les régions ») reconnus en utilisant les méthodes de morphologie mathématiques ou les méthodes de reconstruction syntaxiques.

Les primitives (appelées également attributs) utilisées en analyse d'image dans les approches « régions » pour reconnaître les entités spatiales et les objets considérés comme géographiques sont :

- ✓ Les paramètres de formes pour décrire une région de l'image, en l'occurrence l'objet ou l'entité géographique.
- ✓ Les paramètres issus des valeurs radiométriques des pixels. Ils permettent d'effectuer des mesures sur les critères de taille, de radiométrie, de texture, etc.

Tableau 3 : primitives de l'image utilisées dans l'approche « région ».

Attributs de l'image (primitives)	
Texture	La texture, à une échelle donnée, présente le même aspect (de mêmes structures).
Descripteurs	Matrice de cooccurrence. Les matrices de cooccurrence contiennent une masse importante d'informations, jusqu'à 14 caractères descriptifs (Haralik, 1979) : contraste, homogénéité, etc. Caractères descriptifs qui sont cependant difficilement exploitables dans leur totalité.
Iso-segments (longueur de plage)	Plage de pixels ayant une même valeur (radiométrie).
Spectre	La transformée de Fourier permet de
	passer d'une représentation spatiale de

	l'image à une représentation fréquentielle. Les informations obtenues peuvent être utilisées pour calculer les filtres.
Attributs fractals	Ils permettent de caractériser une texture ou une région de l'image. On peut caractériser la géométrie (la lacunarité) et la répartition de la mesure radiométrique d'un objet géographique. Les attributs multi–fractals permettent de calculer l'invariance d'échelle locale de la mesure. La dimension fractale d'une image est comprise entre 2 et 3. Une texture lisse aura une dimension fractale proche de 2.
Attributs surfaciques	
Courbure	Le calcul de courbure (courbure gaussienne, courbure moyenne) permet de mettre en évidence les bosses, les creux, les « vallées », les plateaux, les crêtes, etc. (Best, Jain, 1986).
Formes quadratiques (les quadratiques recoupent plusieurs concepts qui ont en commun la notion de carré. On parle de fonction, de moyenne, d'écart quadratique).	Exemple : l'analyse en composante principale (ACP), appelée transformée de Kahunen-Loeve en traitement d'image.
Attributs géométriques	
Aire	
Périmètre	
Centre de gravité	
Diamètre de la « région »	
Compacité (facteur de circularité)	
Elongation (rapport entre la longueur et la largeur d'un rectangle d'encadrement)	
Nombre d'Euler (nombre de	

connexités)	
Attributs inter-régions	Etude des relations d'une région (objet géographique, entité spatiale).

Primitives de l'image utilisées dans l'approche « frontière ».

Les approches dites « frontière » sont basées sur la reconnaissance des variations des valeurs radiométriques enregistrées sur l'image de télédétection. Les variations des valeurs radiométriques expriment des changements d'états de surface de l'espace géographique, d'entités spatiales, d'objets géographiques. Changements d'états de surface qui traduisent les structures de l'espace géographique, les modes et les formes d'organisation, d'aménagement et d'utilisation des territoires.

Tableau 4 : méthodes de segmentation.

Méthodes dérivatives	Les démarches dérivatives permettent de reconnaître et de localiser immédiatement les variations de radiométries, les limites (contours) étant assimilées aux pixels de fort gradient ou de dérivée seconde nulle (Cocquerez, Philipp, 1995).
Gradient	Extraction des maximums radiométriques locaux de l'image, seuillage par hystérésis.
Dérivée seconde	Calcul de la dérivée seconde dans la direction du gradient, recherche des passages par zéro, seuillage par hystérésis (élimination des passages par zéro non significatifs) (Cocquerez, Philipp, 1995).
Laplacien	Calcul du Laplacien, recherche des passages par zéro, seuillage par hystérésis (élimination des passages par zéro non significatifs) (Cocquerez, Philipp, 1995).
Exemple d'opérateurs de convolution	Prewitt, Sobel, gradients directionnels de Kirsh, MDIF, NAGDIF, Shen, Deriche, etc.
Méthode surfacique	La matrice des valeurs radiométriques

	est prise comme une surface. Au voisinage d'un passage par zéro, l'image est approximée par un polynôme cubique. Les passages par zéro identifiant les contours sont détectés de manière analytique par interpolation. Les méthodes surfaciques ont des niveaux de précision dans la location des limites théoriquement inférieurs au pixel.
Exemple d'opérateurs	Hueckel, Haralick.
Méthodes par morphologie mathématique	Principe de base : le gradient radiométrique s'interprétant comme une étendue codée sur 256 ou 512, c'est-à-dire, la portion de l'espace géographique étudiée.
Gradient morphologique	Opérations : Dilatation, puis Erosion (équivalent à une différence entre le maximum et le minimum radiométrique). Amincissement morphologique homotopique qui, en fonction de l'épaisseur du contour et des éventuelles aspérités, peut être suivi d'une ébarbulation. Cette méthode est cependant sensible au bruit et génère une sur–segmentation sur nombre d'images de télédétection. Son utilisation est privilégiée ici dans des post–traitements pour extraire des limites des objets géographiques (Gadal, 1998) (Gadal, 2000) (Gadal, 2003). On notera que l'utilisation du gradient morphologique avec l'élément structurant Golay H permet de générer une cartographie des discontinuités spatiales (Gadal, 2003).

Ligne de partage des eaux	L'image de télédétection est prise comme une surface à trois dimensions, la troisième dimension figurant l'intensité radiométrique. La crête radiométrique donne la limite entre deux « bassins–versants ». La représentation de l'image sous la forme de ligne de partage des eaux est obtenue avec l'élément structurant Golay L par un amincissement par itération jusqu'à stabilisation. Puis seuillage monodimensionnel (segmentation structurale). Cette méthode de traitement est particulièrement adaptée pour reconnaître les objets géographiques proches radiométriquement. Cette méthode permet de ne garder par amincissement « successifs » (itératifs dans les huit directions connexes d'un pixel) que les crêtes (sommets) et les vallées (représentant des entités spatiales). Seules sont gardées les radiométries des crêtes marquant la limite de chaque entité spatiale et la radiométrie la plus faible couvrant la totalité de l'objet. On notera que l'utilisation du gradient morphologique avec l'élément structurant Golay H (amincissement et convergence) permet de reconnaître les lieux géographiques sur les images de télédétection (Gadal, 2001) (Gadal, 2003).
Méthodes par localisation des contours	
Extraction des maximums locaux de la norme du gradient	
Seuillage par hytérésis	Seuillage dans lequel les maximums locaux supérieurs aux valeurs de seuils a et b (a>b) et qui appartiennent à une composante connexe comprenant une

	valeur supérieure à « a » sont conservées (Canny, 1986).
Suivi de la ligne de crête (morphologie mathématique)	Détermination de marqueurs de contours binaires dans l'image de la norme de gradient par extraction des maximums locaux. Propagation par traitement itératif et convergence avec un élément structurant.

AMELIORATION DU CONTRASTE RADIOMETRIQUE

La qualité des segmentations « régions » ou « frontières » dépend du niveau de « contraste » radiométrique entre les objets géographiques et de la résolution spatiale (rapport entre la résolution spatiale et la taille surfacique des objets géographiques). La précision des segmentations dépend avant tout de l'amplitude de la variation radiométrique séparant les objets géographiques. Au plus celle-ci est grande, plus il sera facile de séparer et d'extraire les objets géographiques. La qualité de la segmentation dépend de la méthode de traitement d'image utilisée.

Le niveau de contraste radiométrique peut être amélioré par une série d'opérations mathématiques souvent qualifiées de prétraitements qui peuvent être :

- ✓ L'amélioration du rapport bruit/signal. Elle peut se faire en amont lors de la phase d'acquisition des données ou en aval par la réduction du bruit sur l'image. Les régions formant l'image sont caractérisées par des mesures qui représentent des intensités radiométriques moyennes. Les fluctuations autour de cette intensité moyenne peuvent être liées au capteur ou à la scène enregistrée. Le bruit est plutôt dans les hautes fréquences. L'échelle spatiale des fluctuations est relativement faible par rapport aux dimensions des régions (Bolon, 1995). Le but est, dans le cas des traitements « avals » une fois l'image acquise, de diminuer l'amplitude des variations d'intensité de chaque région de l'image tout en conservant les transitions d'intensité radiométrique marquant la séparation entre les régions adjacentes. Deux ensembles de méthodes usuelles sont généralement utilisés : les méthodes de filtrage linéaire stationnaire (moyenne, gaussienne, exponentielle) et les méthodes de filtrage non linéaire (filtres d'ordres comme les filtres médians, le M–filtre ou les filtres morphologiques). L'amélioration du rapport bruit/signal n'est pas suffisante et nécessite d'appliquer d'autres méthodes de traitement d'images pour améliorer le contraste radiométrique des données numériques de télédétection.

- ✓ La modification du codage de l'image par le passage de 8 à 16 bits, 32 bits, voire à 64 bits. Cette modification du codage modifie l'amplitude de distribution de l'histogramme (de 256 à 1024 niveaux par exemple). Amplitude de distribution qui permet d'identifier et de discriminer plus finement les objets les uns par rapport aux autres.
- ✓ La modification de l'histogramme. Elle correspond à une transformation ponctuelle d'intensité. Les méthodes de transformation d'histogrammes n'affectent pas la forme des régions (objets géographiques) du fait de leur caractère ponctuel. Le résultat est une modification de « l'apparence visuelle » de l'image. Les méthodes utilisées sont en général l'extension de la dynamique et l'égalisation d'histogrammes (renforce les contrastes radiométriques sur les détails de l'image qui est « masquée » par les variations d'intensité de plus grande amplitude).
- ✓ L'amélioration de l'image par filtrage. Elle consiste, soit :
    - à réduire les variations d'intensité radiométrique à l'intérieur d'une même région (objet géographique) sans affecter la zone de transition radiométrique marquant la limite des objets géographiques adjacents (connexes).
    - à diminuer l'étendue spatiale de la zone de transition sans interférer sur l'intensité radiométrique moyenne des régions définissant la surface d'un objet géographique (méthodes de rehaussement de contraste). Trois familles de filtres peuvent être utilisées pour améliorer le contraste radiométrique des images :
        - Les filtres linéaires prenant en compte la totalité de l'image à l'instar des transformées de Fourier ou locaux en utilisant les opérateurs de convolution. On distingue les filtres linéaires locaux « passe-bas » et « passe-haut ». A titre d'exemple, un filtre « passe-bas » enlèvera toutes les composantes du spectre de fréquences supérieures à une valeur de fréquence donnée (radiométrique). Les filtres linéaires sont des produits de convolution.
        - Les filtres morphologiques. Ils opèrent une transformation de l'image qui doit respecter deux propriétés fondamentales : être idempotente et être croissante (la relation d'inclusion remplace la relation d'additivité des filtres linéaires). Une transformation croissante et idempotente est un filtre morphologique. Les filtres morphologiques se distinguent des filtres linéaires par le fait que la notion de croissance remplace les propriétés d'additivité des filtres linéaires. Ces derniers se caractérisent par l'absence de perte d'information lors des transformations de l'image, les filtres morphologiques par une perte d'information. Une transformation croissante s'accompagne d'une perte d'information. Utiliser des

filtres morphologiques, c'est en quelque sorte faire le choix des informations de l'image à éliminer.

- Les filtres adaptatifs, que l'on peut classer en deux catégories : les filtres d'ordre à l'instar du filtre médian et les filtres de position. Les filtres d'ordre classent les niveaux de gris (radiométries) d'un voisinage et sélectionnent parmi ces quantités une ou plusieurs valeurs. Les filtres de position considèrent des sous voisinages du point (Coster, Chermant, 1989).

On distingue deux ensembles d'opérations : les lissages (filtres passe-bas, filtres morphologiques par ouverture et fermeture avec l'élément structurant G) et les rehaussements. Par exemple, les transformations morphologiques de rehaussement de contraste exploitent l'information de proximité relative avec sa dilatée et son érodée. Le but est d'affecter à un pixel, soit la valeur de l'image dilatée, soit celle de l'image érodée pour générer des discontinuités (spatiales).

2.5. EXEMPLES DE METHODOLOGIES DE RECONNAISSANCE, D'IDENTIFICATION ET D'EXTRACTION DES OBJETS URBAINS

2.5.1. SATELLITES METEOROLOGIQUES GRANDS–CHAMPS : METEOSAT SECONDE GENERATION

SATELLITES GRANDS–CHAMPS ET IDENTIFICATION DES STRUCTURES URBAINES

Dans la logique des méthodologies appliquées aux images infrarouges thermiques NOAA 14 développées en doctorat, les applications similaires utilisant les bandes thermiques de MSG-8 se sont révélées inopérantes. Les méthodologies développées avec les bandes TIR de NOAA-14 AVHRR étaient non transposables pour détecter, reconnaître et identifier les territoires urbains en Afrique de l'ouest. Les résultats obtenus en doctorat avec les bandes infrarouges thermiques NOAA-14-AVHRR et les capteurs IRM de MSG-8 ou encore Landsat-5 TIR (Gadal, 2008) tendent à infirmer les propos tenus par Christopher Elvidge et al. (Elvidge et al. 2007) sur le fait que seules les données DMSP OLS peuvent renseigner sur les activités humaines : « *Artificial lighting is a unique indicator of human activity that can be measured from space* ». Il reste que les données DMSP restent les plus pertinentes à ce jour. Elles ne détectent cependant pas l'ensemble des activités humaines ou des centres urbains contrairement aux images IRM et TIR. Seuls, les territoires éclairés sont détectés, mettant de fait nombre de pôles

urbains sahéliens hors du champ de la détection par imagerie spatiale (Gadal, 2000).

Des méthodes spécifiques ont été développées sur d'autres bandes spectrales de l'infrarouge proche et moyen. Des méthodologies tout aussi spécifiques ont dû être créées pour extraire les zones d'habitat à partir des photographies scannées de nuit du capteur VNIR OPL embarqué sur les vecteurs US Air Force DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*).

Ces images grands–champs ont, comme premier intérêt, de couvrir d'une seule traite des régions entières sur des centaines de kilomètres avec un taux de mise à jour qui peut être journalier (chaque quinze minutes avec Météosat seconde génération).

Ces caractéristiques sont fondamentales pour le suivi de l'émergence de vastes territoires métropolisés ou urbanisés comme en Inde (corridor de développement Delhi–Mumbai), le long du littoral ouest–africain ou dans les Pays baltes.

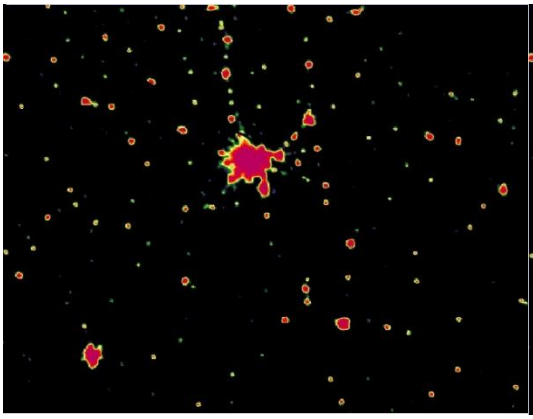
Elles permettent d'identifier rapidement les structures urbaines, de mettre en évidence le développement de systèmes urbains, de suivre la croissance des villes, d'estimer les densités de population ou leur niveau de vie. Leur faible résolution spatiale au sol, kilométrique, ne permet pas de détecter la totalité de l'urbanisation, seulement les territoires urbains densément peuplés.

L'emploi de satellites météorologiques pour identifier et cartographier les armatures urbaines aux échelles régionales et continentales n'est pas quelque chose de nouveau. De nombreuses applications ont été faites avec le capteur OLS (VNIR) embarqué sur le satellite DMSP (Welch, 1980), (Imhoff et al. 1997) (Small, 2005), plus ponctuellement avec l'utilisation des images infrarouges thermiques NOAA-AVHRR (Gadal, 2001).

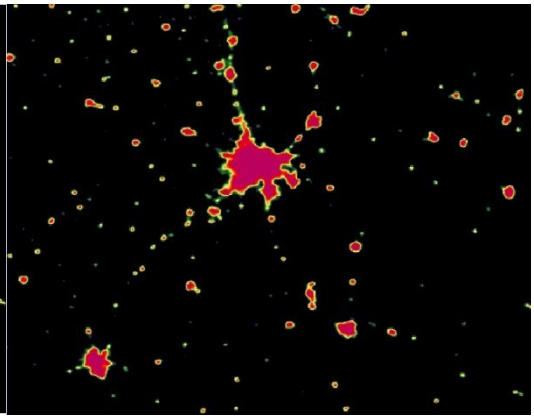
A l'instar de ce qui a été développé en doctorat avec l'utilisation des deux bandes spectrales de l'infrarouge thermique des données NOAA-AVHRR et des images DMSP OLS sur les pays Baltes et l'Inde, nous avons cherché à évaluer les potentialités des données de l'imageur SEVIRI de Météosat 8 dans la détection et la reconnaissance des conurbations et des centres urbains en Afrique de l'ouest.

Figure 13 : croissance urbaine de Delhi entre 1992 et 2009 (DMSP-OLS F-10 et F-16).

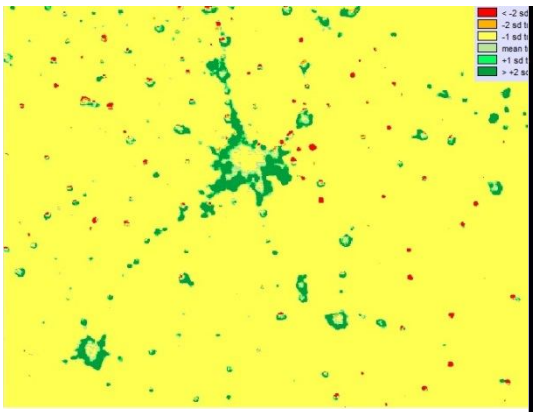
Extraction des centres urbains (1992)



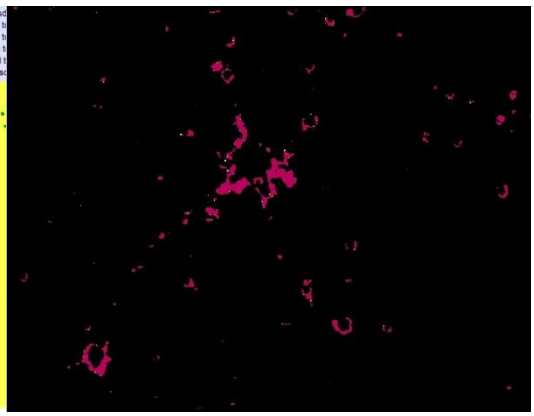
Extraction des centres urbains (2009)



Reconnaissance des changements par calcul de la déviation standard 1992-2009



Reconnaissance et extraction des zones de croissance urbaine



La prise d'images en continu pour le suivi de la croissance urbaine au niveau régional s'avère un atout dans une région caractérisée par des rythmes d'urbanisation élevés avec 4,8% de croissance annuelle (Delcourt, 2007). La rapidité de transformation des espaces urbains est liée, d'une part, à l'émergence de nouveaux pôles urbains et de conurbations littorales et, d'autre part, dans les principales villes d'Afrique de l'ouest comme Dakar à des processus d'étalement urbains donnant naissance à des territoires urbanisés de plusieurs dizaines de km². La cadence des transformations de l'espace géographique nécessite une mise à jour constante des bases de données pour, à la fois, mesurer les dynamiques urbaines, détecter l'apparition de territoires urbains de plus de 36 km² et évaluer les impacts géographiques. Seules les conurbations s'étalant sur plus de 36 km² sont détectées du fait de la résolution spatiale de 9 km² des images.

LES BANDES SPECTRALES UTILISEES

Six jeux de données datant des 28 janvier 2004, 2005 et 2006 avec des images prises à deux heures du matin et à midi ont été constitués à partir de tris effectués dans la base de données images de la station de réception Météosat du GDR 2839 MSG-ATR. Chaque jeu de données regroupe des images prises de jour et de nuit dans le visible (VIS0.6, VIS0.8), les proches, moyens (IR 3.9, WV 6.2, WV 7.3, IR 8.7 et IR 9.7) et thermiques infrarouges (IR10.8, IR12 et IR13.4).

La première phase de l'évaluation a porté sur le niveau de détection des pôles urbains de jour et de nuit pour chacune des bandes spectrales. Les images couvrant le spectre visible VIS0.6 (0,56 µm–0,71 µm), infrarouge moyen IR3.9 (3,48–4,36 µm) et thermique infrarouge IR12 (11–13 µm), ont été sélectionnées. A la lecture de ces images, seules les bandes spectrales VIS 0,6 IR 3,9 et IR 12, pouvaient détecter les centres urbains de plus de 36 km² et cela dans des conditions bioclimatiques spécifiques. Les tests effectués sur les différentes bandes spectrales dans de l'infrarouge thermique (IR10.8, IR12 et IR13.4), des proches et moyens infrarouges (IR 3.9, WV 6.2, WV 7.3, IR 8.7 et IR 9.7) (SWIR), tout comme sur le visible (VIS 0.6) montrent que :

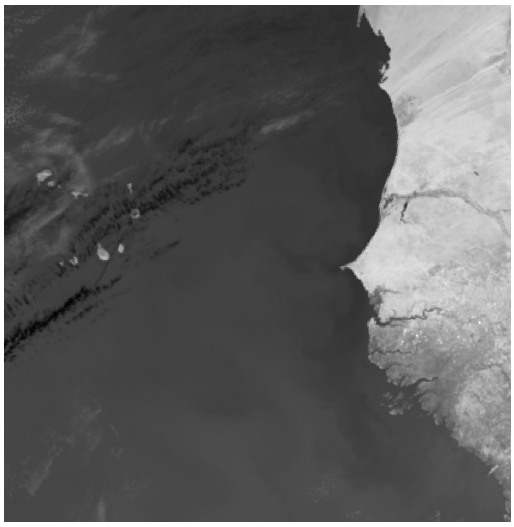
- ✓ Seules les images prises dans le canal IR3.9 permettent une bonne détection, uniquement de jour, des centres urbains.
- ✓ Les images IR12 (infrarouge thermique) permettent de détecter certains pôles sur la zone littorale.
- ✓ La bande VIS 0.6 permet la détection de certains pôles urbains en milieu sahélien littoral.

L'utilisation des canaux de l'infrarouge thermique sur des images prises de nuit s'avère peu pertinente. Les pôles urbains ne sont pas détectés. Il en est de même des images prises de nuit dans la bande IR 3.9 µm. Nous n'observons pas la présence d'effets *d'Urban heat islands* de nuit (Kerkmann, 2003).

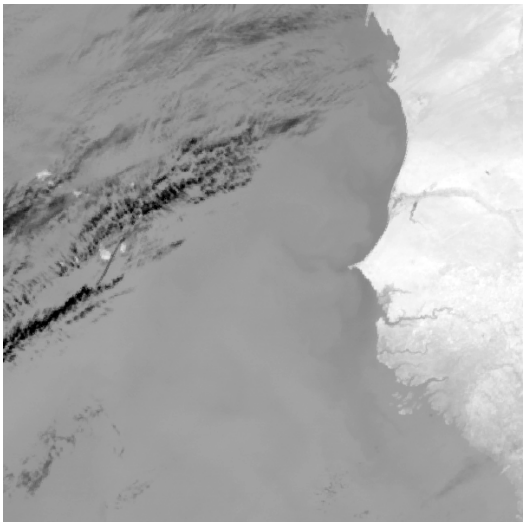
Figure 14 : images Météosat-8 sélectionnées (28 janvier 2004 à 12 heures).

Canal VIS 0,6 µm

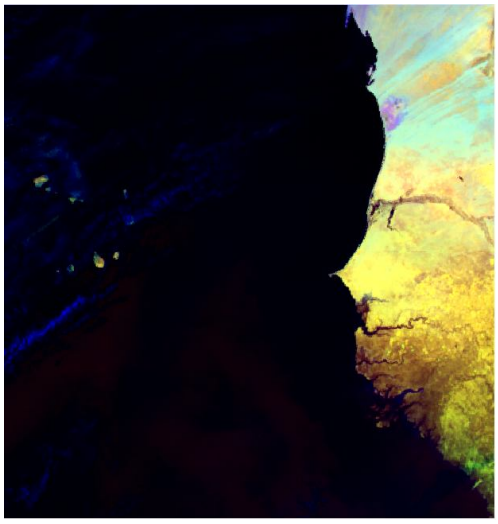
Canal IR 3.9 µm



Canal IR12 µm



Composition colorée (IR12/IR3.9/VIS0.6)



VARIABILITE SPECTRALE ET TEMPORELLE DU NIVEAU DE DETECTION

On observe une variabilité géographique spatiale et temporelle dans la détection des centres urbains. Leur niveau de détection varie selon les bandes spectrales, l'espace géographique, l'année et l'aire d'extension spatiale du domaine bioclimatique. Géographique, car en fonction des caractéristiques du pôle urbain (étendue, niveau de dépenses en énergies), du milieu géographique (désertique, tropical humide, etc.) et de sa localisation (au bord de l'Océan atlantique, le long du fleuve Sénégal, etc.), celui-ci sera plus ou moins bien détecté. Temporel, spatial

et bioclimatique, car selon le domaine d'extension de la savane d'une année à l'autre, les niveaux de détection et de discrimination radiométrique peuvent être plus ou moins marqués.

Tableau 5 : niveau de détection par bande spectrale et année.

Bande spectrale	Domaine bioclimatique	Niveau de détection en 2004	Niveau de détection en 2005	Niveau de détection en 2006
VIS0.6	Désertique			
	Tropical sec			
	Tropical humide			
IR3.9	Désertique			
	Tropical sec			
	Tropical humide			
IR12	Désertique			
	Tropical sec			
	Tropical humide			

Toutes bandes spectrales confondues, les meilleurs niveaux de détection ont été enregistrés en 2004. Même en milieu désertique il est possible de détecter une ville comme Nouakchott dans le domaine du visible (VIS0.6). La ville est radiométriquement bien différentiée vis-à-vis de son environnement désertique.

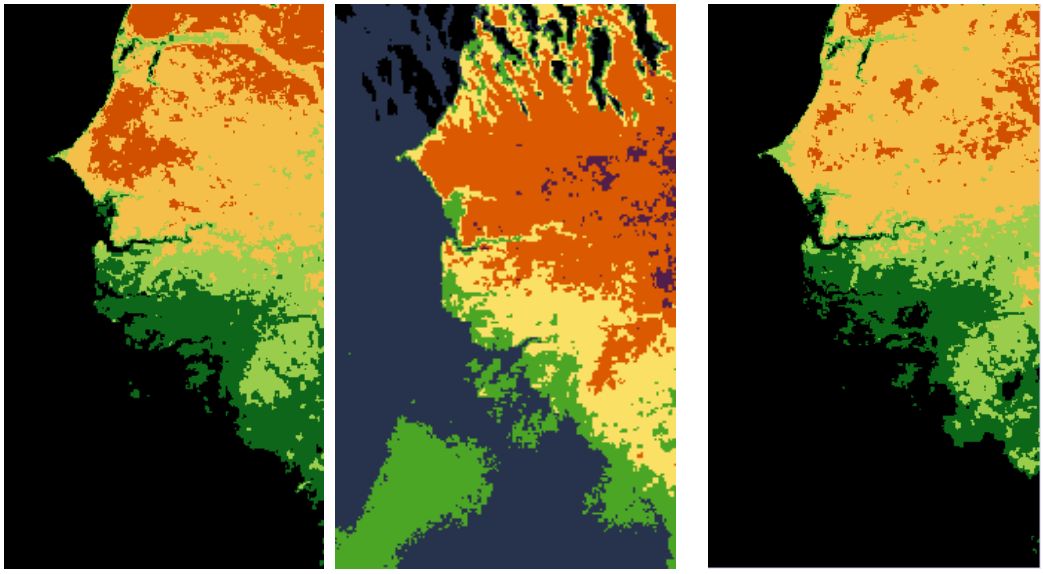
La détection des centres urbains en milieu désertique et tropical sec est liée à leur localisation le long du fleuve Sénégal, en bordure de l'Océan atlantique ou à proximité d'un oued à l'instar d'Aleg en Mauritanie. Les meilleurs niveaux de

détection concernent de fait les villes situées en milieu tropical humide, que l'image soit prise dans le visible, le moyen ou l'infrarouge thermique. Ils sont excellents dans le canal infrarouge moyen IR3.9 et bon dans le canal infrarouge thermique IR12.

La détection des centres urbains en milieu désertique est possible dans le moyen infrarouge (IR3.9) et, selon l'année, dans l'infrarouge thermique (IR12).

La sensibilité du capteur SEVIRI pour la détection des pôles urbains dépend en partie du ratio entre la radiométrie de l'objet urbain et celle de son environnement, ratio qui est plus ou moins marqué selon le niveau de sécheresse (végétalisation) (par exemple, la zone d'extension de la steppe désertique autour de Nouakchott). Les pôles urbains situés le long du fleuve Sénégal ou en zone de mangrove (Guinées) sont bien mieux détectés qu'en zone désertique. La sensibilité à la détection varie annuellement en fonction du niveau de « végétalisation ».

Figure 15 : niveaux de végétalisation en 2004, 2005 et 2006. (zone d'extension du domaine bioclimatique).



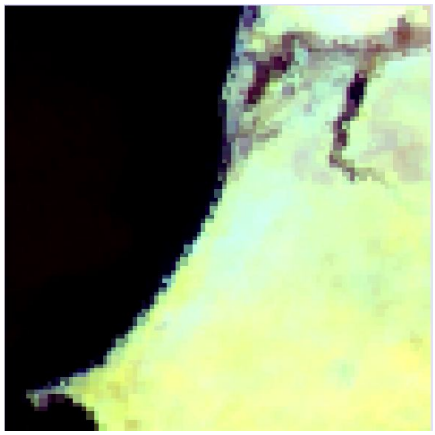
2004 2005 2006

Les niveaux de détection des centres urbains dans le domaine tropical sec sont assez moyens dans le visible, voire nuls selon les années dans l'infrarouge thermique. Ils sont assez moyens à bons dans le moyen infrarouge, faible à moyen dans le visible. Le meilleur niveau de détection des objets urbains est obtenu dans le canal IR39. Sa sensibilité est meilleure que dans l'infrarouge thermique, bande spectrale qui est sensible aux variations interannuelles. La bande spectrale VIS0.6 a une sensibilité constante entre les trois années, mais avec un niveau de détection faible à moyen en milieu tropical sec, voire nul dans le domaine désertique.

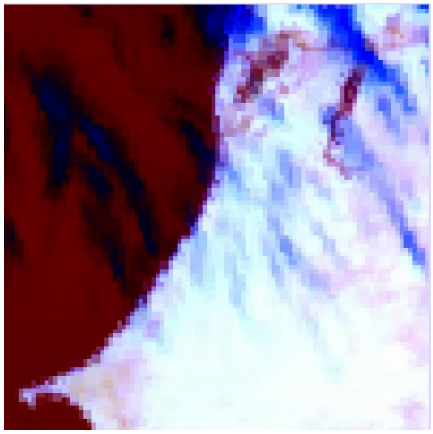
DETECTIONS

Le niveau de détection des centres et conurbations urbaines a été augmenté en fusionnant les bandes VIS0.6, IR3.9 et IR12.

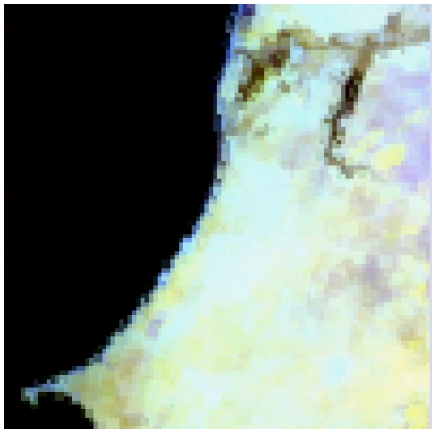
Figure 16 : détection des territoires urbains et des conurbations (Sénégal) en 2004, 2005 et 2006 et des territoires urbains et des conurbations (Gambie, Guinée-Bissau, Guinée Conakry) en 2004, 2005 et 2006.



Fusion VIS0.6, IR3.9, IR12 : 28 janvier 2004

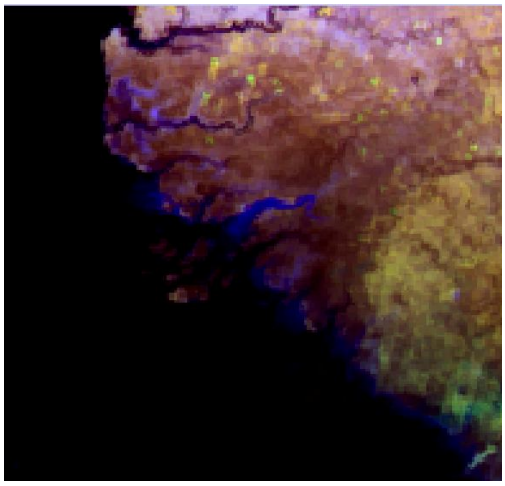


Fusion VIS0.6, IR3.9, IR12 : 28 janvier 2005

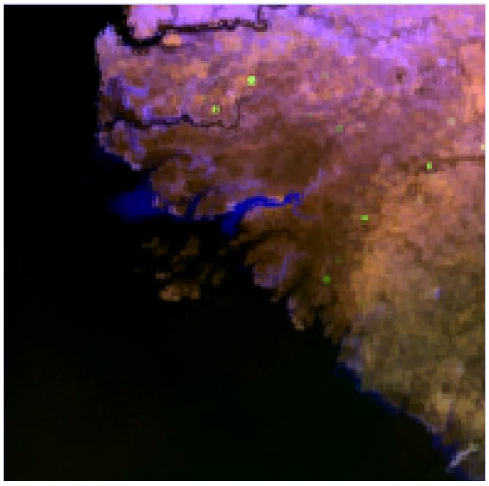


Fusion VIS0.6, IR3.9, IR12 : 28 janvier 2006

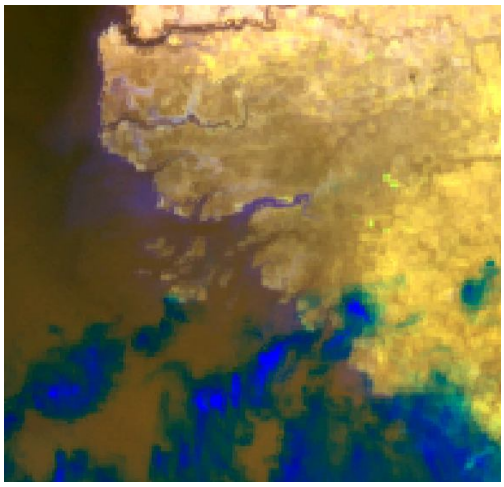
Une fois les trois bandes spectrales fusionnées, les niveaux de détection et de reconnaissance de Dakar et de Saint–Louis du Sénégal sont proches d'une année à l'autre. Le niveau de discrimination entre le fleuve et la ville de Saint-Louis est faible sur l'image de janvier 2005. Les territoires périurbains multipolaires (zones d'extension de Dakar) en direction de la ville de Thiès sont bien identifiés sur les trois images fusionnées.



Fusion VIS0.6, IR3.9, IR12 : 28 janvier 2004



Fusion VIS0.6, IR3.9, IR12 : 28 janvier 2005

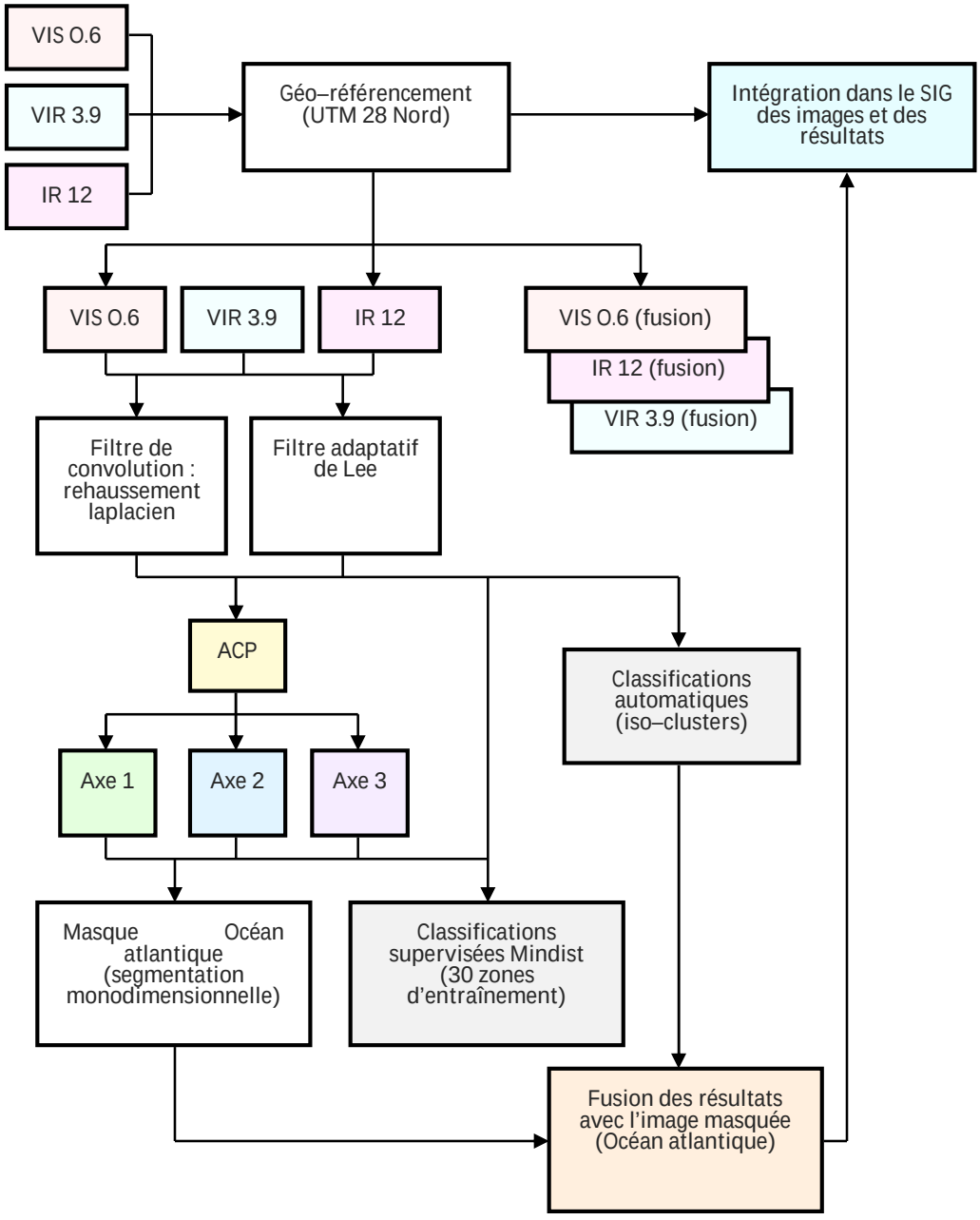


Fusion VIS0.6, IR3.9, IR12 : 28 janvier 2006

Les principaux centres urbains comme Conakry, Bissau, Madino, Caio, Ziguinchor sont parfaitement détectés et reconnus sur les trois années. Banjul est mal reconnue sur l'image fusionnée de 2006. La reconnaissance des pôles urbains secondaires est aléatoire selon les années, à l'exception de villes comme Gaoual, Touba, Caio, qui sont détectées en 2004, 2005 et 2006 (points jaunes). La reconnaissance de ces pôles urbains est liée à des « effets » de sur–détection.

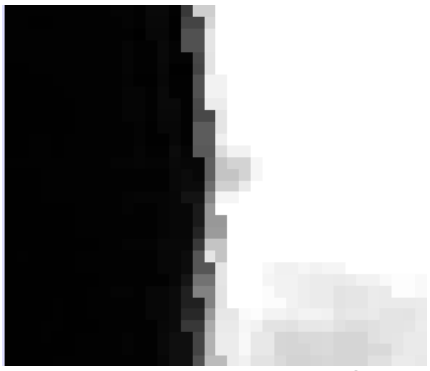
METHODOLOGIE

Figure 17 : organigramme méthodologique.

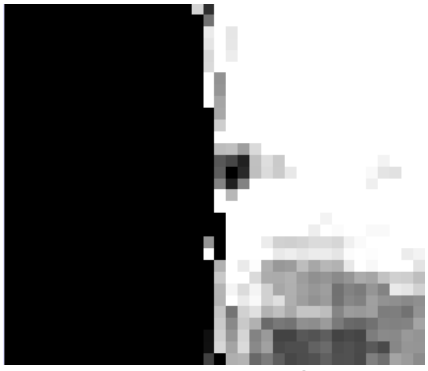


L'apport des filtres de convolution pour la reconnaissance des centres urbains est variable. Appliqués sur les images VIS0.6, les rehaussements laplaciens permettent une meilleure reconnaissance des pôles urbains comme Conakry en milieu tropical humide et de Nouakchott en milieu désertique.

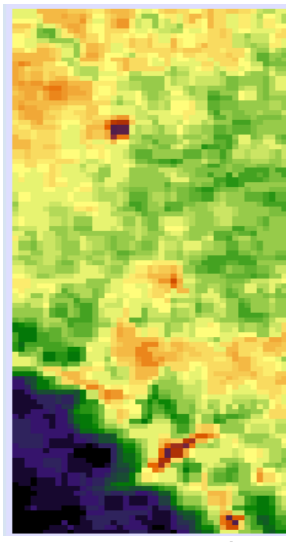
Figure 18 : résultats de filtres sur la détection et la reconnaissance des objets urbains (Nouakchott) (Conakry).



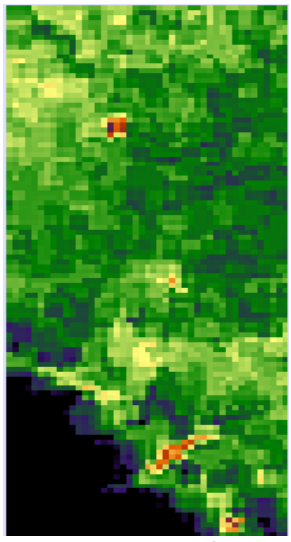
Nouakchott : image non filtrée (2004)



Nouakchott : image filtrée (2004)



Conakry : image non filtrée (2004)



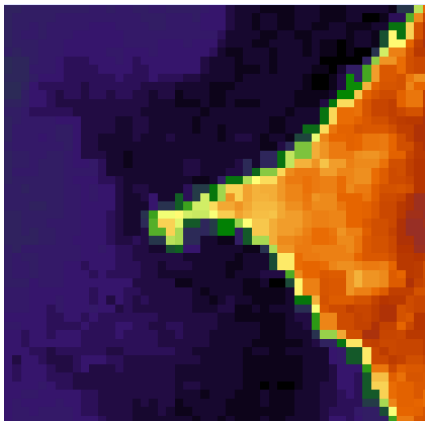
Conakry : image filtrée (2004)

Sur les images IR39, les rehaussements laplaciens permettent une meilleure reconnaissance des pôles urbains secondaires dans les domaines bioclimatiques tropicaux secs et humides.

Les filtres adaptatifs de Lee (Lee, 1980) (Lopez et al., 1990) permettent de bien dissocier Dakar de l'Océan et de son environnement géographique continental. Sur l'image de 2005, les pôles secondaires sont bien identifiés. Les villes de Dakar

et de Conakry sont également bien discriminées, Banjul et Bissau assez moyennement. Ces deux villes, tout comme Dakar et les villes de l'archipel du Cap-Vert sont très discriminées sur l'image IR3.9 filtrée de 2006.

Figure 19 : résultats de filtres sur la détection et la reconnaissance des objets urbains (Dakar).



Dakar : image non filtrée (2006)

Dakar : image filtrée (2006)

L'application sur les images thermiques infrarouges IR12 du filtre adaptatif de Lee augmente le niveau de reconnaissance des villes littorales localisées en milieu tropical humide comme Conakry ou sur les pôles urbains secondaires situés en milieu désertique le long du fleuve Sénégal ou à proximité de l'oasis d'Aleg.

On observe également sur les images filtrées de 2005 et de 2006 une très bonne identification des aires urbaines littorales et d'Aleg (2006).

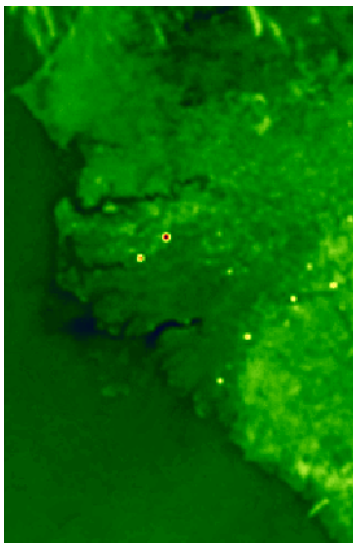
ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Quelle que soit l'une des trois années, les apports obtenus avec les analyses en composantes principales (ACP) effectuées à partir des images filtrées (IR12 « Lee », IR3.9 « Lee », VIS0.6 « laplacien ») sont assez faibles : les néo–canaux des axes 1 des ACP mettent en évidence les principales aires urbaines littorales : Nouakchott (uniquement en 2004), Saint–Louis du Sénégal, Dakar, Banjul, Conakry.

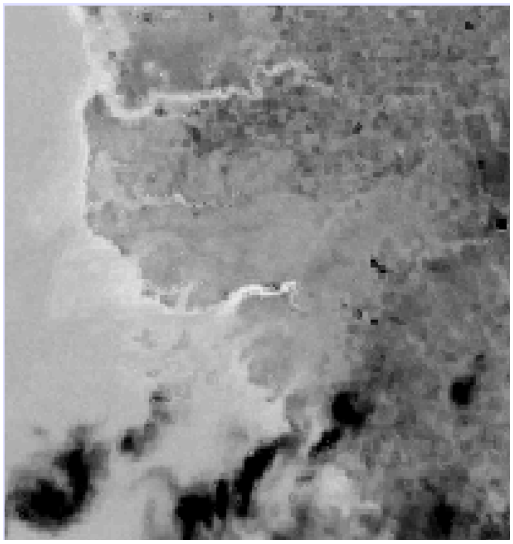
Les villes de Bissau, de Caio et de Ziguinchor sont assez mal reconnues sur le néo–canal 1 de l'ACP de 2005. On identifie un certain nombre de pôles secondaires au Sénégal, en Casamance et en Guinée-Bissau sur l'axe 1 du néo–canal de l'ACP de 2005.

Sur celui obtenu en 2006, toutes les aires urbaines littorales et certaines le long du fleuve Sénégal sont parfaitement reconnues et dissociées radiométriquement de leur environnement géographique.

Figure 20 : identification des pôles secondaires sur les néo–canaux des analyses en composantes principales.



Néo–canal 1 de l'ACP (2005) : identification des pôles urbains secondaires (points rouges et jaunes) : Kolda (rouge) et Tanaf au Nord, l'axe Campeane, Corubal, Beli, Cabuca.



Néo–canal 3 de l'ACP (2006) : identification des pôles secondaires (points noirs) : comme Koundara au nord-ouest. On remarquera que l'image est obstruée par des nuages.

IDENTIFICATION DES POLES URBAINS ET DYNAMIQUES D'URBANISATION

CLASSIFICATIONS

Deux ensembles de procédures ont été testés pour extraire les pôles urbains :

- ✓ Les méthodes de classification supervisée et les méthodes de classification automatique (non supervisée) basées, pour les premières, sur les distances minimales (mindist) (Richard, 1999).
- ✓ Pour les secondes, sur le principe de *Self-Organizing Cluster Analysis* (iso-cluster) (Eastman, 2003).

L'extraction des objets urbains par une ou des séries de segmentations monodimensionnelles a été abandonnée en raison des importantes confusions dans les résultats. Les centres urbains n'ont pas une réponse spectrale spécifique sur les images MétéoSat-8. Leur reconnaissance et leur identification sont dues

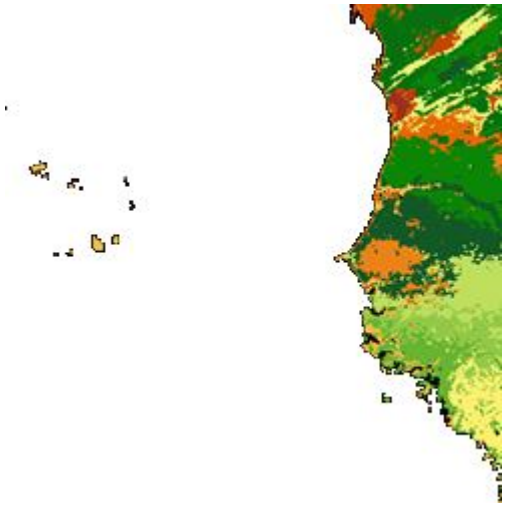
localement à des différences de valeurs radiométriques, valeurs radiométriques qui sont identiques à d'autres objets géographiques non urbains sur les images.

Les résultats obtenus avec les méthodes de classifications supervisées (30 zones d'entraînement) sont identiques, que ce soit à partir des néo–canaux des ACP ou des images filtrées ou non. La trop grande proximité des valeurs radiométriques fait que nous nous retrouvons, par exemple, avec le milieu désertique classé comme Dakar ou selon l'année Nouakchott, etc.

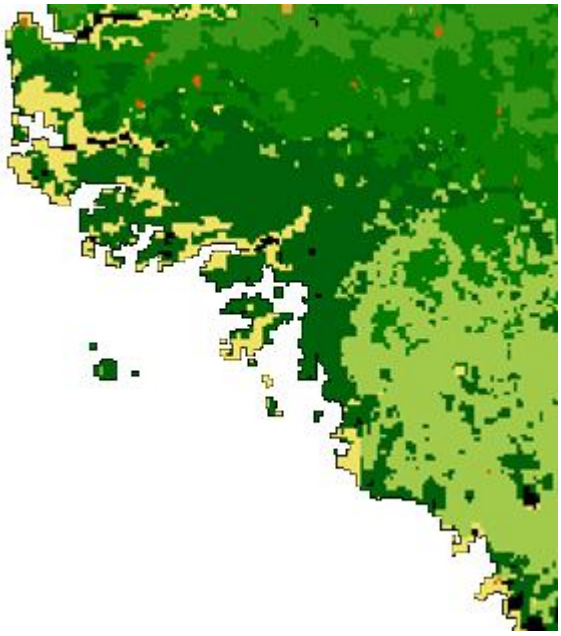
Les classifications non supervisées par iso–clusters appliquées sur les canaux filtrés VIS0.6 IR3.9 et IR12 permettent de reconnaître les principaux centres urbains situés sur la zone littorale et certaines localités secondaires le long du fleuve Sénégal, de l'oasis d'Aleg et dans les hinterlands du Sénégal et de la Guinée-Bissau situés dans le domaine tropical humide.

Certaines villes à l'intérieur du Sénégal sont également reconnues sur la classification de l'année 2004. De nombreuses villes du Cap-Vert sont parfaitement identifiées sur les classifications non supervisées des trois années : 2004, 2005 et 2006.

Figure 21 : classification 2004 : exemple d'identification des pôles secondaires en milieu tropical humide.

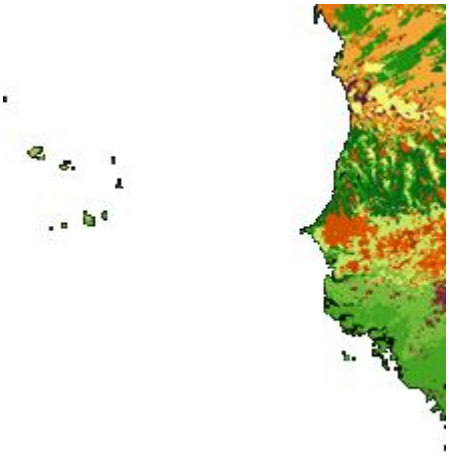


Classification 2004 (iso–clusters)



Pôles urbains secondaires (au nord en orange, en nacré au sud). On distingue bien Conakry au sud (nacré avec points orange)

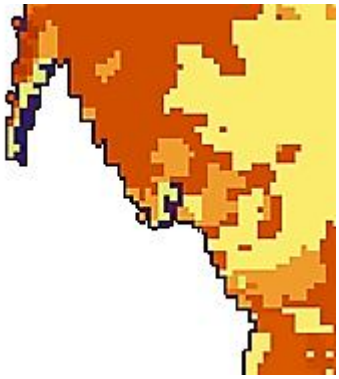
Figure 22 : classification en iso–clusters 2005 : exemple de Dakar, M'Bour-Sally (petite Côte) en milieu tropical sec, Nouakchott et Nouadhibou en milieu désertique.



Classification 2005 (iso-clusters)

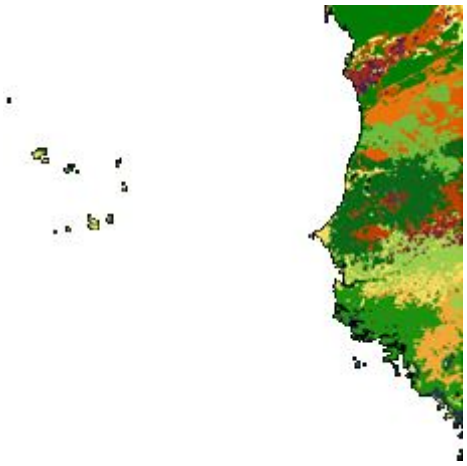
Dakar avec en marron clair sa zone d'extension urbaine (point orange au centre : Thiès). On remarquera la mise en évidence de l'urbanisation le long de la petite côte au sud de Dakar (M'Bour-Sally)

Nouakchott (orange)

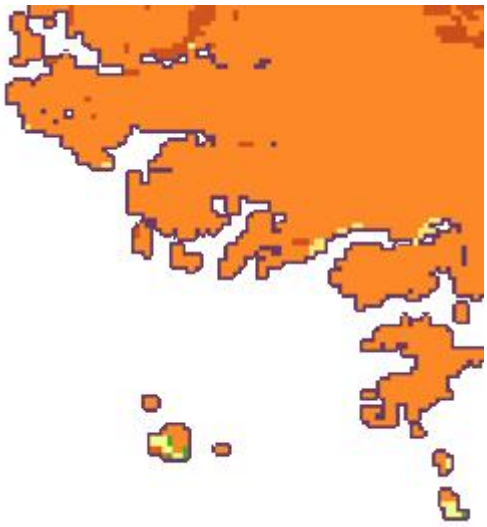


Nouadhibou et sa zone d'extension (bleu au nord de l'image)

Figure 23 : classification en iso–clusters 2006 : exemple de Bissau (milieu tropical humide) et de l'archipel du Cap-Vert (Ile de Santiago).



Classification 2006 (iso–clusters)



Identification de Bissau, de Madino, de pôles urbains secondaires sur le littoral

Archipel du Cap-Vert

Ile de Santiago (Cap-Vert). On identifie au Sud sud ouest la ville de Priai et le long du littoral diverses localités.

Quelle que soit l'année, les méthodes de classification des images par iso–clusters permettent la mise en évidence des mêmes objets urbains sur le littoral ouest–africain (Nouadhibou, Nouakchott, Saint–Louis du Sénégal, Dakar, Banjul, Bissau, Conakry, Praia). Les pôles secondaires situés plus à l'intérieur sont reconnus et identifiés en 2004 et en 2005.

Seuls quelques pôles urbains secondaires sont identifiés sur les trois années comme Tarafal, Midelo (Cap-Vert), Ziguinchor (Sénégal).

Les villes secondaires situées sur le littoral (M'Bour-Sally, Caio, etc.) sont surtout détectées en 2005 et en 2006.

La détection des pôles urbains dépend localement de la différence de radiométrie entre les pixels « urbains » et non « urbains ». Cette différence est accentuée ou diminuée selon les années par le niveau d'humidité et l'extension spatiale de la steppe désertique ou de la savane.

ANALYSE TEMPORELLE ET DYNAMIQUES URBAINES

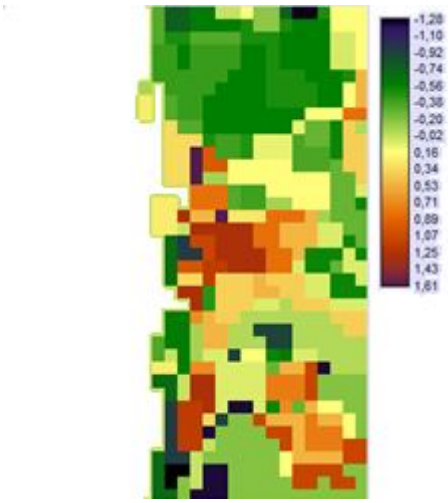
Quel que soit le mode de calcul utilisé, différence entre les images classées, ratio logarithmique, calcul de la déviation standard, sur classifications en iso–clusters 2004/2005 et 2005/2006, on observe des taux et des changements indiquant des valeurs d'intensité de changement d'occupation du sol équivalentes. Les indices des dynamiques de changement d'occupation du sol montrent deux processus urbains et temporels distincts.

Entre 2004 et 2005, on observe de forts ratios (changements) sur les pôles urbains secondaires situés sur le littoral et à l'intérieur du Sénégal et des Guinées Bissau et Conakry.

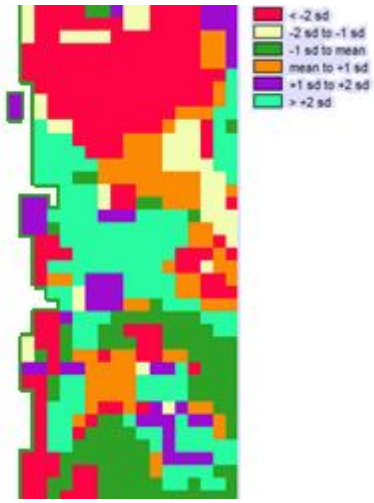
Les indices de changement sur les agglomérations de Dakar, Saint–Louis du Sénégal, Banjul sont faibles (déviation standard proche de 1).

Ils sont plus importants sur les espaces situés à leur périphérie immédiate à l'instar de la zone entre Dakar et Thiès. La ville de Nouakchott est caractérisée par des taux importants de changement (déviation standard supérieure à 2).

Figure 24 : changement d'occupation du sol entre 2004 et 2005, Nouakchott.



Nouakchott (bordeaux, orange), ratio 2005/2004



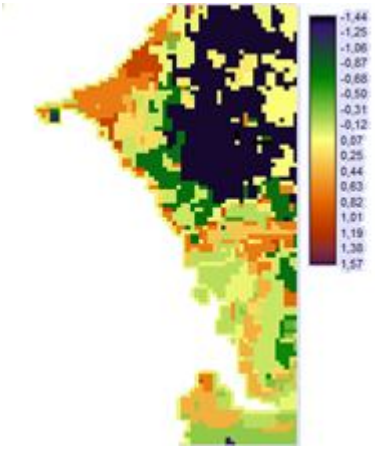
Nouakchott (bleu pâle), déviation standard 2004/2005

Entre 2005 et 2006, les ratios et les indices de déviation standard les plus élevés (> 2) sont localisés sur les agglomérations les plus importantes : Dakar, Banjul,

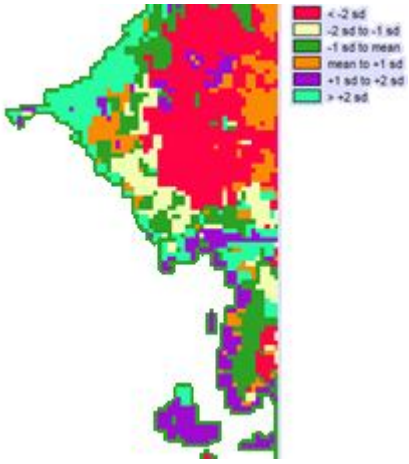
Conakry et leur périphérie immédiate. Les taux de changement calculés sont divers sur les pôles secondaires. Ils peuvent être relativement stables (absence de changement) ou très importants à l'instar de Gaoual en Guinée–Conakry.

Figure 25 : changement d'occupation du sol entre 2005 et 2006, Dakar, petite Côte, Banjul.

Ratio 2005/2004



Déviation standard 2004/2005



INTERETS ET LIMITES DES DONNEES METEOSAT SECONDE GENERATION 8 SEVERI

Les données Météosat-8 ont permis la mise en évidence de la structure urbaine littorale de la sous-région et son évolution entre 2004, 2005 et 2006.

Sur l'année 2004 la plupart des villes sont bien identifiées. Sur l'année 2005, les villes de Nouakchott et Saint–Louis du Sénégal sont moins bien détectées durant la même période saisonnière. Leurs réponses spectrales tendent à se confondre avec leur environnement géographique.

Les pôles urbains secondaires qui connaissent une forte croissance et expansion comme Kolda, Boké, Banjul sont également bien reconnus sur la bande IR3.9. De nouveaux pôles urbains secondaires situés dans le delta du Saloum et le long du fleuve Gambie sont parfaitement identifiés sur les images IR3.9 prises en 2006. Il s'agit des villes de Janneh Kunda et de Pau y Memba. Leur reconnaissance est probablement la résultante de leur forte croissance et de l'expansion spatiale qui en a découlé entre 2005 et 2006 permettant de passer l'effet de seuil de détection introduit par la résolution spatiale du capteur Seviri (9 Km²) et du fort gradient radiométrique qui existe localement entre les objets urbains, les rizières et les zones de mangroves.

2.5.2. SATELLITES D'OBSERVATION DE LA TERRE MOYENNE RESOLUTION : LANDSAT TM/ETM+ ET SPOT 3 XS/SPOT 5 B

NUMERISATION INTERACTIVE

UNE ANALYSE MULTI–ECHELLES DE LA METROPOLISATION

Les images des séries Landsat et Spot, en raison de leur couverture spatiale et de leur résolution spatiale, sont bien adaptées pour analyser la structure des territoires métropolisés ou les dynamiques de métropolisation à l'échelle régionale, urbaine, voire intra–urbaine (Spot 4, Spot 5, Spot 3 panchromatique).

La continuité des programmes Landsat et Spot, respectivement sur presque quarante ans et vingt cinq ans, permet d'avoir la profondeur temporelle nécessaire pour étudier l'émergence des territoires métropolisés notamment dans les pays en développement comme l'Inde ou postcommunistes comme les Pays baltes. Les processus de métropolisation sont des phénomènes relativement récents qui ont moins de trente ans pour ces deux régions en métropolisation.

DEMARCHES PAR ANALYSE VISUELLE

Les démarches par analyse et interprétation visuelle des images de télédétection sont les plus couramment utilisées en télédétection urbaine (Wurm et al., 2009) plus particulièrement dans le cadre des analyses et études en aménagement et en urbanisme. Les taux de reconnaissance et d'identification des objets géographiques urbains comme les bâtiments atteignent 50% à 52% avec les méthodes de classification et de segmentation d'images (Wurm et al., 2009). Le taux d'objets géographiques mal classés et mal reconnus est particulièrement élevé que ce soit avec les images moyenne (Landsat TM, ETM+, Spot 4/5), haute (Ikonos 1/2A, Kompsat-2/3) ou très haute résolution spatiale.

Le taux de mauvaise classification et de segmentation tient à la particularité de l'espace urbain. Sa complexité spatiale et géographique génère une forme d'hétérogénéité spatiale et radiométrique extrêmement marquée qui rend le traitement numérique des données de télédétection complexe. Le traitement mathématique des images de télédétection urbaines nécessite de combiner plusieurs méthodes de calculs, tout en jouant si possible avec plusieurs jeux de données spatiales et aéroportées du fait de :

- ✓ La diversité des objets géographiques.
- ✓ La multiplicité et de l'hétérogénéité des réponses et émittances spectrales.

- ✓ La dissemblance ou à l'inverse de l'homogénéité des tailles et surfaces des objets géographiques urbains.

Elle est renforcée avec les études par télédétection sur la métropolisation en raison de la diversité des structures géographiques et territoriales des espaces métropolisés intégrant les centres urbains, les habitats dispersés, les espaces agricoles, forestiers, etc. Elle nécessite de générer des méthodologies qui traitent séparément des objets urbains, des objets agricoles, etc. ou, à l'inverse, comme dans le cas des méthodologies de classification, l'ensemble du territoire métropolisé.

L'hétérogénéité géographique, spatiale et spectrale des territoires urbains et métropolisés génère des problèmes méthodologiques divers de traitement des images de télédétection selon leur résolution spatiale. L'accent est porté sur l'accentuation du gradient radiométrique pour les images à moyenne et haute résolution spatiale (des filtres passe haut ou morphologiques par exemple), l'objectif étant de composer la résolution spatiale trop grossière par rapport à la taille de nombre d'éléments bâtis. A l'inverse, les images centimétriques permettent de visualiser parfaitement les différents objets géographiques. Cependant, leur trop fine résolution spatiale induit une hétérogénéité des réponses spectrales pour chaque bâti, nécessitant d'harmoniser les valeurs radiométriques formant la « région » (surface) des objets urbains (bâtis, routes, jardins, etc.) (filtres médians par exemple). L'utilisation des opérateurs de convolution passe–haut (images moyenne et haute résolution), médians ou passe–bas (images très haute résolution) ou morphologiques a été privilégiée sur les méthodes de classification par logique floue pour augmenter le niveau de discrimination intra–urbain en raison du plus faible nombre de paramètres à introduire et des temps de calculs. Ils peuvent être particulièrement importants lorsqu'il s'agit de traiter plusieurs dizaines de scènes.

La réduction des mi–classifications peut être traitée de façon simultanée :

- ✓ Par le choix optimum moyen de la résolution spatiale des capteurs pour les applications à l'environnement urbain. Des études menées par le CNES en vue de la définition optimale des résolutions spatiales ont été menées dans les années 2000 (Puissant, 2003).
- ✓ Par le choix des bandes spectrales et le choix de capteurs privilégiant de fait les démarches multi–capteurs (hyper–spectral, TIR, MIR, VNIR, Lidar, Bande X) et multi–fusions. Choix qui a été fait ici à travers le concept intégrateur de SGIMT.
- ✓ Par le développement d'architectures de méthodologies de traitement par blocs dédiés, donnant une architecture systémique et dynamique, chaque bloc de traitement « nourrissant » informationnellement et cognitivement de ses résultats d'autres blocs de traitement mathématique des données de télédétection et géographiques. Choix qui a été également fait dans le cadre des recherches.
- ✓ Par l'intégration et l'interaction des informations et connaissances formalisées géomatiquement pour accroître le niveau de pertinence des

choix dans les analyses, les interprétations et les traitements. Choix d'une approche multi–informationnelle, multi–fusion qui a structuré les méthodologies développées.

- ✓ Par le développement de nouveaux algorithmes de traitement de données, travail en cours avec des mathématiciens et informaticiens (hyper–connectivité, sémantique).
- ✓ Par la participation au développement des nano–capteurs hyper–spectraux et « *full spectraux* » avec la NASA.

Du fait de la complexité des calculs et des taux de mal–classification importants, nombre de professionnels de l'aménagement et de géographes privilégient les analyses et les interprétations visuelles des images en télédétection urbaine pour reconnaître, identifier et extraire les objets géographiques. Ces démarches nécessitent d'avoir une connaissance géographique des objets géographiques à détecter sur l'image, d'avoir une expérience dans l'analyse d'images a priori et une connaissance également préalable du terrain ou de la thématique d'étude. Elles imposent :

- ✓ De savoir à quoi doivent ressembler les objets géographiques (géométrie, texture, couleurs) sur l'image.
- ✓ De faire le lien sémantique entre l'entité ontologique reconnue (l'objet géographique), son identification et sa signification géographique.

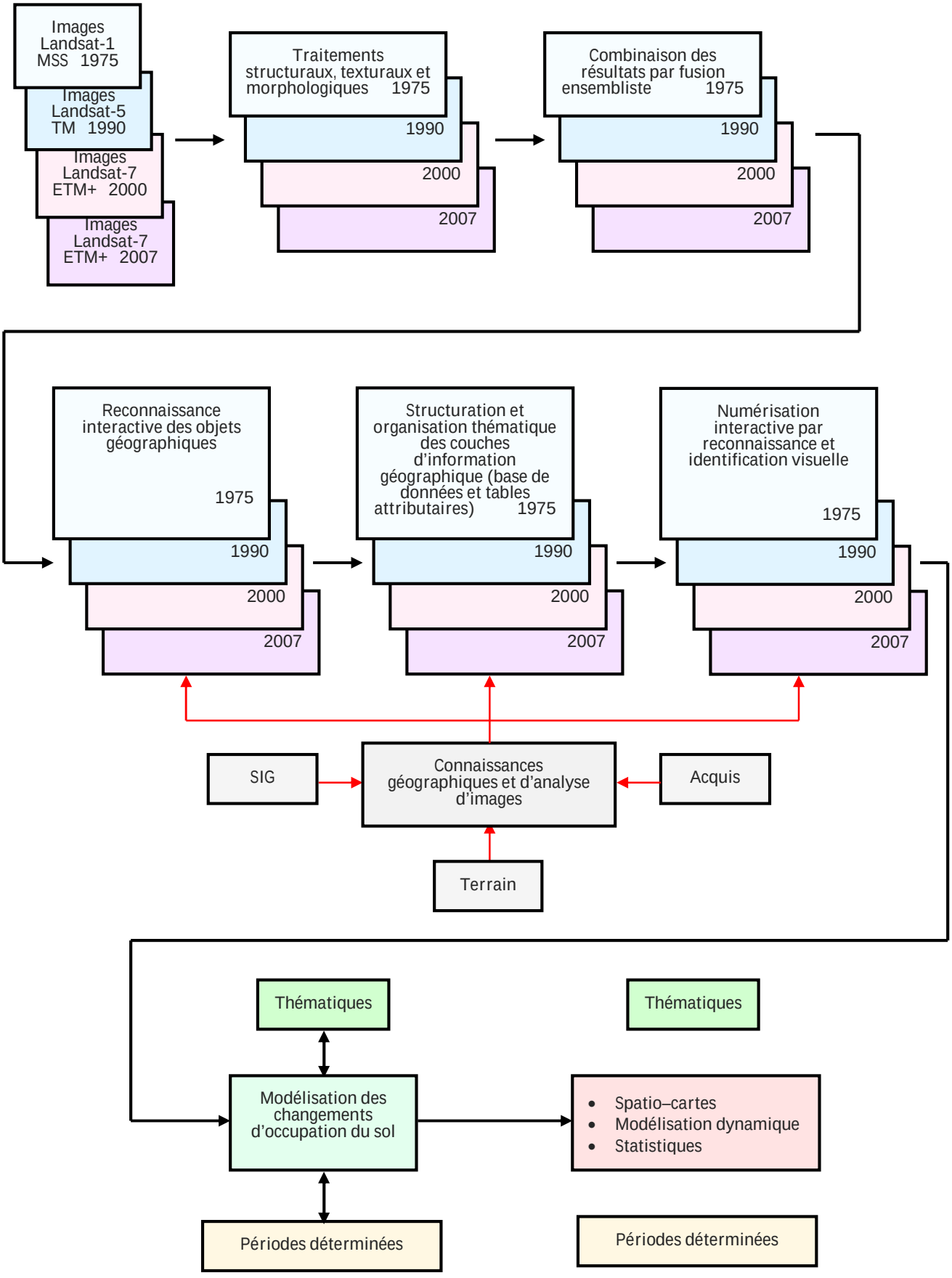
Le manque de connaissances géographiques sur le territoire métropolisé peut être compensé plus ou moins finement et partiellement par l'utilisation de bases de données géographiques préexistantes et d'enquêtes de terrain intégrées en SIG. Le SIG sert de système d'aide à l'analyse et à l'interprétation en palliant l'absence de connaissances sur le territoire étudié.

Figure 26 : reconnaissance et identification des objets géographiques – analyse contextuelle.

Remarque :

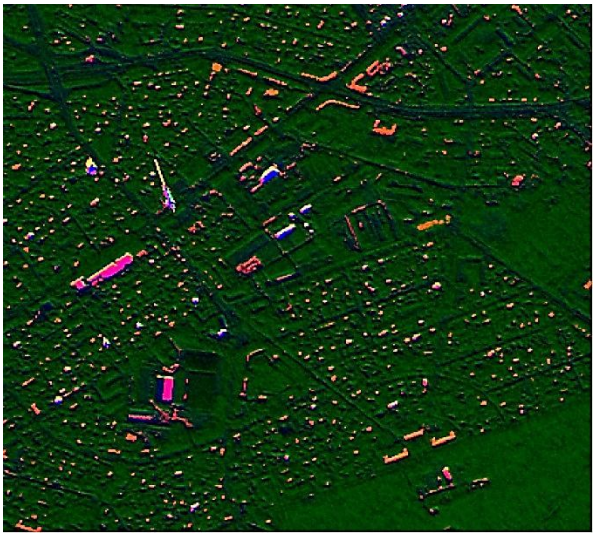
Pour des raisons de pagination (page paire, page impaire) et pour une plus grande facilité d'impression en recto verso (format « paysage »), la figure 26 se trouve à la page 426.

Figure 27 : organigramme méthodologique.



Le niveau de reconnaissance visuelle en analyse d'images peut être sensiblement augmenté en exploitant les caractéristiques texturales et morphologiques des objets géographiques par traitement mathématique des images à l'instar des méthodologies développées sur les données panchromatiques Spot (Gadal, 2001) (Gadal, 2003) (Gadal, 2003). Elles peuvent l'être tout autant en exploitant, en sus des variables texturales et morphologiques, les différentes mesures spectrales caractérisant bio–physiquement les objets géographiques enregistrés avec les capteurs multi–spectraux et hyper–spectraux.

Figure 28 : reconnaissance des bâtiments par traitements structuraux, morphologiques et texturaux.



Reconnaissance et identification des bâtiments (Kaunas, Lituanie, images Kompsat-2) :

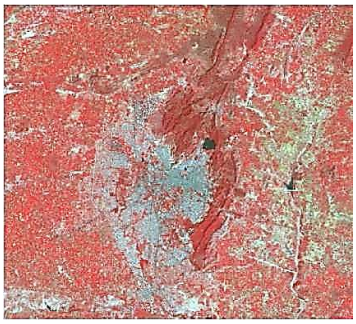
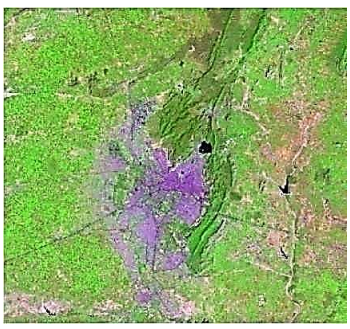
- Rose : béton
- Bleu foncé : aluminium
- Brun : tuile
- Blanc : zinc

Figure 29 : numérisation interactive de la croissance urbaine de Nouadhibou (Mauritanie) entre 1985, 2000 et 2008.

Un des principaux problèmes est le taux d'erreur engendré par les analyses « subjectivitées » d'images dans la reconnaissance, l'identification et la numérisation des objets géographiques. Avec l'introduction de traitements pré–analytiques visant à reconnaître et à identifier les objets urbains, les routes, etc., une grille kilométrique est adjointe sur chaque image de télédétection pour limiter les oublis et les erreurs et systématiser la phase de numérisation interactive.

Le choix des bandes spectrales est déterminant : si les intervalles spectraux permettant de détecter nombre d'entités spatiales et géographiques sont connus ou en cours de constitution avec la création de bases de données spectrales de plusieurs milliers d'objets, les connaissances systématisées sur la « finesse » des résolutions spectrales nécessaires pour dissocier les objets géographiques composant les espaces urbains et métropolisés sont encore balbutiantes. Les images hyper–spectrales permettent, de manière expérimentale, à un moment et dans un contexte géographique donné, d'identifier précisément les intervalles spectraux de détectabilité des objets géographiques.

Figure 30 : reconnaissance de la ville de Jaipur.

Landsat-7 ETM+ (2000) (Jaipur, Inde) Bandes 2/3/4 (composition standard)	Landsat-7 ETM+ (2000) (Jaipur, Inde) Bandes 1/5/7	Landsat-7 ETM+ (2000) (Jaipur, Inde) Bandes 1/4/7
		

Source : Dinh, V., Gadal, S. (2008). Rapport intermédiaire de recherche CITADAIN.

Le meilleur niveau de reconnaissance de l'urbain est obtenu avec l'association des bandes spectrales (transformées par des opérateurs de convolution – filtres et rehaussements Laplaciens) visibles (0.45–0.5 µm) et infrarouges moyens (1.5–1.7 µm) (2.08–2.35 µm) (image centrale). L'adjonction d'une bande spectrale de l'infrarouge proche (bande 4 : 0.76–0.90µm) permet une meilleure discrimination intra–urbaine avec l'indentification du centre historique de Jaipur (violet foncé) et des principaux axes routiers de communication malgré une

moindre reconnaissance des limites de l'agglomération par rapport à l'association des intervalles spectraux 1/5/7.

La méthodologie mise en place a été testée sur les trois terrains d'étude : la Baltique, l'Afrique de l'ouest et l'Inde du nord-ouest. Les résultats diffèrent peu, ce qui en fait une démarche robuste et reproductible. Cependant, l'application de la chaîne méthodologique est consommatrice de temps. Des différents tests qui ont été faits dans l'application de la méthodologie entre 2007 et 2011 sur plus de quatre cents étudiants de Licence et de Master, les traitements, l'analyse et la numérisation d'une scène prennent environ une dizaine d'heures.

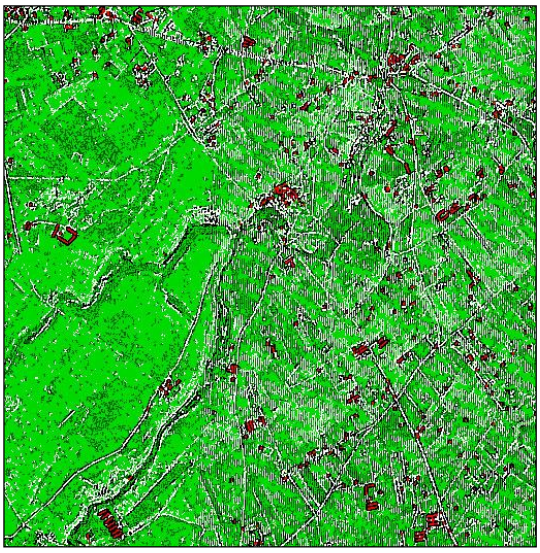
Il est apparu nécessaire de développer des méthodologies automatisés de traitement des images multi–spectrales moyenne résolution Landsat MSS/TM/ETM+ et Spot XS/BI pour diminuer le temps d'analyse devant le nombre d'images à traiter.

RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE DE L'URBAIN PAR CLASSIFICATION

TRAITEMENTS PAR « BLOCS » DE CALCULS ET D'ANALYSES

Les méthodologies automatisées qui ont été développées se sont portées sur l'adaptation de chaînages de calculs développés en doctorat et post–doctorat sur les images panchromatiques utilisant « filtres passe–haut », « fusion par régression linéaire », « transformation morphologique », « classification non supervisée ».

Figure 31 : classification morphologique sur une image panchromatique Spot-3.



En rouge, les bâtiments reconnus et identifiés.

Source : Gadal, S. (2011). Télédétection des territoires métropolisés.

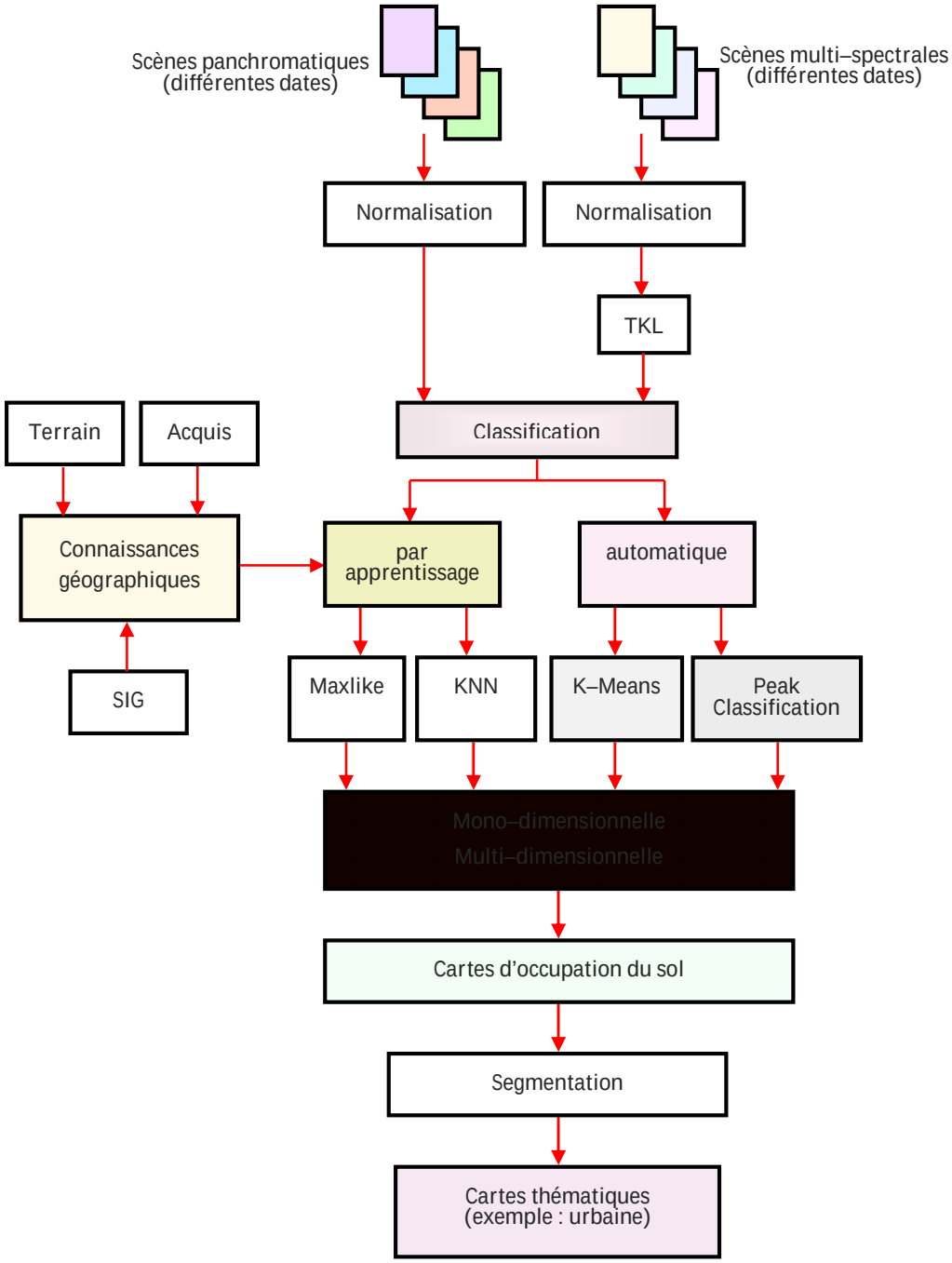
L'utilisation d'images multi–spectrales issues de capteurs différents, prises à des dates et des conditions spatio-temporelles différentes a nécessité d'adjoindre de nouvelles phases de traitements et de tester la robustesse (niveau de variabilité spatio-temporelle) de la méthodologie créée sur :

- ✓ Les trois terrains géoculturels et biophysiques d'étude de la métropolisation.
- ✓ L'ensemble des dates de prises de vues entre 1975 et 2009.

L'adjonction de la dimension temporelle, multi–capteurs et multi–spectrales a conduit à mettre en place de nouveaux « blocs » de traitements qui consistent à :

- ✓ Une normalisation des mesures spectrales inter–dates pour permettre de comparer les mesures et les résultats des traitements et analyses d'images.
- ✓ La sélection des attributs de l'image (mesures radiométriques) par transformée de Karhunen-Loeve (TKL).
- ✓ L'utilisation de méthodes automatiques de classifications multidimensionnelles pour reconnaître et extraire les différentes entités géographiques composant le territoire métropolisé ou en métropolisation.

Figure 32 : organigramme méthodologique.



NORMALISATION DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE

La procédure de normalisation des images satellites prises à différentes dates doit prendre en compte l'état de l'occupation des sols, plus particulièrement de l'état végétatif (Durrieu, Deshayes, 1994). Elle implique de disposer d'images satellites prises dans un même intervalle végétatif, c'est-à-dire, à des périodes similaires. Ce qui est difficile en raison de la relative faible disponibilité d'images satellites Landsat ou Spot prises à des dates similaires sur une période de vingt à quarante ans. De plus, le couvert végétatif tout comme les paysages évoluent, changent, se modifient.

Le second élément à prendre en compte est la géométrie d'observation. L'angle de prise de vue, l'angle incident du soleil et son azimut jouent sur la réflectance. Elle est de nature directionnelle.

Les conditions atmosphériques sont le troisième élément à prendre en compte. Elles vont avoir un impact direct sur la réflectance apparente de l'objet en fonction de la composition de l'atmosphère comme les teneurs en eau. Elles influent sur les niveaux d'absorption et de diffusion donc du niveau et de la qualité des radiométries enregistrées par les capteurs. Les méthodes de corrections atmosphériques sont celles qui font l'objet des travaux de recherche les plus importants.

Pour que les différentes images puissent être comparables, les données doivent être ré–étalonnées. Elles passent donc par une transformation des valeurs (radiométriques codées sur 256 niveaux) de la matrice numérique. Transformation qui s'est faite en deux temps sur le modèle présenté dans « *Précis de télédétection: Traitements numériques d'images de télédétection* » (Collet et al., 2001).

RESTRUCTURATION ATTRIBUTAIRE DES IMAGES PAR TRANSFORMEE DE KARHUNEN-LOEVE

La seconde étape du traitement des images multi–spectrales des séries Spot et Landsat vise en quelque sorte à « filtrer » les images pour en extraire les attributs radiométriques des images jugés mathématiquement non représentatifs et à « fusionner » les autres attributs dans une nouvelle image en faisant appel à des méthodes automatiques de calcul. Elle s'appuie sur la transformée de Karhunen-Loeve (TKL), l'analyse en composante principale (ACP). A partir du calcul de la TKL, on reconstruit de nouvelles images, les néo–canaux, émanation « spatialisée » des axes de la TKL. Cette opération mathématique permet une compression de l'information radiométrique des autres bandes spectrales sur un néo–canal (axe 1). Il rassemble en général entre 89% et 98% de l'information radiométrique (en termes de variance). C'est un opérateur de compression de

l'information. L'intérêt d'avoir la possibilité de traiter mathématiquement le néo–canal de l'axe 1 en suivant les mêmes chaînes de traitement que pour les données mono–spectrales. La plus grande « richesse » radiométrique du néo–canal de l'axe 1 permet une meilleure discrimination, reconnaissance et identification des objets géographiques en milieu urbain et métropolisé, c'est-à-dire, caractérisé par une hétérogénéité spatiale et spectrale forte (Small, Balstad-Miller, 1999). L'utilisation du néo–canal de l'axe 1 pour la reconnaissance, l'identification et l'extraction des objets géographiques urbains (et métropolisés) par segmentation (à l'instar des méthodes de classification) permet d'obtenir de meilleurs résultats en raison de la plus grande « richesse » radiométrique contenue dans l'image et de l'étalement dynamique de variance. Le gradient radiométrique est plus « fin » et important.

L'exploitation informationnelle des autres néo–canaux, comportant une information « résiduelle », a toute sa pertinence en géographie urbaine. Ces néo–canaux permettent de mettre facilement en évidence des objets géographiques urbains et métropolisés spécifiques non directement détectables sur les bandes spectrales initiales. Ils peuvent être utilisés individuellement pour extraire des objets géographiques spécifiques, associés à d'autres bandes spectrales ou néo–canaux ou encore être intégrés dans des chaînes de traitement au regard des informations géographiques qu'ils contiennent.

CLASSIFICATIONS MONO ET MULTIDIMENSIONNELLES AUTOMATIQUES ET PAR APPRENTISSAGE

Le troisième « bloc » de traitement d'images consiste à reconnaître et extraire automatiquement les entités spatiales de la portion d'espace géographique étudiée par classification non supervisée. Les classes d'objets sont générées à partir des attributs des pixels (leur valeur). Chaque pixel est classé indépendamment de son voisin, contrairement aux méthodes de segmentation par approche « région » ou par approche « frontière ». L'affectation « pixel par pixel » dans une classe de valeurs proches ou identiques est basée sur des critères de proximité des distances entre vecteurs d'attributs. La segmentation peut être vue comme une opération préalable à la segmentation d'image (Mignot, 1995).

La focalisation des approches par classification non supervisée mono (une image résultante de la TKL par exemple) ou multidimensionnelle (à l'instar de l'ensemble des néo–canaux de la TKL) tient à la nécessité d'automatiser les « blocs » de traitement d'images en vue de chaîner les calculs. Ce choix est contraint par le nombre d'images à traiter : à titre d'exemple, l'analyse des processus de métropolisation sur la région baltique a nécessité trente six scènes Landsat, six scènes Kompsat-2, vingt scènes Ikonos 2A, en sus des photographies aériennes numériques et des images DMSP. Les mille cinq cents kilomètres

séparant Delhi de Mumbai ont nécessité une couverture spatiale et temporelle de quarante quatre scènes Landat, dix scènes Spot, dix scènes Kompsat-2, en sus des images Corona et DMSP.

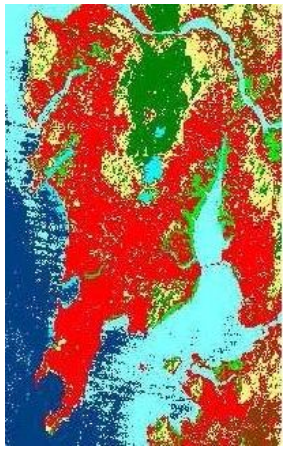
Si elles sont a priori plus pertinentes, les méthodes de classification supervisées (par apprentissage) imposent d'avoir connaissance de la zone d'étude, des lieux, localisations, caractéristiques des objets géographiques à reconnaître. Donc de faire appel à une fonction d'identification, les zones d'entraînement qui sont généralement des polygones ou des marqueurs (Derivaux et al., 2010). Les tests des différents algorithmes de classification par apprentissage disponibles sur les séries d'images Spot et Landsat couvrant le corridor de développement Delhi–Mumbai ont montré que les méthodes KNN (*K-nearest neighbor*) (plus proches voisins, avec comme paramètre pour l'ensemble des scènes, K = 45, nombre maximum de zones d'entraînement par classe : 50) et Maxlike (maximum de vraisemblance) étaient les plus performantes.

Figure 33 : classifications (Maxlike-1992-Landsat-5 TM) (KNN-2001-Landsat-7 ETM+), Mumbai, Inde.

Landsat-5 TM (1992)
Composition colorée bandes RVB 432

Landsat-7 ETM + (2001)
Composition colorée bandes RVB 741

Landsat-5 TM (1992)
Classification Maxlike



Landsat-7 ETM + (2001)
Classification KNN

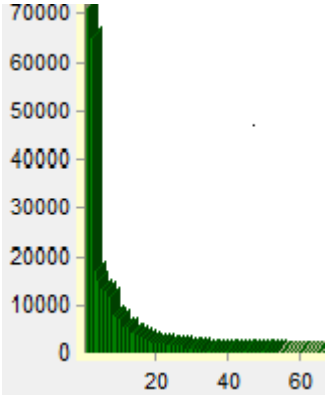
La nécessité d'automatiser, autant que possible les traitements, est liée autant à la masse de données de télédétection à traiter et analyser qu'à des impératifs opérationnels. Elle focalise depuis les recherches géomatiques (télédétection, puis SIG et modélisation spatiale) en DEA (reconnaissance des unités paysagères et tracé automatique de leurs frontières), en doctorat et post–doctorat (méthodes de reconnaissance automatisées et reproductibles des territoires métropolisés au Maghreb et dans le Monde arabe) et depuis 2004 (construction de Système géographiques d'information et de modélisation territoriaux pour analyser les transformations des territoires en métropolisation sur différents espaces géoculturels). La mise en place de méthodologies géomatiques d'analyses robustes et reproductibles à partir de la télédétection pousse à privilégier une double logique :

- ✓ Tester et utiliser des méthodes de traitement algorithmique qui font intervenir au minimum le géomaticien dans les calculs, quitte à induire un taux d'erreur plus important. Méthodes qui sont généralement chaînées.
- ✓ S'appesantir sur les constantes informationnelles, pour l'essentiel la morphologie, la texture et la structure des objets géographiques et les performances des capteurs à produire des données, en n'hésitant pas à les associer, les combiner, les fusionner entre elles et avec des sources externes pour réduire en amont le taux d'erreur.

L'approche par classification automatique (non supervisée) s'inscrit dans cette logique.

Sur l'ensemble des algorithmes testés sur les images satellites, pour l'essentiel des images Spot et Landsat, prises à différentes dates et sur trois espaces géoculturels et bioclimatiques différents, les *peak classification* (segmentation hiérarchisée par ligne de partage des eaux de l'histogramme multidimensionnel) et les *K-means* (nuées dynamiques) présentent les résultats les plus performants et constants. Le nombre de classes est préalablement calculé automatiquement avant le lancement des classifications par ligne de partage « pic–fond de vallée » ou par nuées dynamiques.

Figure 34 : calcul du nombre de classes (répartition statistique).



Les tests menés sur les images Landsat MSS, TM et ETM+ en Afrique de l'ouest, en Inde du nord-ouest et sur les Pays baltes montrent que les classifications par peak (pics) sur les néo–canaux de la TKL permettent de détecter l'ensemble des objets géographiques structurant le territoire métropolisé. Les classifications par nuées dynamiques à partir des images résultantes de la TKL permettent une bonne détection des infrastructures routières, des espaces urbains denses et des espaces végétalisés. Les tests menés montrent que les résultats issus des méthodes de classification par iso–cluster ne sont pas constants dans le temps.

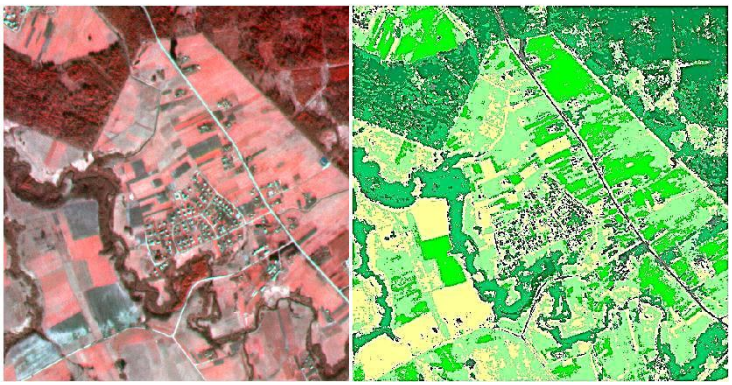
Tableau 6 : résultats du niveau de reconnaissance des objets géographiques.

Dates	Histogram peak–valley classification	K-means (nuées dynamiques)	Iso–cluster (Iterative self-organizing data analysis)
1975 Landsat-1 MSS	- Reconnaissance de 90% des objets géographiques (résolution spatiale / terrain). - Densité des zones urbaines. - Densité des espaces végétalisés.	- Reconnaissance de 85% des objets géographiques (résolution spatiale / terrain). - Reconnaissance des routes.	- Zones végétalisées denses. - Confusions entre les bâtiments et la végétation.
1989 Landsat-5 TM	- Reconnaissance de 91% des objets géographiques (résolution spatiale / terrain). - Discrimination intra–urbaine. - Densité des zones urbaines. - Densité des espaces végétalisés.	- Reconnaissance de 87% des objets géographiques (résolution spatiale / terrain). - Reconnaissance des routes. - Densité des zones urbaines.	✓ Résultats peu significatifs : confusion.
1992 Landsat-5 TM	- Idem 1989. - Très bonne discrimination des espaces forestiers.	✓ Idem 1989.	Résultats peu significatifs.
1999 Landsat-7 ETM+	- Idem 1989. - Très bonne discrimination des espaces forestiers.	✓ Idem 1989.	Résultats peu significatifs : confusion.
2007 Landsat-7 ETM+	✓ Idem 1989.	- Idem 1989. - Très bonne discrimination intra–forestière. - Très bonne discrimination intra–urbaine.	- Infrastructures de communication bien reconnues. - Discrimination des espèces végétales. - Confusion entre les bâtiments et la végétation.

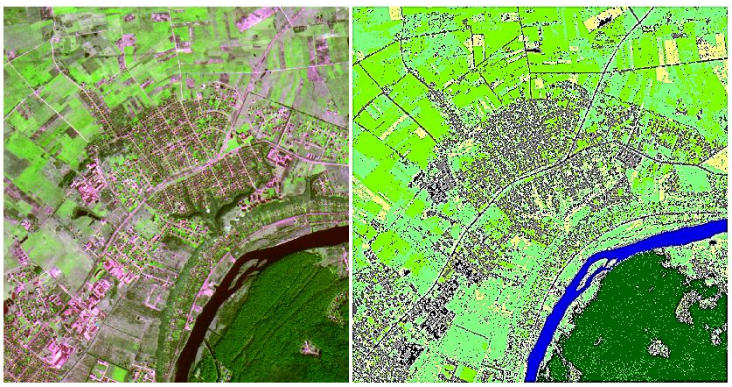
Sources : d'après Dinh, V., Gadal, S. (2007). Transformations de l'espace urbain postsoviétique (Kaunas, Lituanie) : reconnaissance et identification des objets urbains par télédétection très haute résolution. Sun, L., Zhang, W. (2010). L'évolution urbaine de la ville de Kaunas (Lituanie).

Figure 35 : exemples de résultats de classification automatique K–means sur des images multi–spectrales Kompsat-2 (Kaunas, Lituanie).

Composition colorée RVB 234 | Classification Peak Valley



Composition colorée RVB 234 | Classification Peak Valley



Composition colorée RVB 234 | Classification Peak Valley | Classification K–means

2.5.3. SATELLITES D'OBSERVATION DE LA TERRE HAUTE RESOLUTION : KOMPSAT-2

METHODOLOGIES DE RECONNAISSANCE SYNTAXIQUE ET CONSTRUCTION D'UNE BASE DE DONNEES GEOMETRIQUE ORIENTEE OBJET

IMPACTS GEOGRAPHIQUES ET METHODOLOGIQUES DE LA HAUTE ET TRES HAUTE RESOLUTION SPATIALE

La haute et la très haute résolution spatiale permettent d'analyser le niveau élémentaire observable par imagerie spatiale ou aéroportée : le bâti. Il est un des indicateurs géographiques spatio-temporel de la territorialisation et de la transformation des territoires. Sa description permet de mesurer qualitativement à travers son architecture, son inscription territoriale contextuelle au niveau local et intra–urbain, les modes de vie, d'aménagement et d'organisation de l'espace géographique. L'exploitation de la richesse sémantique et informationnelle dans la production de connaissances géographiques reste cependant encore limitée en géographie humaine. Elle tient à la fois à la complexité des méthodologies de traitement et d'analyse à mettre en place avec les images THR. Les surfaces à couvrir qui peuvent être de plusieurs dizaines de kilomètres par les méthodes d'analyses subjectivités (visuelles par photo-interprétation) sont fastidieuses. Elles impliquent, par exemple, de traiter et d'analyser chaque bâtiment.

L'utilisation d'images à haute résolution (1 m²) et très haute résolution (< 50 x 50cm) panchromatiques, multi–spectrales et hyper–spectrales a, en accroissant le niveau de détection et de reconnaissance visuelle des objets géographiques, modifié les approches et méthodes de traitement et d'analyse. Elles tendent à se rapprocher des méthodes de photo–analyse avec l'arrivée d'images centimétriques.

Les méthodes de reconnaissance d'objets basées sur les classifications et les méthodes de segmentations structurales, morphologiques, etc. gardent toute leur

pertinence avec les images haute résolution spatiale comme Ikonos 2A ou Kompsat-2. Elles sont peu efficaces sur les images sub–métriques très haute résolution spatiale. La haute résolution spatiale génère de l'hétérogénéité radiométrique sur les objets géographiques comme les bâtiments, problème qui est généralement partiellement résolu par l'harmonisation locale des valeurs radiométriques à l'aide de filtres médians ou moyens (fenêtre 3x3) ou morphologiques. L'impact d'une moyenne locale ou d'un filtrage par transformation morphologique sur, par exemple un objet bâti, peut être problématique. Ils transforment sur les bordures la géométrie de l'objet, c'est-à-dire, la forme de son contenant.

Dans la logique d'essai d'automatisation des méthodologies d'analyse des images de télédétection, automatisation rendue nécessaire par les surfaces à traiter qui peuvent s'étaler sur des centaines de kilomètres dans le cas de l'étude des processus de métropolisation, le nombre d'objets géographiques à décrire et analyser sur les images HR et THR, une méthodologie de reconnaissance orientée objet et de production de bases de données morpho–métriques objet a été développée. Elle s'appuie sur les méthodologies de reconnaissance symbolique intermédiaire (RSI) mises en œuvre en doctorat (Gadal, 2001) (Gadal, 2003).

APPROCHE MORPHO–METRIQUE ET ESPACE GEOGRAPHIQUE

La géométrie prise comme un attribut ontologique de l'espace géographique détermine tout autant notre regard sur le territoire qu'il influe sur notre perception des phénomènes géographiques. L'image de télédétection peut être prise comme une extension de notre vision sur l'espace géographique. La perception d'un processus géographique, comme la métropolisation ou l'urbanisation, nous renvoie à celui de la perception géométrique et topologique du territoire, c'est-à-dire, à la mise en évidence des propriétés géométriques des objets géographiques le composant. Elles nous donnent la structure (l'orientation, la symétrie, la convexité, etc.), la géométrie et la physiologie (la métrique, distances euclidiennes et topologiques, forme globale des objets géographiques) de chaque entité géographique. La réflectance spectrale de chaque objet détermine le gradient radiométrique de l'image de télédétection et, par-delà, le gradient de différentiation spatiale de l'espace géographique. Les propriétés géométriques contenues dans l'image de télédétection permettent, outre d'extraire les formes, les structures et les niveaux d'organisation géographique du territoire, de produire une mesure et une connaissance qualitative des phénomènes.

RECONNAISSANCE ET CARACTERISATION SYNTAXIQUE (MORPHO–METRIQUE) OBJET

Les groupes de pixels forment, définissent et caractérisent l'objet géographique. L'objet géographique se définit à ce stade comme un objet sémiologique, un objet géométrique. Il se compose d'une association de réflectances. C'est la valeur moyenne de la somme des réponses spectrales de l'objet géographique qui va donner sa signature spectrale. Cette signature spectrale est marquée par une forte variabilité spatio-temporelle et géographique. La composition spectrale de la lumière réfléchie par les objets provient d'une série d'interactions trop importantes pour qu'elles puissent, seules, déterminer la nature des objets. La réflectance est fonction de nombreux paramètres comme le lieu, la teneur en eau, etc. Elle dépend des conditions du milieu géographique.

Au-delà de leurs caractéristiques spectrales, un deuxième type d'attribut présent dans les données de télédétection peut être employé. Il s'agit des propriétés géométriques de l'image, de la structure et de la texture. Elles caractérisent morphologiquement les entités spatiales composant et organisant le territoire à l'instar des éléments bâtis ou des infrastructures de communication. Ces descripteurs géométriques sont au nombre de trois :

- ✓ la géométrie euclidienne comme le périmètre, l'élongation, la distance, etc.,
- ✓ la topologie avec la compacité, la connexité, etc.,
- ✓ et la combinatoire, l'ensemble de ces attributs géométriques pouvant caractériser un objet géographique.

Si un objet géographique a une seule géométrie (forme), il peut avoir plusieurs réponses spectrales et ses géométries (surface, forme) peuvent varier spatialement et temporellement selon l'intervalle de mesure spectral particulièrement dans l'infrarouge thermique. La variation de la forme des objets détectés dépend de leur niveau d'émittance. Leur surface détectée peut être deux à quatre fois supérieure à ce qu'elle est réellement. Cette contrainte limite l'emploi des méthodes de reconnaissance, de reconstruction syntaxique objet, au visible, proche et moyen infrarouge.

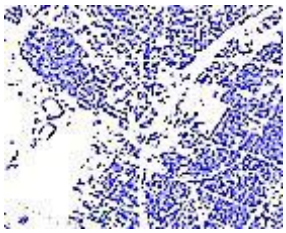
La reconnaissance par objets a été développée en se basant sur les principes de la vision humaine (Gauthier, 1999). Le cerveau humain traite l'information contenue dans l'image de télédétection pour la représenter de façon hiérarchique par association des points de l'image en fonction de leur intensité, de leur couleur, de la texture du voisinage.

L'opération de traitement vise, à partir d'un certain nombre d'informations élémentaires contenues dans l'image de télédétection, à reconstituer des objets géométriques élémentaires qui seront eux-mêmes associés pour former des objets géométriques et sémantiques en l'occurrence, ici, les bâtiments.

Le traitement consiste, en partant de la donnée de télédétection, « *qui est un ensemble de pixels sans relation prononcée entre eux* [...] (à l'exception de leur connexité) [...] *de réduire l'information à un ensemble d'objets de base d'une*

représentation symbolique intermédiaire, [...] » (Gauthier, 1999), l'objet géographique (à l'instar, ici, du bâti). Ces objets, par association et classification, permettent de reconstruire syntaxiquement (attributs géométriques) les objets géographiques.

Figure 36 : création d'une base de données vectorielles du bâti.

Image Spot 5 super–mode panchromatique (Casablanca).	Image fusionnée (à partir d'un rehaussement laplacien 3x3, d'un filtre laplacien 3x3 et d'une transformée de l'image par contraste morphologique.	Spatio–carte vectorielle de chaque objet bâti issu des résultats de l'opération de reconnaissance symbolique intermédiaire.
		

La reconstruction syntaxique des objets utilise les attributs géométriques suivants :

- ✓ Les points de contour (amplitude et orientation, le gradient, la position, etc.).
- ✓ Les chaînes (le nombre de points et la position des points la constituant, attribut indiquant si la chaîne est ouverte, etc.).
- ✓ Les segments de droite (position, longueur, angle, intensité, contraste, dispersion, etc.).
- ✓ Les polygones et les rectangles (surface, position, points de contour, etc.).
- ✓ Les régions, tous les paramètres de forme (les statistiques sur les valeurs intensité, etc.).

La reconnaissance objet et la constitution de la base de données morpho–métrique objet se divise en trois phases de traitement :

- ✓ La génération d'une spatio–cartographie objet vectorielle à partir de la segmentation structurale d'une image de télédétection prétraitée.
- ✓ Création automatisée d'une base de données morpho–métrique pour chaque objet géographique reconnu et extrait. Base de données morpho–métrique attributaire (syntaxique) qui intègre quarante mesures géométriques et statistiques sur chaque objet géographique (permettant de fait de le caractériser individuellement) : radiométrie, texture, compacité, connexité, vide, surface, nombre d'arêtes, étirement, etc. que l'on peut classer en cinq catégories :

- les régions (coordonnées, aire, forme, texture, couleur).
- les lignes (coordonnées, longueur, orientation, contraste, couleur).
- les polygones (coordonnées, aire, périmètre, couleur).
- les points de contour (coordonnées, orientation, intensité, couleur).
- les rectangles (coordonnées, aires, couleur).

✓ Le traitement par classification ascendante hiérarchique, analyse uni–variée, etc. de la base de données.

APPLICATION A L'EXTRACTION ET A LA CARACTERISATION DU BATI

La méthodologie développée reprend deux « blocs » de traitements développés avec les images multi–spectrales Spot et Landsat :

✓ L'application de la transformée de Karhunen-Loeve sur les images multi–spectrales.
✓ Les filtres laplaciens (laplaciens et rehaussements laplaciens), directionnels et morphologiques.

Elle a été testée et calibrée itérativement par retour d'expérience sur différents territoires urbains et métropolisés en Lituanie (Kaunas, Klaïpeda, Vilnius), en Afrique de l'ouest (Mauritanie : Nouadhibou, Nouakchott, Sénégal : Saint-Louis, Dakar, M'Bour-Sally, Cap-Vert : Priai), au Maghreb atlantique (Casablanca), en Egypte (Le Caire), dans le golfe arabo-persique (Koweït) et en Inde (Delhi, Jaipur), à différentes dates et saisons sur les images multi–spectrales Ikonos 1 et 2A, Kompsat-2, Spot 5 et Egypsat-1.

Les exemples ci-dessous montrent les résultats des étapes clés du traitement des images multi–spectrales haute résolution spatiale.

Exemple de Casablanca (Kompsat-2 panchromatique).

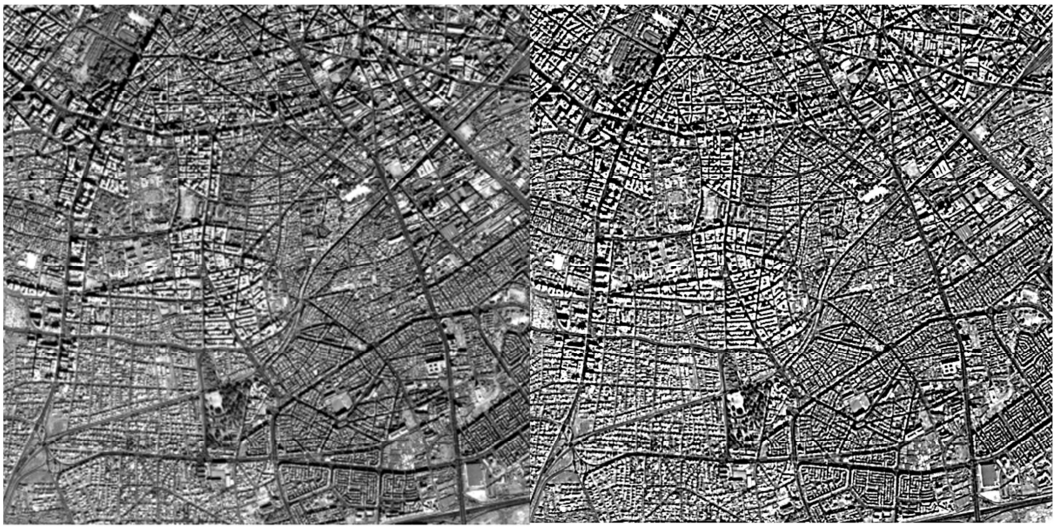
Tableau 7 : caractéristiques des images Kompsat-2.

Bande spectrale	Longueur d'onde	Résolution spatiale
Panchromatique	0,50 – 0,90 µm	1 m²
MS1	0,45 – 0,52 µm	16 m²
MS2	0,52 – 0,60 µm	16 m²
MS3	0,63 – 0,69 µm	16 m²
MS4	0,76 – 0,90 µm	16 m²

Figure 37 : phases de traitement.

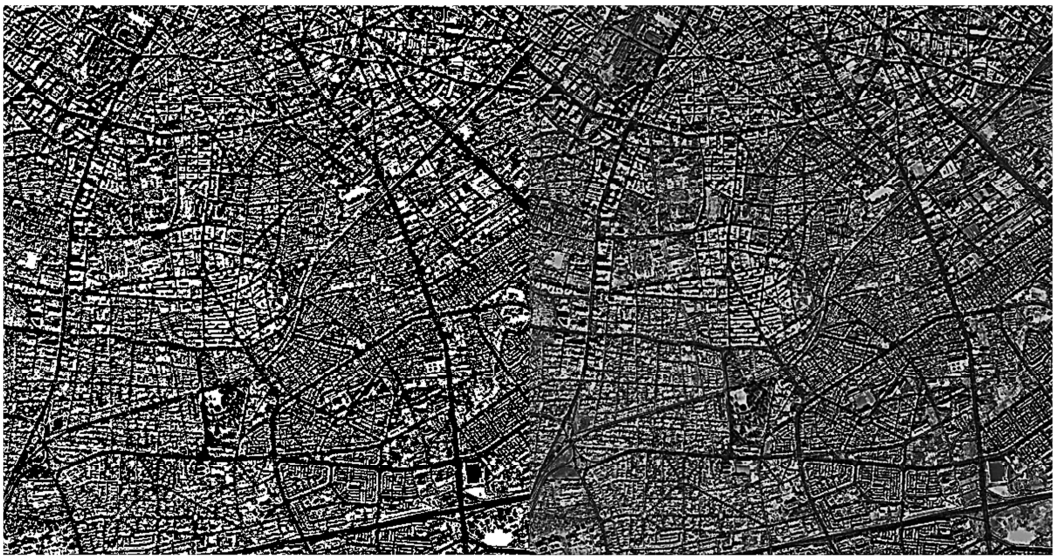
Extrait 1 de l'image Kompsat-2 panchromatique

Rehaussement laplacien (3x3)



Transformation par contraste morphologique

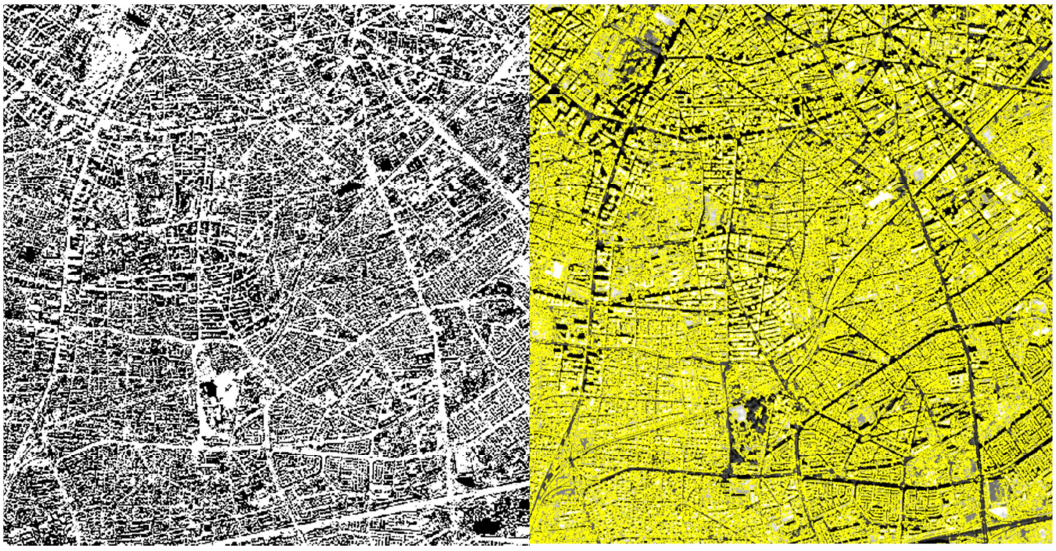
Filtre laplacien (3 x 3)



Segmentation structurale

Spatio–carte vectorielle générée par

RSI



Zoom sur la spatio–carte vectorielle générée par RSI

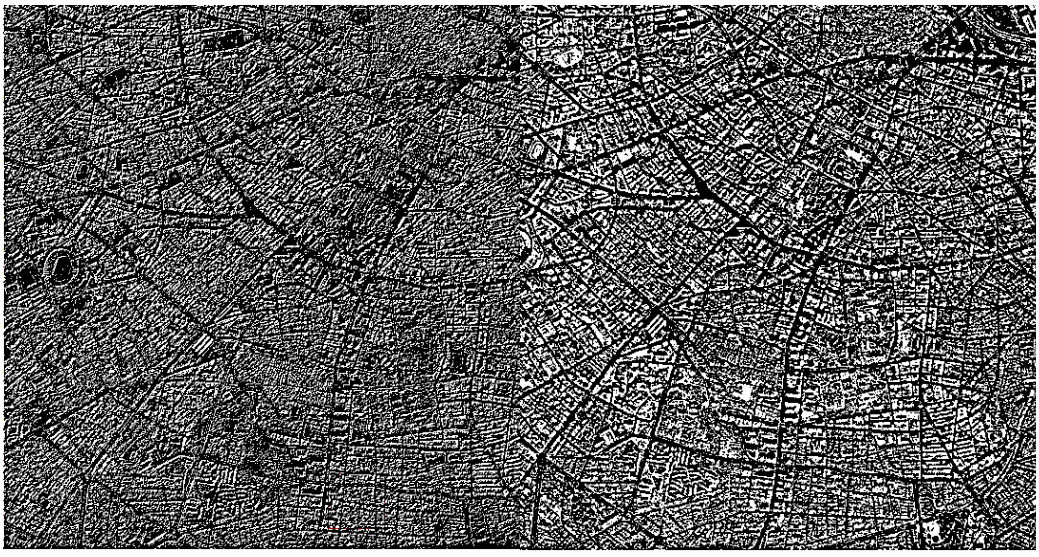
Zoom : classification à partir de la base de données morpho–métrique orientée objet

Extrait 2 de l'image Kompsat-2 panchromatique

Rehaussement laplacien (3x3)

Filtre directionnel (3 x 3) (45°)

Transformation par contraste morphologique



Segmentation structurale

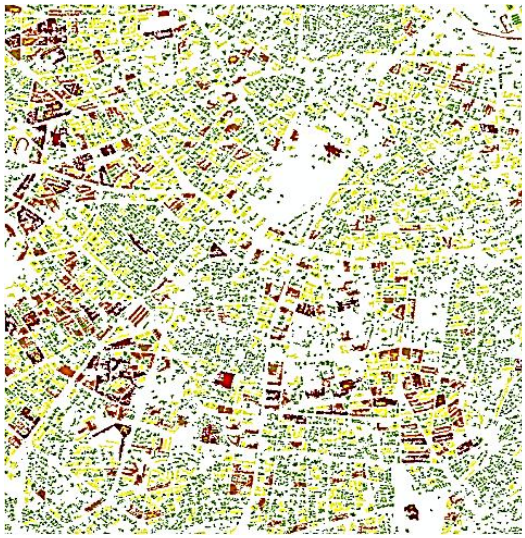
Spatio–carte vectorielle générée par

RSI

Extrait de la base de données attributaire objet de la spatio–carte vectorielle

	PIXEL_COUNT	REGION.EXTENT.LL.X	REGION.EXTENT.LL.Y	REGION.EXTENT.UR.X	REGION.EXTENT.UR.Y
20	1	728	719	728	719
21	3	761	719	761	721
22	5	852	719	853	721
23	1	949	719	949	719
24	1	951	719	951	719
25	1	962	719	962	719
26	2	66	720	67	720
27	6	191	720	194	721
28	4	233	720	235	721
29	4	436	720	438	721
30	1	456	720	456	720
31	1	499	720	499	720
32	11	500	720	505	721
33	3	592	720	593	721
34	4	618	720	621	720
35	7	799	720	803	721
36	1	846	720	846	720
37	1	881	720	881	720

Classification à partir de la base de données morpho–métrique orientée objet



ATTRIBUTS GEOMETRIQUES DOMINANTS

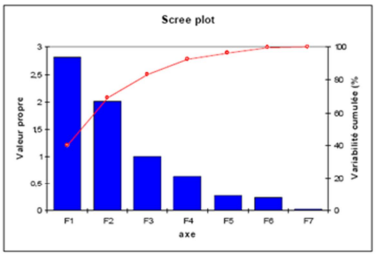
Les traitements par Analyse en composante principale (ACP) (faite à partir de la matrice de corrélation de Bravais-Pearson) des différents attributs morpho–métriques servant à caractériser chaque objet « bâti » montrent que les variables les plus significatives sont la circularité, la compacité, la surface (aire), l'intensité (radiométrique) moyenne. Ils sont les attributs géométriques qui ont la plus forte contribution en termes de variance sur l'axe 1 de l'ACP. Les autres variances apparaissent comme peu significatives. Elles ont une contribution marginale à l'axe 1.

Tableau 8 : extrait de paramètres géométriques et physiques.

Variables	VEDGE_M	INTENSITY_M	HEDGE_M	ELONGATION	CIRCULARITY	COMPACTNESS	AREA
VEDGE_MEAN	1	0,360	0,765	0,011	0,145	0,131	-0,114
INTENSITY_MEAN	0,360	1	0,357	-0,016	-0,456	-0,442	0,561
HEDGE_MEAN	0,765	0,357	1	-0,001	0,138	0,132	-0,115
ELONGATION	0,011	-0,016	-0,001	1	0,016	0,016	-0,009
CIRCULARITY	0,145	-0,456	0,138	0,016	1	0,980	-0,567
COMPACTNESS	0,131	-0,442	0,132	0,016	0,980	1	-0,547
AREA	-0,114	0,561	-0,115	-0,009	-0,567	-0,547	1

Figure 38 : répartition statistique.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeur propre	2,808	2,014	1,000	0,644	0,280	0,235	0,019
Variabilité (%)	40,114	28,767	14,281	9,201	4,004	3,354	0,278
% cumulé	40,114	68,881	83,163	92,364	96,368	99,722	100,000



	F1
VEDGE_MEAN	0,101
INTENSITY_MEAN	-0,666
HEDGE_MEAN	0,100
ELONGATION	0,027
CIRCULARITY	0,932
COMPACTNESS	0,922
AREA	-0,791

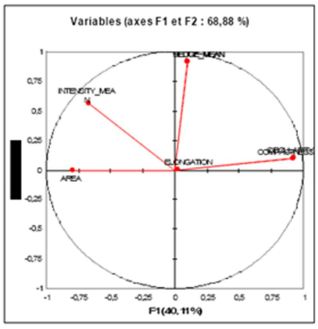
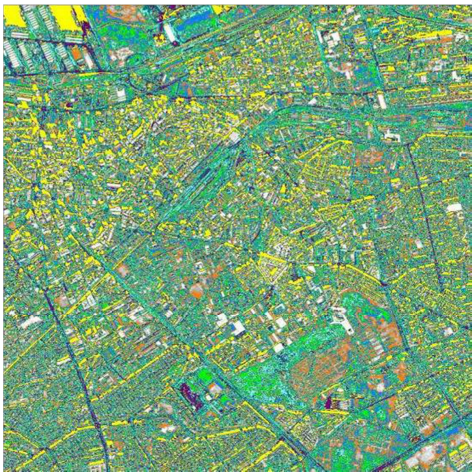
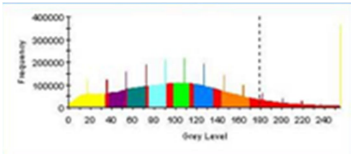


Figure 39 : segmentation interactive (image recodée sur 64 bits).





Exemple de Kaunas (Kompsat-2 multi–spectral)

Les images haute résolution Kompsat-2 couvrent des surfaces de 15x15 km, nécessitant de quatre à huit scènes pour couvrir une agglomération comme Kaunas, seconde ville de la Lituanie avec 350000 habitants. Quatre scènes sont nécessaires pour couvrir le continuum urbain, huit pour prendre en compte la totalité des territoires périurbains.

TKL

Figure 40 : choix des néo–canaux de la TKL : Néo–canaux 2, 3 et 4. Filtrages directionnels et Laplaciens. Fusion.

Néo–canal de l'axe 1 Néo–canal de l'axe 2 Néo–canal de l'axe 3 Néo–canal de l'axe 4

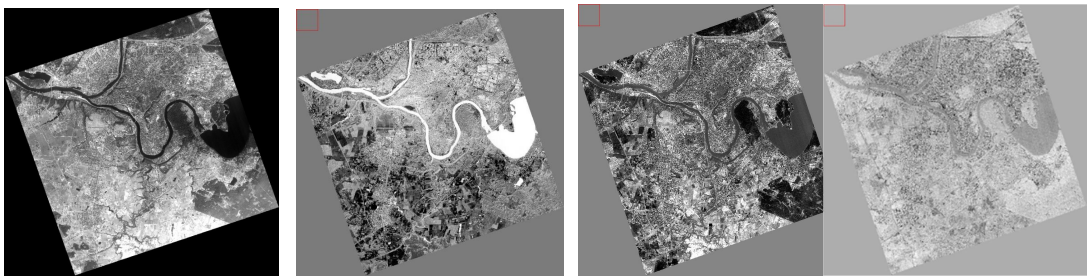
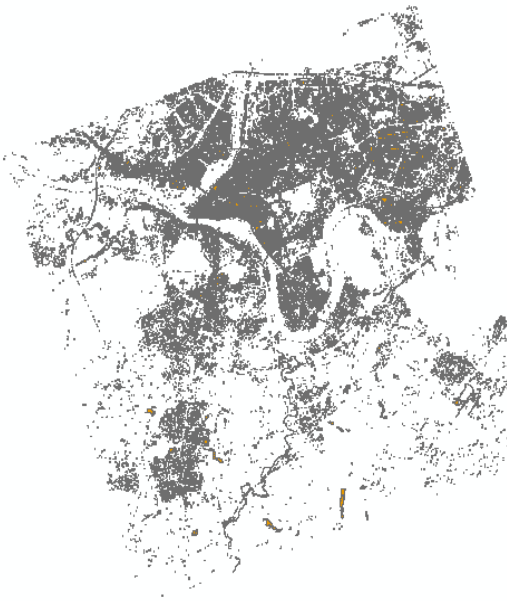


Figure 41 : RSI, génération de la spatio–carte orientée objet vectorielle et de la base de données morpho–métriques orientée objet.

Image résultant de la fusion des filtres directionnels et laplaciens (seuillée)

Spatio–carte vectorielle des bâtiments (image non ébarbulée) (élimination des routes et rivières par transformation morphologique et différence logique)

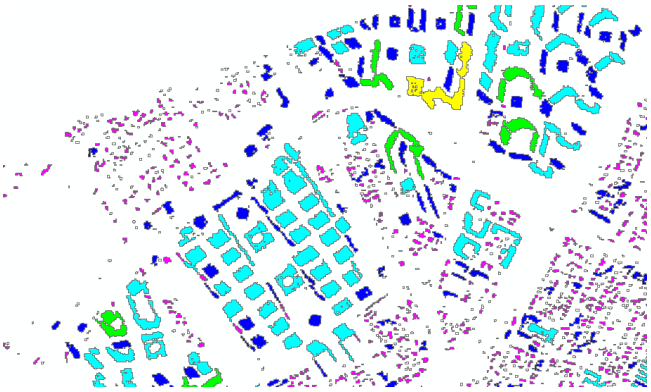


Zoom sur la spatio–carte vectorielle des bâtiments

Génération de la base de données morpho–métrique orientée objet « bâtiments » (après élimination des routes, etc.)

	A	B	C	D	E	F	G
1	INDEX	AREA	BOUNDING_	BR_TO_PERI	CENTROID.X	CENTROID.Y	CIRCULARI
2		1 4.00	1.00	1.00	3588.00	13.00	1.00
3		2 1.00	1.00	1.00	3547.50	41.50	1.00
4		3 11.00	0.44	1.00	3536.77	47.14	0.61
5		4 5.00	0.42	1.00	3595.30	49.10	0.71
6		5 2.00	1.00	1.00	3565.50	49.00	1.00
7		6 5.00	0.63	1.00	3525.10	52.90	0.75
8		7 10.00	0.56	1.11	3590.90	55.20	0.55
9		8 12.00	0.48	1.00	3539.33	57.25	0.72
10		9 3.00	1.00	1.00	3557.50	56.50	0.90
11		10 3.00	0.75	1.00	3577.83	56.83	1.00
12		11 5.00	0.83	1.00	3575.30	59.90	1.00
13		12 2.00	1.00	1.00	3572.00	60.50	1.00
14		13 1.00	1.00	1.00	3583.50	61.50	1.00
15		14 28.00	0.58	1.31	3599.14	63.11	0.35
16		15 2.00	1.00	1.00	3510.00	62.50	1.00
17		16 4.00	1.00	1.00	3521.00	64.00	1.00
18		17 22.00	0.69	1.08	3518.23	69.05	0.64
19		18 3.00	0.75	1.00	3594.17	69.17	1.00
20		19 7.00	0.58	1.00	3507.79	70.21	0.80
21		20 4.00	0.44	1.00	3600.25	70.50	0.78
22		21 1.00	1.00	1.00	3603.50	73.50	1.00
23		22 11.00	0.39	1.00	3559.41	75.86	0.51
24		23 1.00	1.00	1.00	3448.50	79.50	1.00
25		24 1.00	1.00	1.00	3388.50	81.50	1.00

Exemple de classification uni-variée sur le critère de surface : intégration en SIG, classification à partir des attributs morpho-métriques pour chaque objet bâti.



Blanc : éléments bâtis dont la superficie est inférieure ou égale à 32 m²

Magenta : les éléments bâtis dont la superficie est comprise entre 100 et 500 m².

Vert : les éléments bâtis dont la superficie est comprise entre 6000 et 10000 m².

Bleu : les éléments bâtis dont la superficie est comprise entre 500 et 2000 m²

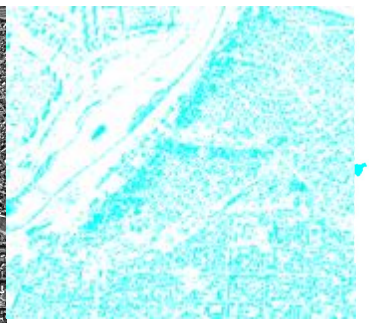
Turquoise : les éléments bâtis dont la superficie est comprise entre 2000 et 6000 m².

Jaune : les éléments bâtis dont la superficie est comprise entre 10000 et 20000m².

Extrait : image fusionnée issue des filtres de convolution laplaciens et morphologiques.

Segmentation structurale

Extraction de la ripisylve et de parcelles de forêts par morphologie mathématique et opération logique.

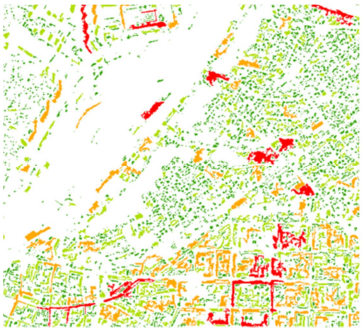


Elimination de la ripisylve

Elimination des tracés délimitant la rivière Neris par morphologie mathématique et différence logique.

Segmentation et génération de la spatio–carte vectorielle des éléments bâtis.

Classification des formes d'objets « bâtis »



EXTRACTION ET ELIMINATION DE LA RIPISYLVE ET DU « TRACE » DE RIVIERE

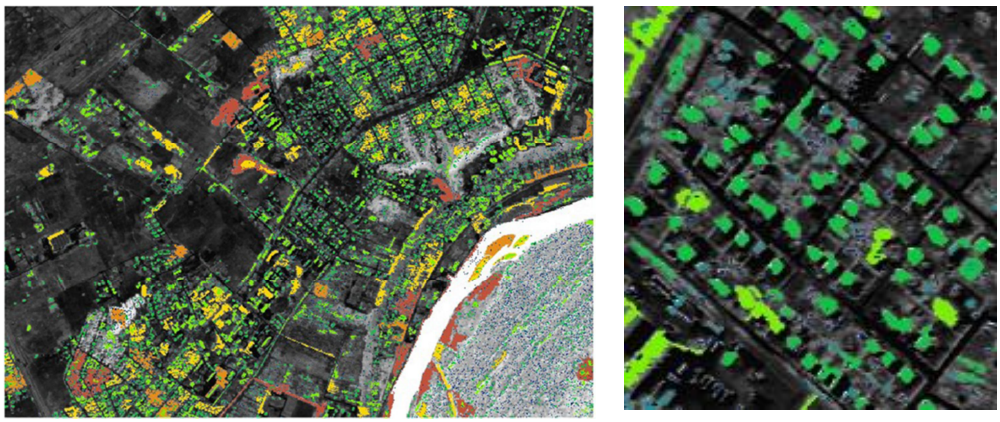
Extraction de la ripisylve et de parcelles de forêts par une fermeture pour « agglomérer » la ripisylve, puis on effectue une ouverture par reconstruction pour éliminer les éléments plus fins. On effectue ensuite des fermetures pour obtenir des objets géographiques bâtis fermés et des ouvertures par reconstruction pour éliminer les entités spatiales « résiduelles ». La forêt est extraite par le calcul de la différence logique entre les deux images.

Le tracé de la rivière est éliminé par dilatation, puis différence logique entre l'image initiale et l'image dilatée (morphologie mathématique).

Cette double opération faisant appel aux transformations de l'image par morphologie mathématique et traitement logique est nécessaire afin d'éviter l'insertion de portions de routes, d'ombres portées (extraction des ombres portées, élimination par ouverture par reconstruction), les sols nus, etc.

Figure 42 : reconnaissance du bâti et confusion.

Exemple de confusion : prise en compte de portions de routes et de sols nus.



EXEMPLE DE KOWEÏT (EGYPTSAT-1 MULTI–SPECTRAL)

La chaîne de traitement utilisée est identique à celle mise en place au Maroc sur Casablanca (images Spot-5 super–mode panchromatique, images panchromatiques et multi–spectrales Kompsat-2), en Lituanie (Kompsat-2, Ikonos 2A), en Inde (Kompsat-2, Spot 5), en Egypte (Ikonos 1A) et en Afrique de l'ouest (Kompsat-2, Spot 5). On note un intérêt d'évaluer la robustesse de la méthodologie sur un autre capteur et dans un autre environnement bioclimatique afin de mesurer la variabilité géographique, spatiale et instrumentale (mesure) de la méthodologie créée.

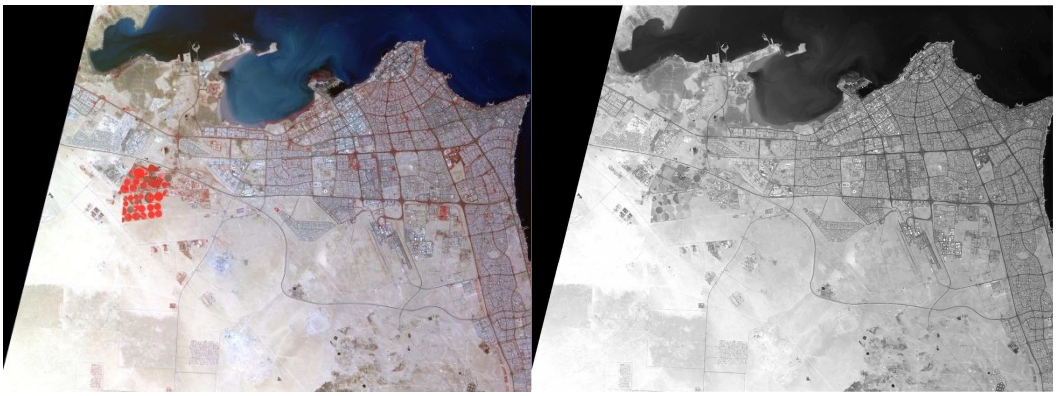
Tableau 9 : caractéristiques du satellite Egyptsat1.

Bande spectrale	Longueur d'onde	Résolution spatiale
MBEI panchromatique	0.50 - 0.89 µm	60,84 m²
MBEI 1	0.50 - 0.59 µm	60,84 m²
MBEI 2	0.61 - 0.68 µm	60,84 m²
MBEI 3	0.79 - 0.89 µm	60,84 m² (7,8x7,8m)
IREI	1.55 - 1.7 µm	1794 m² (39x46 m)

Figure 43 : analyse des résultats issus de la TKL.

Extrait de la composition colorée (infrarouge proche, vert, rouge)

Transformée de Karhunen–Loeve (néo–canal de l'axe 1) : discrimination de l'urbain



Transformée de Karhunen-Loeve (néo–canal de l'axe 2) : mise en évidence de la végétation (haute fréquence en blanc)

Transformée de Karhunen-Loeve (néo–canal de l'axe 3) : mise en évidence de la végétation (basse fréquence, en noir)

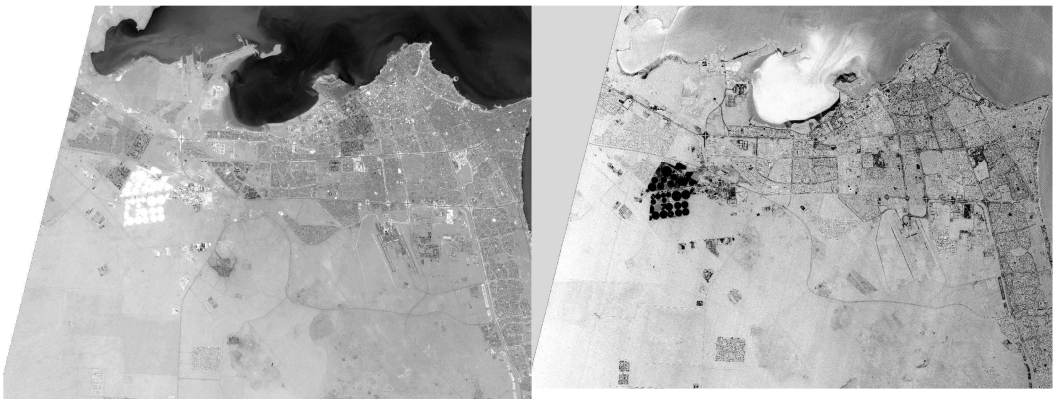


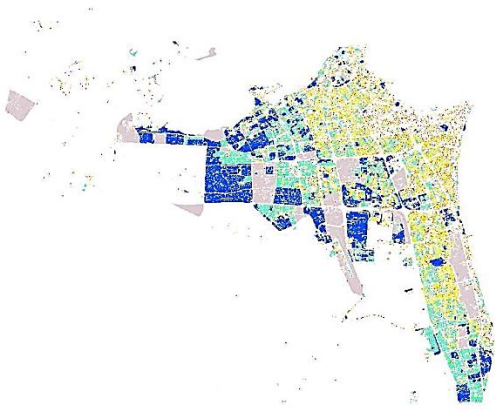
Image résultant de la fusion des filtres de convolution et morphologique

Extraction par segmentation structurale des espaces végétalisés

(filtres directionnels, rehaussement laplacien, contraste morphologique)

Extraction par segmentation du réseau viaire

Classification morphologique des objets « bâtiments » à partir de la base de données morpho–métriques



RECONSTRUCTION VOLUMIQUE ET GEO–VISUALISATION 3D

Un des problèmes fréquemment rencontré sur les terrains de recherche africains, indiens et nordiques dans l'analyse des processus d'urbanisation et de métropolisation est la non prise en compte de la troisième dimension et du volume comme éléments de la croissance urbaine. La croissance urbaine, corollaire de l'émergence des processus de métropolisation dans les pays émergents et en développement, n'est pas seulement horizontale. Elle est caractérisée par des processus de densification intra–urbains qui touchent également les pays nordiques postcommunistes, de verticalisation (d'étagement) de l'habitat et des villes avec des sur–constructions plus ou moins légales de nouveaux étages et la construction de buildings.

L'analyse du processus de verticalisation est trop peu étudiée en géographie, rarement en télédétection et en géomatique, alors qu'il existe un nombre

croissant de modèles numériques d'élévation (MNE) qui sont mis progressivement à disposition dans nombre d'agglomérations européennes, des méthodes de construction des MNE « industrialisés » et de reconstruction 3D, ainsi que des capteurs aéroportés optimisés pour produire des MNE urbains à des résolutions métriques et centimétriques : les Lidar (Light Detection And Ranging) et les RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) centimétriques en bandes X et Ku comme RAMSES (Radar Aéroporté Multi–Spectral d'Étude des Signatures).

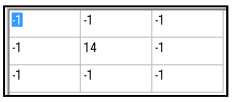
Une méthodologie de reconstruction volumique 3D a été expérimentée sur des images haute résolution panchromatique Kompsat-2 en Lituanie sur Kaunas en prenant en compte l'angle de prise de vue du capteur, l'azimut et l'ombre portée générée par les bâtiments. Ombre portée à partir de laquelle va être estimée la hauteur des bâtiments.

Image filtre directionnel (2) * image filtre directionnel (3) => reconstruction 2D/3D => carte 2D/3D des bâtiments => filtre rehaussement Laplacien => filtre passe-haut de sharpen => carte 2D/3D des bâtiments plus nette.

La méthode de reconstruction 2D/3D des bâtiments a été rendue possible par la combinaison d'un angle de prise de vue, un habitat essentiellement composé de barres d'immeubles espacées ce qui a permis d'extraire avec précision les ombres portées des bâtiments, de calculer leur hauteur et leur volume.

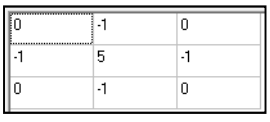
Il est à noter que les images panchromatiques Kompsat-2 offrent une meilleure capacité de restitution 2D/3D que les images panchromatiques Ikonos 2A utilisées sur d'autres villes.

On notera que les images 2D/3D obtenues sont transformées par un filtre de convolution (rehaussement Laplacien) pour améliorer la netteté.



Coefficients de la fenêtre de convolution 3 x 3

L'adjonction d'un filtre passe-haut de Kernel (de type sharpen) avec les coefficients suivants permet de restituer plus finement les détails géométriques (volumiques) des toitures et du réseau routier.



Coefficients de la fenêtre de convolution 3 x 3

En raison de limitations liées à la puissance de calcul, seules quelques parties de l'image panchromatique ont été traitées. Ces calculs ont été opérés à partir des images filtrées directionnelles (2) et (3).

L'image est transformée en prenant en compte trois angles différents : 0°, 45° et 90° avec les coefficients suivants :

Coefficient avec un angle de 0° (1)		
-1.0000	0.0000	10.0000
-1.0000	0.0000	10.0000
-1.0000	0.0000	10.0000

Coefficient avec un angle de 45° (2)		
-5.0000	-5.0000	0.0000
-5.0000	0.0000	5.0000
0.0000	0.7071	5.0000

Coefficient avec un angle de 90° (3)		
-5.0000	-5.0000	-1.0000
0.0000	0.0000	0.0000
1.0000	1.0000	1.0000

Figure 44 : modèle numérique d'élévation et resconstruction volumique.

Modèle numérique d'élévation (MNE)

Zoom (application d'une palette de couleur qualitative)

Reconstruction 2D/3D du volume des bâtiments

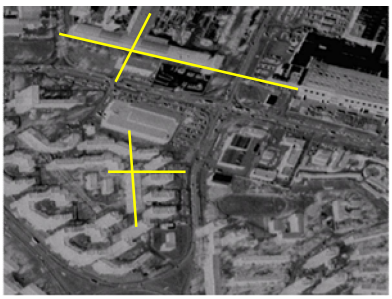
Zoom : Reconstruction 2D/3D du volume des bâtiments

Les phases d'analyse, de traitement et de reconstruction volumique 3D à partir de l'image satellite Kompsat-2 en utilisant un modeleur volumique développé par Dassault Systèmes et destiné à la conception et à la simulation assistées par ordinateur, sont les suivantes :

– Hypothèses
- ✓ Tous les bâtiments sont dans le même plan horizontal.
- ✓ La forme géométrique au sol des bâtiments n'a pas été déformée par la prise de vue.

– Démarche
- ✓ Analyse de l'image :

Figure 45 : image satellite d'une portion de l'espace géographique de Kaunas.

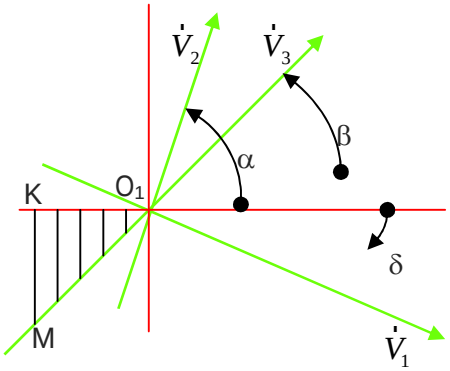


- forme des bâtiments.
- forme de la toiture des bâtiments.
- réseau routier.
- identification des directions de projection, en jaune sur l'image.

- ✓ Repères :
  - choix d'un repère orthonormé direct de référence R, celui proposé par le logiciel.
  - mise en place de repères locaux. Détermination des angles par rapport à R en utilisant les relations trigonométriques.

Figure 46 : exemple de détermination de la valeur des angles.

- ✓ Valeur de l'angle β



On mesure, sur l'image, les distances :

$O_1K = 40$ mm

$KM = 36{,}5$ mm

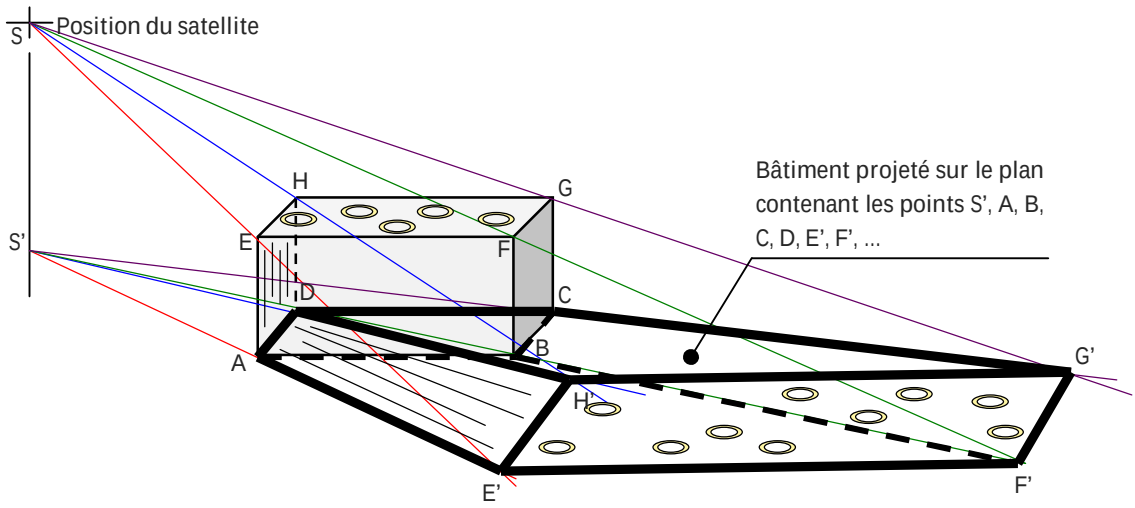
Le triangle O_1KM est rectangle en K d'où la relation trigonométrique :

$$\tan\beta = \frac{KM}{O_1M} = \frac{36{,}5}{40} = 0{,}9125$$

Par suite : $\beta = 42{,}38°$

- ✓ Echelles :
  - au sol : longueur et largeur des bâtiments, largeur des routes. La connaissance du terrain est, dans notre cas, nécessaire afin de connaître les dimensions de base du bâtiment et constitue également un atout.
  - hauteur (élévation) d'un bâtiment. La prise de vue du satellite déforme le bâtiment qui est en fait projeté sur un plan (2D). Voir la figure 47.

Figure 47 : projection d'un bâtiment sur un plan.



On peut envisager les deux solutions suivantes :

- la solution 1 que l'on peut qualifier de géométrique. Il faut connaître les coordonnées spatiales de trois points S, S' et A. S position du satellite, S' projection orthogonale de S sur le sol et A un point du bâtiment. On peut alors appliquer le théorème de Thalés. Les droites (AE) et (SS') sont parallèles, les triangles EAE' et SS'E' sont semblables, ce qui donne :

$$\frac{EA}{SS'} = \frac{E'A}{E'S'} = \frac{EE'}{SE'} \rightarrow AE = \frac{E'A}{E'S'} \times SS'$$

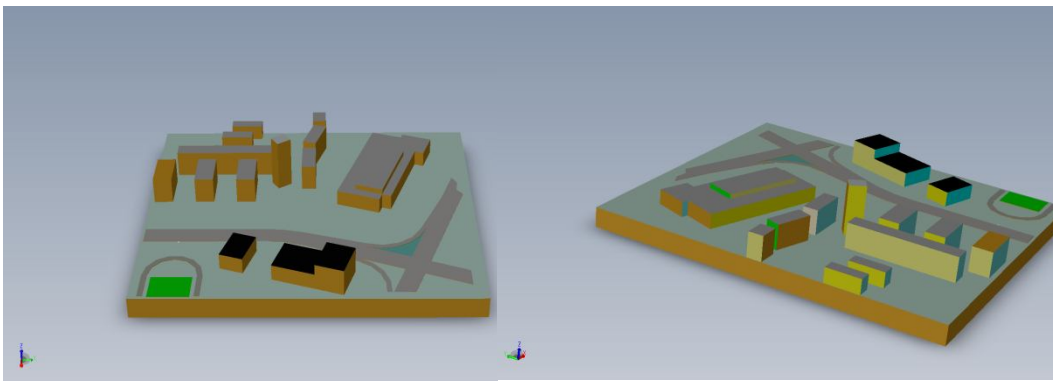
- la solution 2, pratique, rapide mais qui nécessite la connaissance de la hauteur réelle du bâtiment.

– Modélisation 3D

La solution 2 a été choisie en raison de la connaissance du terrain d'où la réalisation de la modélisation, à l'échelle, en utilisant les fonctionnalités du modeleur volumique développé par Dassault Systèmes.

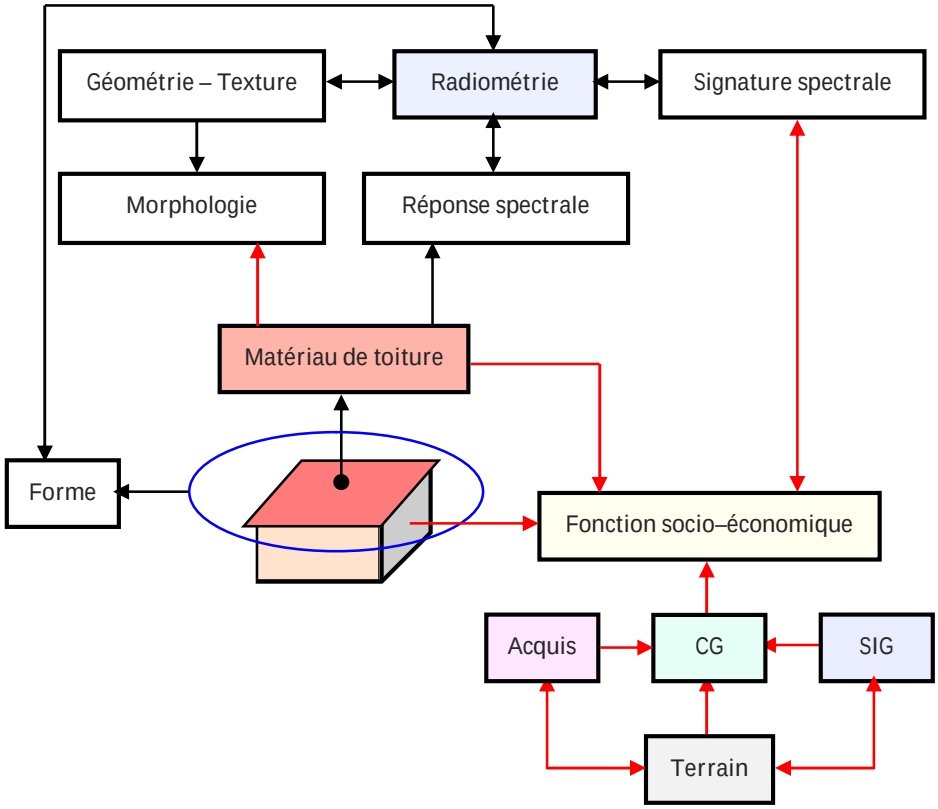
Figure 48 : modélisation volumique d'une portion de la ville de Kaunas.

Reconstruction volumique 3D Reconstruction volumique 3D



L'identification des bâtiments se fait à partir des deux ensembles d'attributs informationnels de l'image de télédétection : sa morphologie et sa signature spectrale. L'adjonction de connaissances géographiques – acquis, terrain, bases de données géo–localisées, formalisées ou non en SIG – permet de faire un lien non univoque entre les caractéristiques ontologiques de l'objet bâti et ses fonctions socio-économiques. Fonctions socio-économiques qui changent dans le temps et qui peuvent être multiples.

Figure 49 : organigramme méthodologique.



Les processus de ségrégation sociaux et spatiaux de métropolisation et les logiques monofonctionnelles et ségrégées d'aménagement des territoires induites par les modèles d'organisation de l'espace communiste, capitaliste ou simplement par les écarts de développement et du niveau de vie des populations au sein d'un même ensemble territorial ont une inscription spatiale et physique sur l'espace. Inscription biophysique, sociale et sociétale qui est mesurée par la télédétection aéroportée et spatiale à différentes échelles, niveaux géographiques et temporalités. La télédétection mesure la biophysique « sociale » des formes de territorialité et de territorialisation. De cette mesure biophysique « sociale »

s'inscrivant dans une dynamique géographique de différenciation spatiale et fonctionnelle, il est possible d'établir les liens entre morphologie, signature spectrale et utilisation socio-économique, militaire, politique et industrielle des objets géographiques comme les bâtiments.

La détection des bâtiments dépend :

- ✓ De la résolution spatiale des capteurs (métrique et sub–métrique avec les images panchromatiques et multi–spectrales). Le niveau de détection des bâtiments est, avec des images hyper–spectrales, d'une résolution au sol de 25m² équivalente à celle d'images panchromatiques métriques (1 m²). Le niveau de sensibilité spectrale et l'adéquation de la signature spectrale avec le matériau de toiture de l'objet permettent une meilleure détection, reconnaissance, identification et extraction des objets bâtis par classification et segmentation structurale aisée.
- ✓ Des intervalles et résolutions spectrales. Les intervalles spectraux les mieux à même de détecter les objets bâtis sont localisés dans la zone « frontière » entre le visible et le proche infrarouge, l'infrarouge moyen et l'infrarouge thermique (nécessité d'avoir des images sub–métriques).
- ✓ Du contexte géographique et de la saison : ils vont influencer sur le niveau de discrimination (gradient radiométrique plus ou moins marqué) entre le bâti (minéral et composite) et l'environnement géographique. Niveau de discrimination exprimé par le gradient radiométrique, caractérisé spatialement par le degré de confusion et de différentiation (spectrale) des objets.

EXPLOITATION DES IMAGES PANCHROMATIQUES (EXEMPLE DES DONNEES KOMPSAT-2)

La chaîne de traitement est identique, exception faite du « bloc » de traitement TKL qui est utilisé uniquement dans le cas des images multi–spectrales. Les images résultant de la fusion des filtres (rehaussement laplacien, filtre laplacien, contraste morphologique) (rehaussement laplacien, filtre directionnel, contraste morphologique) servent de base à la reconnaissance et à l'extraction des objets « bâtiments ». Le gradient « radiométrique » résultant est bien plus marqué et permet, par le biais de classifications monodimensionnelles par segmentation structurale ou par classification automatique (K-means), d'identifier et d'extraire plus facilement les objets « bâtiments ».

Figure 50 : identification et extraction des matériaux de toiture.

Image panchromatique Kompsat-2. Résultat de l'image fusionnée (filtre laplacien, rehaussement laplacien, contraste morphologique)

Segmentation structurale (monodimensionnelle) sur les hautes fréquences de l'image. Extraction des bâtiments : maisons individuelles

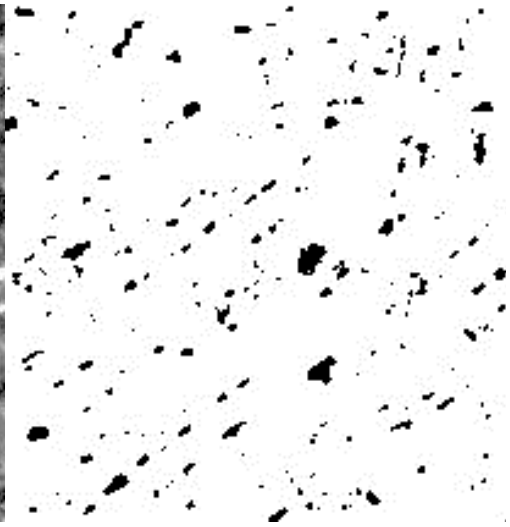


Image panchromatique Kompsat-2. Segmentation structurale : extraction des toitures induites de goudron

Image panchromatique Kompsat-2. Segmentation structurale : extraction des toitures en zinc

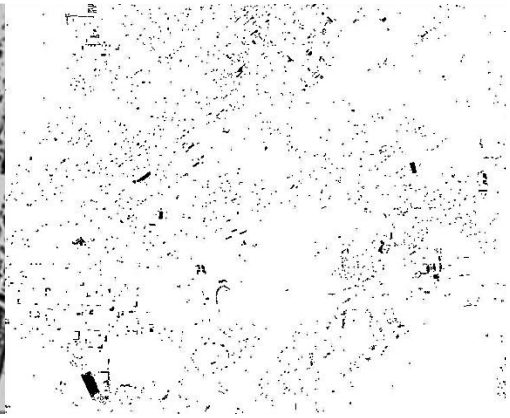
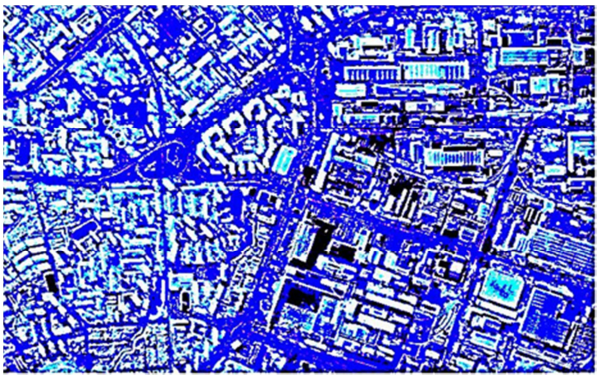


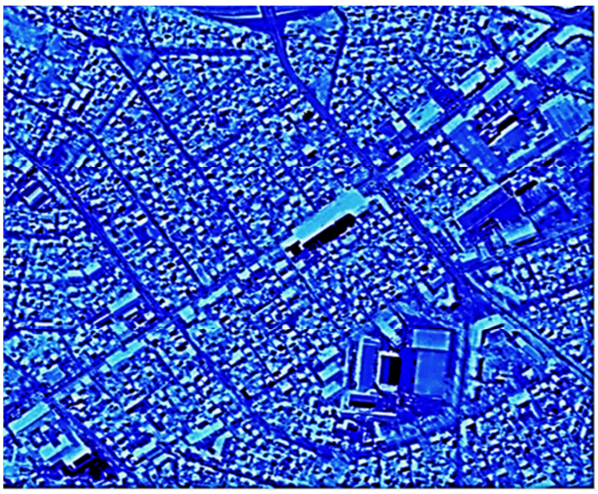
Figure 51 : identification des matériaux de toiture.

Image panchromatique Kompsat-2.

Résultat de l'image fusionnée (filtre laplacien, rehaussement laplacien, contraste morphologique). Classification automatique K-means.



Les parties en noir représentent les toitures en tôle aluminée, celles en bleu, les toitures en aluminium et en jaune–blanc, les toitures en béton enduit de goudron.

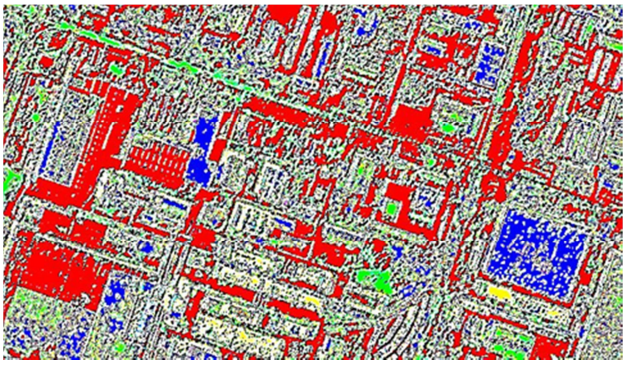


Les parties en noir représentent les toitures en tôle aluminée, celles en bleu, les toitures en aluminium, en jaune–blanc, les toitures en béton enduit de goudron. Les toitures en jaune (maisons), les toitures en amiante.

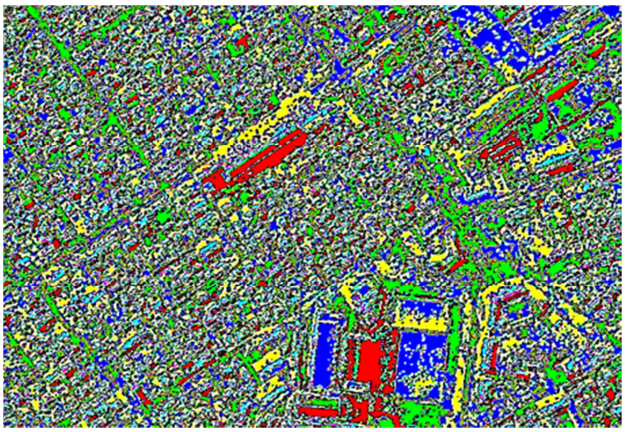
Figure 52 : identification des matériaux de toiture (usines, maisons, immeubles).

Image panchromatique Kompsat-2

Résultat de l'image fusionnée (filtre laplacien, rehaussement laplacien, contraste morphologique) Classification automatique K-means.



Les toitures en aluminium identifiées sont en rouge, les toitures en béton sont codées en bleu. Les éléments verts représentent à la fois la voirie, les sols et les pelouses. En jaune, les toitures de béton enduit de goudron. On observe sur certains toits la présence de végétation.



Les toitures en aluminium identifiées sont en rouge, les toitures en béton sont codées en bleu. Les éléments verts représentent à la fois la voirie, les sols et les pelouses. En jaune, les toitures de béton enduit de goudron. On observe sur certains toits la présence de végétation.

EXPLOITATION DES IMAGES MULTI–SPECTRALES : IDENTIFICATION DU BATI PAR FUSION ENSEMBLISTE (EXEMPLE DES DONNEES KOMPSAT-2)

La chaîne de traitement diffère l'intégration du « bloc » de traitement TKL. La plus grande richesse spectrale des images filtrées résultant de la TKL permet une meilleure et une plus grande reconnaissance des matériaux de toiture des bâtiments. Certaines images sont associées ou fusionnées par transformée ensembliste et classées mono–dimensionnellement.

Figure 53 : identification de toitures en zinc.

Reconnaissance et identification des toitures en zinc (rose–rouge) du centre de Kaunas par transformée ensembliste et classification monodimensionnelle.

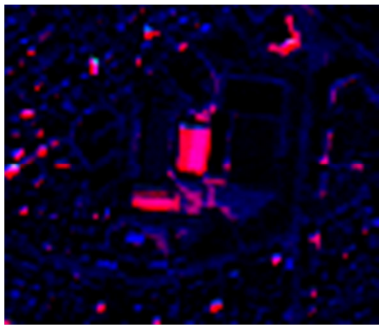


Image témoin (photographie aérienne).

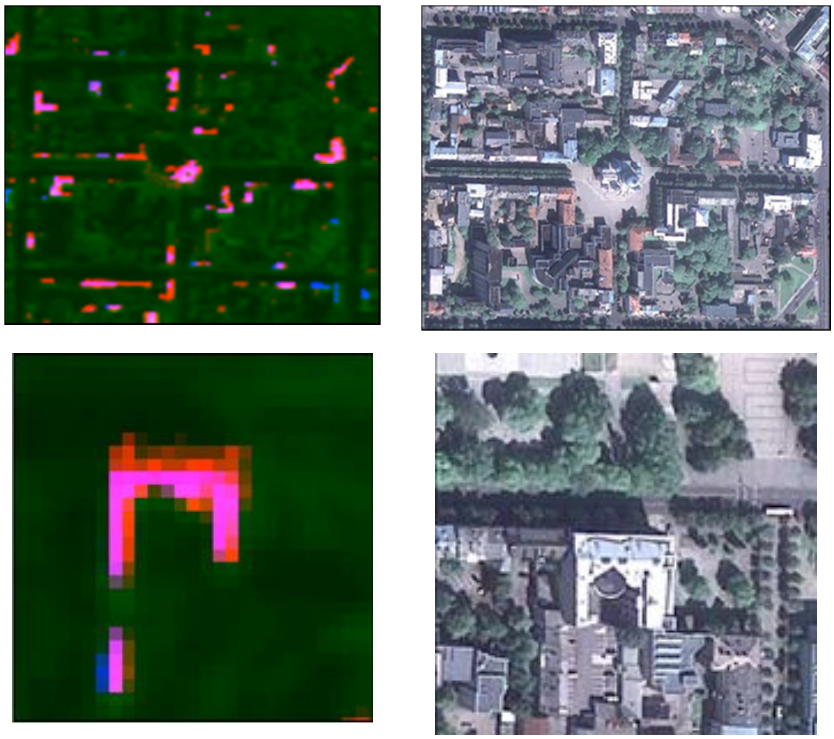
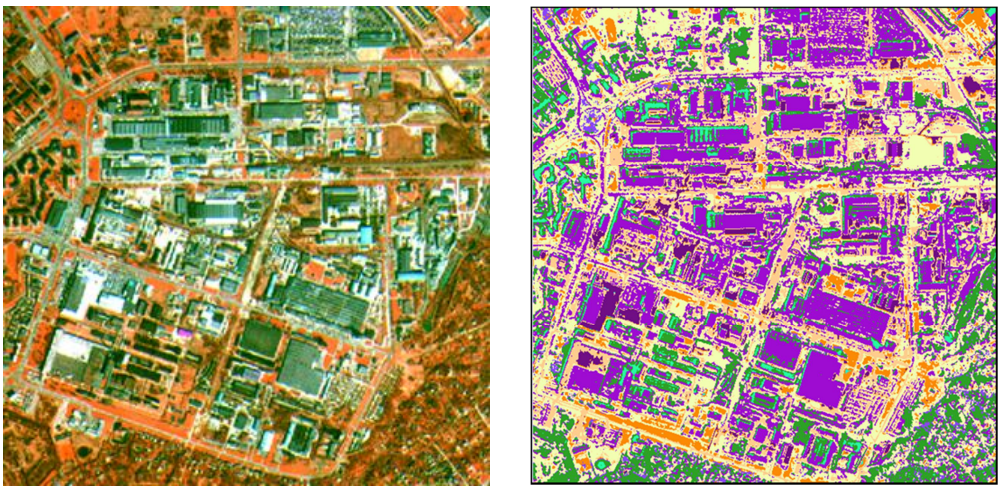


Figure 54 : identification des bâtiments (industriels, enfouis, etc.).

Reconnaissance et identification des toitures et types de bâtis par transformées ensemblistes (association des filtres rehaussement laplacien, laplacien et contraste morphologique).

Reconnaissance et identification des toitures et types de bâtis par classification automatique (K-means).



Reconnaissance et identification des toitures et types de bâtis par transformées ensemblistes (association des filtres rehaussement laplacien, laplacien et contraste morphologique)

Composition colorée Ikonos 2A.

On remarque que la méthodologie basée sur les filtres et les transformées ensemblistes permet de reconnaître des objets non visibles : anciennes structures du fort russe de la fin du 19e siècle, les parkings hélicoptères de la période soviétique, les nouveaux hangars en aluminium (vert), etc.

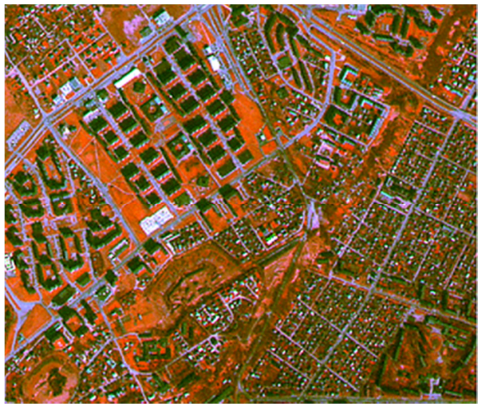


Figure 55 : identification du bâti et du réseau viaire.

Reconnaissance et identification des toitures et types de bâtis par transformées ensemblistes (association des filtres rehaussement laplacien, filtre laplacien et contraste morphologique)

Reconnaissance et identification des toitures et types de bâtis par transformées ensemblistes (association des filtres rehaussement laplacien, filtre directionnel et filtre laplacien)

La reconnaissance de la végétation en milieu urbain ne diffère pas par la chaîne de calcul. Les « blocs » de traitement sont les mêmes à l'exception des coefficients des opérateurs de convolution lors de la phase de filtrage des résultats. Trois opérateurs mathématiques vont être utilisés : les filtres gaussiens (végétation), les filtres minimums (eau), les filtres maximums (urbain, minéral) ou les contrastes morphologiques (bâtiments).

Figure 56 : identification de la végétation urbaine.

Parc forestier de Kaunas (vert olive), stades (vert fluorescent), pelouses (vert clair), herbacés (jaune), parcelles agricoles (bruns)

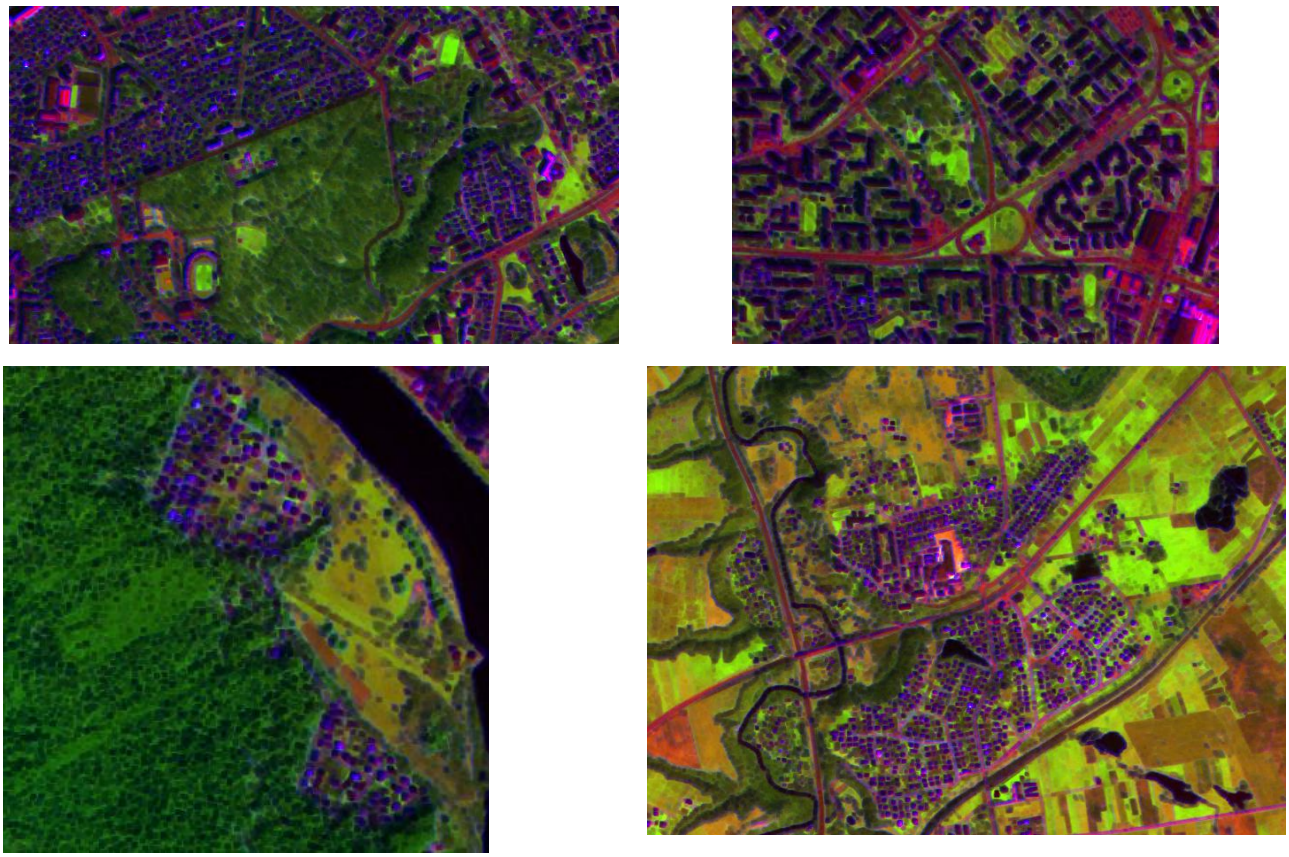
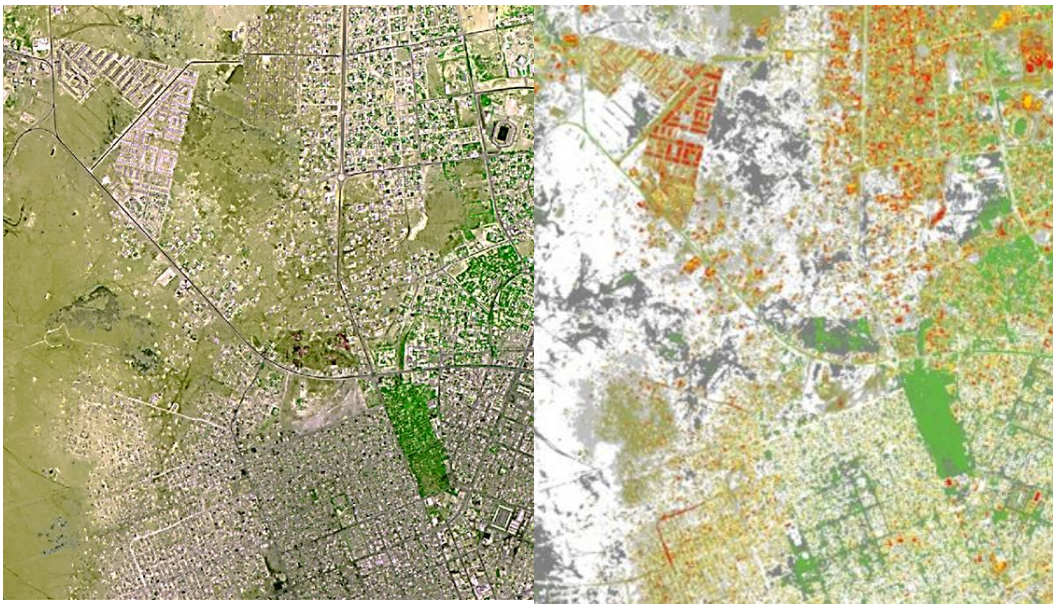


Figure 57 : identification de la végétation urbaine en milieu désertique.

Végétation en milieu urbain (Nouakchott, Mauritanie).

Résultat de la fusion ensembliste des filtres gaussien (végétation), minimum (eau) et maximum (urbain, minéral).

Classification par *Histogram Peak classification.*



Végétation des jardins dans les quartiers pavillonnaires aisés

Parcelles maraîchères

Jardin de l'Ambassade de France

2.6. DE LA TELEDETECTION AUX SYSTEMES GEOGRAPHIQUES D'INFORMATION ET DE MODELISATION TERRITORIALE (SGIMT)

2.6.1. INTEGRATION TELEDETECTION – SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUES

INTERET A L'ANALYSE GEOGRAPHIQUE DES TERRITOIRES

La construction de systèmes géographiques d'information et de modélisation territoriale (SGIMT) passe par l'intégration de la télédétection, des SIG et de la modélisation spatiale en un seul système géomatique d'analyse de l'espace géographique. L'étude comparée et le suivi spatio-temporel des processus de métropolisation nécessitent l'utilisation des potentialités, objets et spécificités de la télédétection, des SIG, de l'analyse spatiale et de la géo–visualisation. Besoin qui passe de fait par la maîtrise de l'intégralité de la chaîne de production de l'information géographique, de traitement et modélisation, d'analyse, de géo–visualisation et d'interprétation des transformations du territoire.

La mise en place d'une approche intégrée associant en un seul tenant télédétection, traitement de données géo–spatialisées et analyse d'images, SIG, analyse et modélisation spatiale, représentation et géo–visualisation territoriale va aboutir au développement de systèmes géographiques d'information et de modélisation territoriale (SGIMT) couvrant sur une même période les évolutions territoriales d'aires géoculturelles différentes.

Les besoins en systèmes de suivi et d'analyse géographique des transformations territoriales et, au premier chef, urbaines, moteur des processus d'anthropisation et de territorialisation, touchent avant tout deux types de « population » : les scientifiques et aménageurs travaillant sur les questions géographiques et territoriales, d'aménagement et d'espace. Ces besoins en bases de données géographiques spatialisées, en modèles de suivi de l'état de l'occupation et de l'utilisation de l'espace géographique, d'analyse de ses formes, structures et transformations, de caractérisation en terme social et environnemental de certains objets géographiques, sont sans cesse croissants, même dans les pays où préexiste une forte tradition en ingénierie cartographique et géographique.

Ils sont encore plus importants dans les pays en développement, émergeants et en transition, qu'ils soient d'Europe ex–communiste, d'Afrique, d'Asie ou d'Amérique du Sud. En l'absence de bases de données géographiques et cartographiques existantes ou à jour, la création de systèmes d'information géographiques à partir d'images de télédétection satellite et aérienne intégrant des données de terrain et cartographiques, plus ou moins fragmentaires et à jour, est vitale. En l'absence de données et d'informations géographiques fiables et à

jour, il est difficile de mener à bien le suivi de l'environnement, la croissance urbaine, etc.

Les méthodologies de traitement de données et d'informations géographiques concourant à la création des SGIMT font appel à différentes sous–disciplines des sciences géomatiques : les méthodologies de traitement numérique des images satellites et aéroportées, les méthodologies de modélisation et de représentation des dynamiques spatiales, la modélisation des changements d'occupation des sols, la géo–visualisation 2D/3D, la normalisation des bases de données géographiques hétérogènes.

APPROCHE MULTI–SOURCES

L'efficience de ce type de démarche dépend, pour une grande partie, de la qualité et de la pertinence des informations géographiques produites par la télédétection spatiale, les enquêtes de terrain, la capacité à les lier, les associer, les fusionner entre-elles et avec des bases de données géographiques existantes en SIG. Le choix des capteurs de télédétection, de leurs caractéristiques spatiales et spectrales en amont est essentiel pour déterminer leur potentialité dans la capacité à produire de l'information géographique pertinente apte à servir de base informationnelle pour les analyses géographiques, de générer des indicateurs et à extraire de la connaissance.

La création de SGIMT pour analyser les processus de transformation des territoires que sont la métropolisation et l'urbanisation répond à plusieurs besoins en termes de données géographiques, d'analyse territoriale et de représentation spatiale :

- ✓ La nécessité de produire de l'information géographique à différentes échelles : sur la totalité du territoire en métropolisation, sur certaines régions, sur certains lieux–urbains au niveau méso–urbain ou du bâti.
- ✓ Le besoin de couvrir de vastes espaces de plusieurs centaines de kilomètres de façon continue sur plusieurs décennies.
- ✓ La nécessité d'intégrer, d'associer, de fusionner plusieurs sources de données et d'informations géographiques, spatialisées, géo–référencées, ponctuelles, de terrain, etc.
- ✓ La nécessité de créer un système commun entre les différents SGIMT pour étudier à différentes échelles géographiques ce qui procède d'une dynamique locale ou régionale et de la mondialisation. Le développement d'une architecture interopérable associant des sources et des résultats de traitements d'images de télédétection et/ou de bases de données géo–référencées, harmonisées, permet d'aborder spatialement les multiples dimensions locales, régionales et globales de la métropolisation et de l'urbanisation. Il est une réponse méthodologique, une démarche s'appuyant

sur la mesure du continuum géographique et temporel d'une réalité biophysique et sociétale par télédétection.

La télédétection (spatiale et aéroportée) va être le vecteur informationnel de base sur lequel vont se construire les analyses : les bases de données images archivées permettent de couvrir les trente dernières années. La multiplicité des données images, résolutions spectrales, spatiales, surfaces couvertes, va permettre de couvrir spatialement et temporellement les territoires étudiés et de pallier à l'absence d'informations géographiques : sources partiellement disponibles, voire falsifiées en Europe postcommuniste, disparates ou inexistantes en Afrique de l'ouest et en Inde, non à jour ou absentes en France. Les SGIMT créés vont s'articuler autour de la télédétection spatiale et aéroportée.

L'INTEGRATION TELEDETECTION – SIG : UNE ABSENCE D'AVANCEES

HISTORIQUE

Intégrer télédétection et systèmes d'information géographiques n'est pas une problématique nouvelle. Elle a fait l'objet de plusieurs ouvrages et articles (Elhers et al., 1990) (Lunetta et al., 1991) (Wilkinson, 1996), (Star et al., 1997) (Mesev, 2007).

Cependant il y a eu peu ou pas d'apports significatifs depuis quinze ans. Les démarches d'intégration de la télédétection et des SIG restent les mêmes, tout comme les méthodes utilisées et les objectifs. En outre, l'intégration se limite à la télédétection et aux SIG. Nullement à l'analyse et à la modélisation spatiale ou à la géo–visualisation dynamique. L'intégration de la télédétection et des SIG est restée confinée à un cercle relativement restreint de spécialistes jusqu'à la fin des années 2000 malgré l'initiative CR-12 du *National Center for Geographic Information and Analysis* (NCGIA) lancée en 1990 (Star et al., 1995). Elle connaît depuis un regain d'intérêt qui, pour l'essentiel, est lié à la diffusion des systèmes géomatiques et à la nécessité de mettre à jour des bases de données géographiques de plus en plus spécialisées et complexes.

L'INTEGRATION TELEDETECTION–SIG VUE DES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUES ET CARTOGRAPHIQUES

Dans la logique d'intégration télédétection–SIG, la télédétection est du point de vue des systèmes d'information géographiques un système de production de l'information géographique pour « alimenter » les bases de données géographiques et spatiales des SIG : les méthodologies d'analyse des images de télédétection spatiales sont orientées vers la production d'informations

thématiques (intégrées sous la forme de couches vecteurs ou rasters et de base de données SIG). Les développements portent sur l'amélioration des méthodes d'analyse et de traitement d'images visant à produire de l'information thématique plus efficiente et plus précise. Ils se focalisent également sur l'amélioration de la sensibilité, de la résolution spatiale, de la résolution spectrale et de la périodicité de prises de vue des images permettant d'améliorer la qualité et la pertinence des informations thématiques produites. Les coûts des mises à jour des bases de données géographiques et cartographiques par télédétection sont relativement faibles avec un taux d'erreur moyen de 7% en utilisant les données SPOT (Elhers et al., 1990). La télédétection a pris une place croissante dans la production des modèles numériques de terrain (MNT) et des modèles numériques d'élévation (MNE). Elle tend également à prendre une place prépondérante dans la production des cartes dynamiques et d'animation spatiale grâce, d'une part, au niveau de répétitivité des prises de vue images et de mises à jour et d'autre part, dans les progrès constants dans la production d'informations carta–géographiques et la qualité des données (par exemple l'utilisation d'ortho–images centimétriques dans la cartographie urbaine). L'amélioration de la qualité et de la pertinence des informations thématiques produites par télédétection sont portées depuis un peu moins de dix ans par la spécialisation thématique croissante des capteurs de télédétection embarqués sur les vecteurs aéroportés et spatiaux et le nombre de satellites d'observation de la Terre et de l'environnement mis en orbite.

L'INTEGRATION TELEDETECTION–SIG VUE DE LA TELEDETECTION

Les systèmes d'information géographiques peuvent être utilisés comme des systèmes d'aide à la décision en télédétection, en traitement et analyse d'images, notamment dans les approches et analyses diachroniques (Gadal, Gilg, 2002). Les SIG sont utilisés dans les phases amont dans l'identification des zones d'étude (régions d'intérêts), dans l'aide à la détermination des zones d'entraînement dans les classifications (Williams, 2001) (Campbell, 2007) et les post–classifications (Ventura, 1995) (Mesev, 1998). Les SIG jouent également un rôle important dans la comparaison des résultats obtenus par traitement et analyse d'images avec d'autres sources géographiques. Ils permettent d'évaluer la pertinence des résultats et de mettre en évidence les erreurs qui sont présentes aussi bien dans les informations géographiques produites que dans les données sources utilisées. Les SIG constituent d'excellentes plateformes d'aide à l'analyse et à l'interprétation des résultats.

Tableau 10 : apports des bases de données à la télédétection.

Méthode	Caractéristiques	Références bibliographiques
Utilisation de données auxiliaires	MNT	(Maselli et al., 2000)
	Topographie, utilisation des sols, occupation des sols	(Baban, Yusof, 2001)
	Densité des infrastructures routières	(Zhang et al., 2002)
	Couverture routière	(Epstein et al., 2002)
	Données de recensement	(Harris, Ventura, 1995) ; (Mesev 1998)
Stratification	Fondée sur la topographie	(Bronge, 1999) ; (Baban, Yusof, 2001)
	Basée sur les zones écologiques	(Helmer et al., 2000)
	Basée sur les données de recensement	(Oetter et al., 2000)
	Fondée sur les indices de formes	(Narumalani et al., 1998)
Post–classification	Reclassification basée sur les filtres de Kernel	(Barnsley, Barr, 1996)
	Utilisation du zonage et de la densité du bâti en vue de modifier les résultats de la classification	(Harris, Ventura, 1995)
	Emploi de corrections contextuelles	(Groom et al., 1996)
	Utilisation de matrices de co-occurence	(Zhang, 1999)
	Emploi de polygones	(Stallings et al., 1999)
	Utilisation d'un système expert	(Stefanov et al., 2001)
	Utilisation d'un système de connaissance pour réaffecter les pixels mal classés	(Mural, Omatu, 1997)
Utilisation de données multi–sources	Radiométrie, texture et données auxilaires ancillary data (MNT, occupation des sols, cartes SIG),	(Amarsaikhan, Douglas, 2004) ; (Benediktsson, Kanellopoulos, 1999) ; (Bruzzone et al., 1997) ; (Franklin et al., 2002) ; (Gong, 1996) ; (Solberg et al., 1996) ; (Tso, Mather, 1999)

Sources: d'après Harris, P. M., Ventura, S. J. (1995) ; Weng, Q. (2010).

Leur pertinence est accrue dans le cadre des analyses diachroniques permettant au géographe d'optimiser les interprétations et de diminuer les erreurs de jugement (Gadal, Gilg, 2002). Les SIG constituent des systèmes d'aide à l'analyse et à l'interprétation d'images. Aide à l'analyse et à l'interprétation d'images qui peut se faire par superposition scalaire des différentes couches d'informations dans le SIG, la fusion ensembliste ou arithmétique des résultats avec les données sources contenues dans le SIG. Le mappage des résultats sur les modèles numériques de terrain contenus dans les SIG peut, dans nombre de cas, être un moyen d'optimisation des informations produites pour l'analyse et l'interprétation avec l'intégration de la topographie et de la troisième dimension (verticalité).

Les bases de données cartographiques et images SIG sont également utilisées comme données de référence dans le géo–référencement et la géo–rectification des données cartographiques, images et spatiales. Géo–référencement et géo–rectification géométrique qui dans la construction du SGIMT et la normalisation des données spatiales et cartographiques sont fondamentaux. La normalisation des données géographiques et spatiales s'appuie sur ces deux opérations. Elle s'appuie sur une donnée spatiale de référence : les images satellites à très haute résolution spatiale Kompsat-2 panchromatiques avec des pixels de référence couvrant une surface de 1m².

En mode raster, les pixels de référence (correspondant des amers de l'image – un pixel des objets géographiques de référence) sont emboîtés formant un modèle pyramidal inversé de la plus petite surface pixellaire à la plus grande (images MétéoSat Seconde Génération ou DMSP OLS). Les données au format vecteur sont géo–référencées et si besoin géo–rectifiées (par transformée géométrique sur superposition de points nodaux de référence) par rapport à l'image Kompsat-2 panchromatique de référence. Le node (vertex) étant rapporté au pixel de référence.

Figure 58 : intégration multi–données.

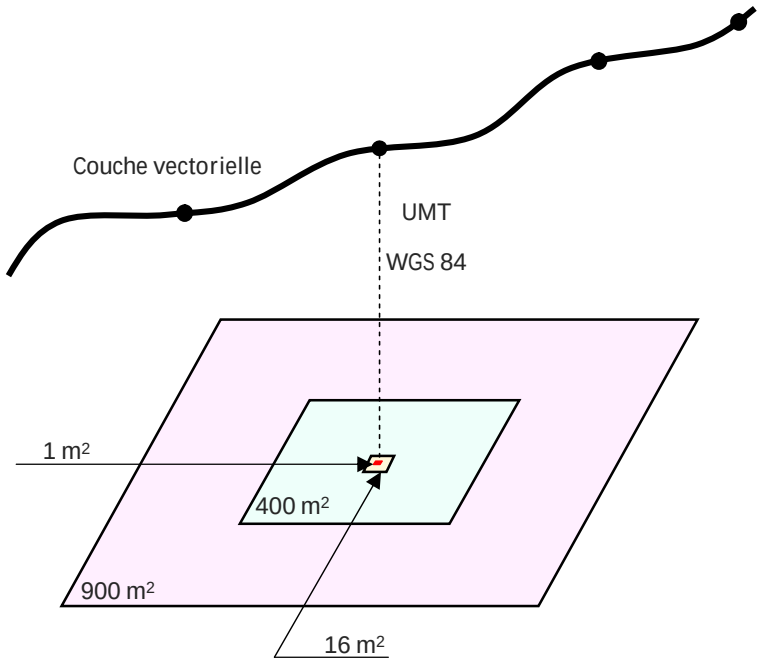
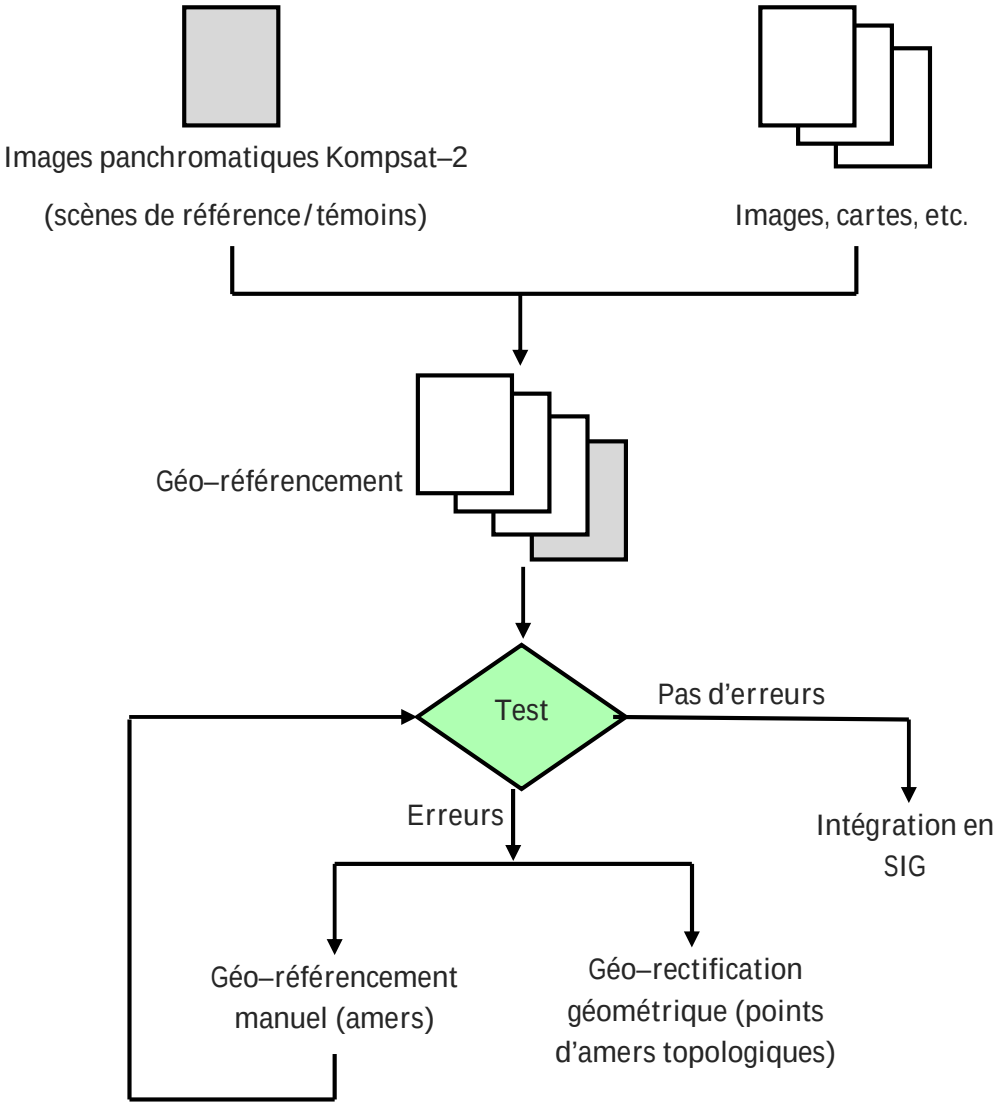


Figure 59 : intégration des données par géo-référencement.



Cette procédure de normalisation permet l'intégration en un seul et même système géographique de référence des différentes données spatiales et cartographiques raster et vecteur utilisées et de gérer l'hétérogénéité de leur résolution spatiale et géométrique (projection géométrique). L'ensemble des données géographiques et spatiales, quel que soit leur niveau d'hétérogénéité, sont géodésiquement et géométriquement normalisées.

Tableau 11 : approche multi–échelles, multi–capteurs.

Satellites		Capteurs	Bandes spectrales	Résolution spatiale	Vocation
DMSP		OLS	Du visible au proche IR : [0,4-1,10 µm] IR thermique : [10-13,4 µm]	550 × 550 m pour les images VNIR enregistrées de jour. 2,7 × 2,7 Km pour les photographies de nuit.	Analyse globale et régionale.
Landsat	1, 2, 3	MSS	1 (V) [0,5-0,6 µm] 2 (R) [0,6-0,7 µm] 3 (IR) [0,7-0,8 µm] 4 (IR) [0,8-1,1 µm]	60 × 80 m	Analyse régionale et urbaine. Villes, villages. Groupe de bâtiments.
	4 et 5	TM	1 (B) [0,45-0,52 µm] 2 (V) [0,52-0,60 µm] 3 (R) [0,63-0,69 µm] 4 (IR) [0,76-0,9 µm] 5 (IRM) [1,55-1,75 µm] 6 (IRT) [10,4-12,5 µm] 7 (IRM) [2,08-2,35 µm]	30 × 30 m bande 6 : 120 × 120 m	
	7	ETM+	1 (B) [0,45-0,52 µm] 2 (V) [0,53-0,61 µm] 3 (R) [0,63-0,69 µm] 4 (IR) [0,78-0,9 µm] 5 (IRM) [1,55-1,75 µm] 6 (IRT) [10,4-12,5 µm] 7 (IRM) [2,09-2,35 µm] (Pan) [0,52-0,90 µm]	30 × 30 m bande 6 : 60 × 60 m Pan : 15 × 15 m	
Spot	1, 2, 3	HRV	1 (B) [0,50-0,59 µm] 2 (V) [0,61-0,68 µm] 3 (IR) [0,79-0,89 µm] (Pan) [0,51-0,73 µm]	20 × 20 m Pan : 10 × 10 m	Analyse régionale et urbaine. Villes, villages. Hameaux.
	4	HRVIR	1 (B) [0,50-0,59 µm] 2 (V) [0,61-0,68 µm] 3 (IR) [0,79-0,89 µm] 4 (IRM) [1,58-1,75 µm] (Pan) [0,61-0,68 µm]	20 × 20 m Pan : 10 × 10 m	
	5	HRG	B1 (B) [0,50-0,59 µm] B2 (V) [0,61-0,68 µm] B3 (IR) [0,79-0,89 µm] B4 (IRM) [1,58-1,75 µm] (Pan) [0,51-0,73 µm]	B4 : 20 × 20 m B1 B2 B3 : 10 × 10 m Pan : 2,5 × 2,5 m	

Kompsat-2			1 (B) [0,45-0,52 μm] 2 (V) [0,52-0,60 μm] 3 (R) [0,63-0,69 μm] 4 (IR) [0,76-0,90 μm] (Pan) [0,50-0,90 μm]	4 m 4 × 4 m Pan : 1 × 1 m	Bâtiments, structures urbaines. Analyse urbaine et intra–urbaine.
Ramses			Bande X (9,5 GHz)	0,25 × 0,4 cm	Bâtiments, structure intra–urbaine.
Caméra soviétique			visible	15 × 15 cm	Analyse intra–urbaine.

METROPOLISATION ET INTEGRATION TELEDETECTION–SIG

INTERETS ET LIMITES

L'intérêt de disposer d'un système intégré liant télédétection et SIG pour l'analyse et la modélisation urbaine a été mentionné depuis le début des années 1990 (Elhers et al., 1990) (Treitz et al., 1992) (Harris, Ventura, 1995) (Weng, 2001). L'intérêt est de générer, à partir des différentes sources de télédétection aux résolutions spatiales et temporelles différentes, des informations thématiques multi–échelles qui vont être associées aux données géographiques légales existantes : plan local d'urbanisme, cadastre, bases de données démographiques et socio-économiques, limites administratives, etc. Les images de télédétection vont enrichir les bases de données urbaines existantes.

L'intégration télédétection–SIG se fait par la normalisation des bases de données spatiales dans un format de stockage des données, en général le mode raster avec la « rastérisation » des bases de données au format vectoriel. La résolution spatiale de la rastérisation doit être identique à la résolution spatiale des résultats issus du traitement et de l'analyse des images de télédétection. La rastérisation des données vectorielles comme les données démographiques géo–référencées et géo–localisées et représentées sémiologiquement et syntaxiquement sous la forme de points peut se faire par interpolation (également par interpolation, puis rastérisation).

La vectorisation des données raster est plus délicate. Elle nous renvoie aux problématiques de segmentation d'images basées sur les approches « contours » et « régions ». Approche « contours », car chaque contour doit être fermé et chaque segment de droite rattaché à un seul et même objet topologique. Chaque objet vectorisé doit être géocodé. Approche « région » car chaque entité spatiale

générée par détection de contour doit être associée à une valeur le caractérisant. Elle peut se faire sur le modèle des méthodes syntaxiques développées pour la reconnaissance, l'extraction, la vectorisation et la création d'une base de données orientée objet associée à des éléments bâtis sur les images de télédétection très haute résolution spatiale.

NIVEAU D'INTEGRATION TELEDETECTION–SIG DU SGIMT

Il est possible d'évaluer le niveau d'intégration télédétection–SIG sur la base du modèle créé par Manfred Ehlers et ses collèges en 1990 (Elhers et al., 1990), repris par Victor Mesev en 1997 (Mesev, 1997), puis par Qihao Weng en 2010 (Weng, 2010) :

Tableau 12 : niveaux d'intégration Télédétection–SIG–Analyse spatiale.

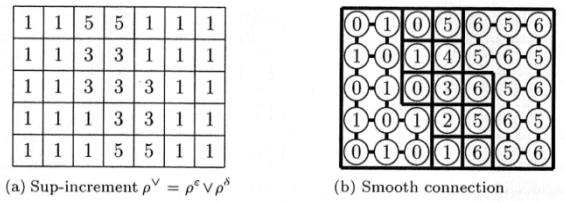
Niveau d'intégration	Caractéristiques
Niveau 1 : association télédétection–SIG	Les bases de données SIG et générées par télédétection ne sont pas jointes. Les données géographiques et spatiales, stockées dans deux logiciels distincts sont liées par un module d'échange de données.
Niveau 2 : association télédétection–SIG	Les données géographiques et spatiales sont stockées dans deux logiciels distincts. Elles sont liées par une interface commune permettant de visualiser et de superposer les couches d'informations rasters et vectorielles.
Niveau 3 : intégration télédétection–SIG	Les données géographiques et spatiales issues des SIG et des traitements et analyses d'images sont intégrées dans un seul logiciel, un SIG en général. La télédétection spatiale est une partie intégrale du SIG. Les bases de données servent ensuite pour la géo–visualisation 2D/3D des images et les analyses diachroniques.

Le cœur de l'intégration télédétection–SIG vient de la capacité à associer, voire fusionner dans une seule base de données géographiques et spatiales les données rasters et vectorielles issues du SIG, de la télédétection spatiale ou des

traitements des données spatiales ou aéroportées. Les niveaux 1 et 2 nous positionnent dans la problématique de l'interopérabilité. Les niveaux 3, 4 et 5 nous mettent dans celle de l'intégration. Intégration qui se fait soit par la conversion d'un format de stockage à un autre, le plus courant étant la conversion en mode raster, soit par l'association des deux formats raster et vectoriel.

Avec le développement des formats vectoriels et des méthodes de traitement d'images de télédétection en mode vecteur, la mesure spectrale de la surface de la Terre étant rapportée à un node, il est probable que le format de stockage des données en mode raster va progressivement disparaître. Un nombre croissant de méthodes de segmentation d'images basées sur les traitements morphologiques intègre les notions de connectivité. Méthodes connectives dans lesquelles le pixel est rapporté à un point nodal. Plusieurs méthodes de segmentation connectives ont été développées : segmentation par hyper–connexion (Wilkinson, 2011) (Perret et al., 2011), segmentation par alpha–connexion (Ouzounis, Soille, 2011). Elles se basent notamment sur les travaux de Jean Serra et de Christian Ronse (Ronse, 2008) (Serra, 1998) (Serra, 2006) (Alsaody, Serra, 2011). D'autres méthodes basées sur la morphologie mathématique sont utilisées pour la segmentation d'images vectorielles (Angulo, Velasco-Forero, 2011).

Figure 60 : exemple d'alpha–connexion sur une matrice raster.



Source : Soille, P. (2011). "Preventing chaining through transitions whilesfavouring it within homogeneous regions". In Mathematcal morphology and its applications to image and signal processing, Soille P., Pesaresi M., Ouzounis G. (Eds.). Berlin: Springer, pp. 96-107.

Sur la base des travaux de la théorie des réseaux de graphes appliquée à l'analyse des bases de données vectorielles (Grady, Polimeni, 2010) (Lézoray, Grady, 2011) les méthodes de segmentation vectorielle peuvent parfaitement être utilisées pour la segmentation et la classification orientée objet des bases de données géographiques au format vectoriel ouvrant la voie à l'intégration des méthodes d'analyse et de traitement vectoriel des images et des données géographiques en SIG.

Dans le même ordre d'idée, les méthodes d'analyse et de traitement d'images peuvent être utilisées pour fusionner les bases de données rasters générées par télédétection et celles issues des SIG. Il s'agit des méthodes de classification par réseaux de neurones (Weng, 2010). Ces méthodes se basent, pour l'essentiel, sur les méthodes de *multi–layer perceptron* (MLP) (Kavzoglu, Mather, 2004) et *Kohonen self–organisation map* (KSOFM) (Pal et al., 2005).

Un quatrième niveau peut être associé dans le cas des SGIMT. Il se distingue du niveau 3 par l'intégration des méthodes d'analyse, de modélisation et de simulation spatiale. On peut parler d'intégration télédétection–SIG–Modélisation spatiale. Le niveau 5 intègre la géo–visualisation 3D dynamique. Dans l'ensemble des trois derniers cas de figure, les SIG agissent comme des systèmes intégrateurs.

Tableau 13 : niveaux d'intégration Télédétection–SIG–Analyse spatiale.

Niveau d'intégration	Caractéristiques
Niveau 4 : intégration télédétection–SIG–Modélisation spatiale	Les données géographiques et spatiales issues des SIG et des traitements et analyses d'images sont intégrées dans un seul logiciel, un SIG avec les méthodes d'analyses, de modélisation et de simulation spatiales.
Niveau 5 : intégration télédétection–SIG–Modélisation spatiale – Géo–visualisation dynamique	Les données géographiques et spatiales issues des SIG et des traitements et analyses d'images sont intégrées dans un seul logiciel, un SIG avec les méthodes de modélisation et de simulation spatiales. Les données et résultats peuvent être géo–visualisées en 2D/3D, 3D, 2D/3D dynamiques.

L'enjeu de l'intégration télédétection–SIG est accentué par le développement massif des SIG mobiles sur les Smartphones et tablettes mobiles avec comme corollaire le besoin de disposer de bases de données géographiques en temps réel, continuellement mises à jour. Il est d'ordre méthodologique et conceptuel. Le développement rapide des SIG mobiles porte le besoin de disposer d'informations et de connaissances géographiques géo–localisées en temps réel en tout lieu ce qui oblige à repenser la structure même des SIG mobiles : architectures de stockage, modèles de traitement et d'analyse, sémantique et sémiologie, etc. Repenser les modèles d'architecture SIG, les « @-SIG », c'est avant tout réfléchir et concevoir de nouveaux concepts géographiques permettant une meilleure compréhension, analyse et représentation de l'espace géographique à travers le développement de modèles de représentation basés sur les « @-SIG », la réalité virtuelle géo–localisée (réalité augmentée) et interconnectée au cyberespace. Cette réflexion est quasi absente tant en géographie qu'en géomatique.

Nous sommes dans une adaptation des architectures SIG actuelles au réseau et de la sémiologie graphique à la taille des écrans de visualisation.

LIMITES CONCEPTUELLES ET TECHNIQUES

L'intégration des SIG et de la télédétection est considérée par certains auteurs comme le but ultime à atteindre en géomatique (Elhers et al., 1989). Objectif qui a été formalisé à travers le terme d'*Integrated Geographic Information System* (IGIS). Sa mise en œuvre technique reste plus souvent limitée à l'intégration d'informations et de connaissances géographiques produites en télédétection. Elle est également contrainte par la nature hybride du système géomatique intégrant télédétection et SIG : « [...] *the move towards seamless and hybrid integration of data, techniques and organisation from the geographic information system (GIS) domain with those from the remote sensing sphere has been arduous, sporadic and irresolute* [...] » (Mesev, Walrath, 2007). En 2007 le problème restait entier pour les auteurs nord-américains : comment intégrer télédétection et SIG ? Si non, peut-on réellement intégrer télédétection et SIG ? (Mesev, 2007).

Si l'on met à part le problème de définition, la question de l'intégration télédétection–SIG est conceptuelle. La télédétection, les SIG, l'analyse et la modélisation spatiale, la géo–visualisation sont des démarches géographiques et spatiales basées sur des méthodes et des technologies de gestion, de traitement, d'analyse, de modélisation, de figuration et de représentation des données, informations, connaissances, modèles spatiaux et géographiques. Données, informations et connaissances qui sont incluses dans un lieu et associées à une géo–localisation.

Télédétection, SIG, géo–visualisation, analyse et modélisation spatiale s'appuient cependant sur des concepts et des entrées technologiques différentes, les entrées méthodologiques étant relativement proches : elles s'appuient sur les traitements statistiques, morphologiques et ensemblistes. La césure est technologique. Elle s'exprime au niveau des modes de stockage des données, informations et connaissances, raster, vecteur et les bases de données géocodées quantitatives et qualitatives. Les modes et les méthodes de traitement et d'analyse sont liés à la façon dont les données, informations et connaissances sont structurées et stockées. Les traitements diffèrent entre des données qui sont en mode raster, vecteur ou sous la forme de bases de données. Si le lien organique entre bases de données géographiques et le mode vectoriel permet d'associer les deux modes de structuration des données, la discontinuité méthodologique est extrêmement marquée en mode raster. Parallèlement, les mêmes méthodes de traitement de données en mode raster sont utilisées aussi bien pour l'analyse et le traitement de données de télédétection ou image, que pour l'analyse et la modélisation spatiale ou encore la reconstruction 2D/3D d'objets géographiques.

Cette homogénéité en termes de méthodes de traitements algorithmiques **fait des systèmes Télédétection–SIG–modélisation spatiale–géo–visualisation**

des systèmes géomatiques totalement intégrés. Ils peuvent en outre générer de l'information géographique, des spatio–cartes au format vectoriel et des bases de données géographiques par le biais des méthodes de traitement et d'analyse d'images syntaxiques. Bases de données orientées objets qui sont ensuite utilisées pour segmenter, catégoriser, classer spatialement les objets géographiques. L'introduction des méthodes connectivistes (alpha–segmentation, hyper–segmentation, etc.), permet de développer de nouvelles méthodes de segmentation et d'analyse d'images qui sont basées sur la décomposition de l'image en une série d'intersections d'éléments (figure x).

Les liens avec les données au format vectoriel peuvent se faire de quatre manières :

- ✓ La rastérisation des données, informations et connaissances au format vectoriel.
- ✓ La vectorisation et la génération de tables attributaires orientées objet (méthodes de reconnaissance symbolique intermédiaire).
- ✓ La superposition des données vectorielles et rasters.
- ✓ La fusion de données.

Figure 61 : organigramme méthodologique.

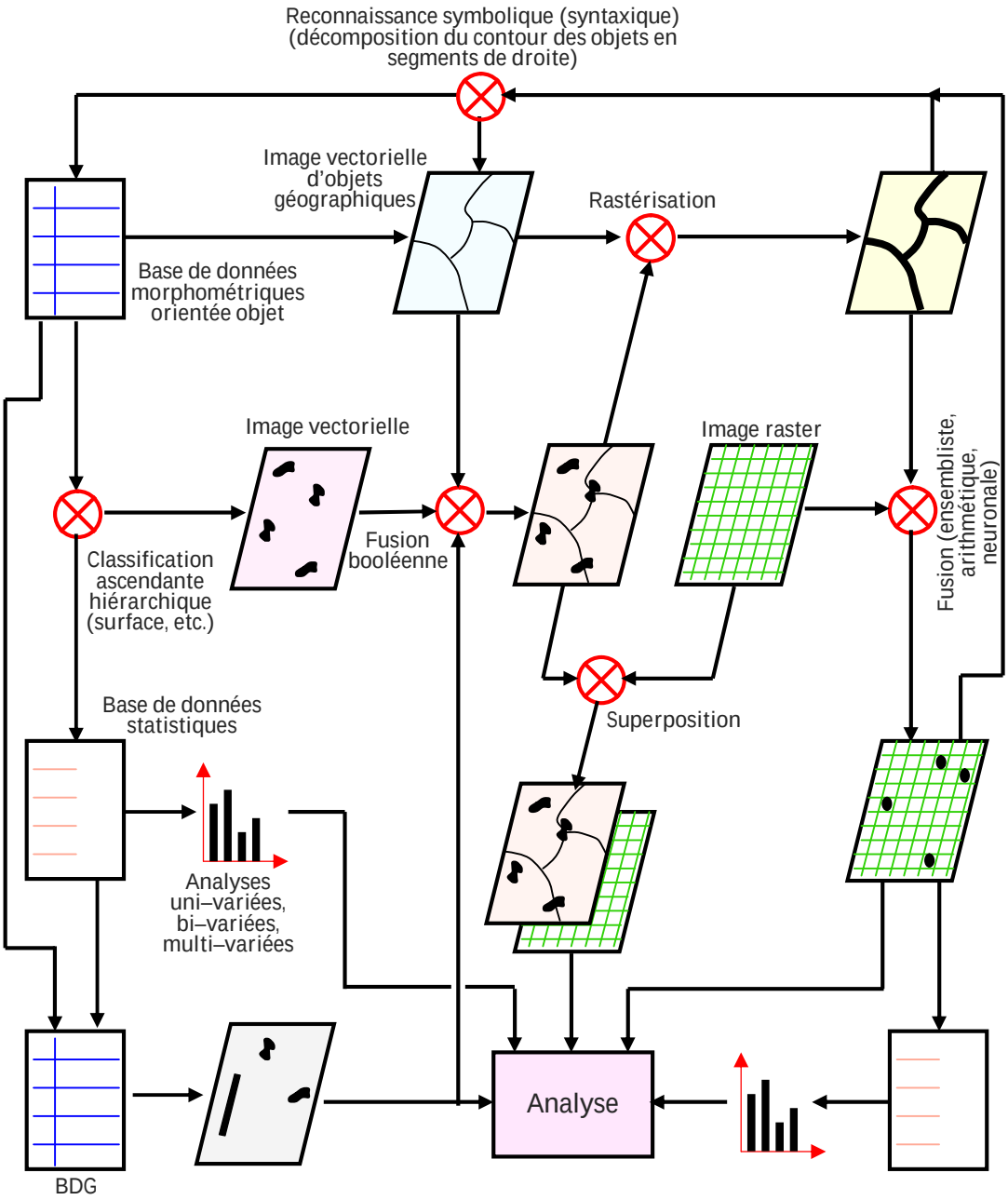


Figure 62 : normalisation géométrique des cartes et images satellites.

Extraits de la phase d'intégration des différentes données cartographiques et images (résultats de classifications automatiques) de 1876 à 2007, Kaunas, Lituanie.

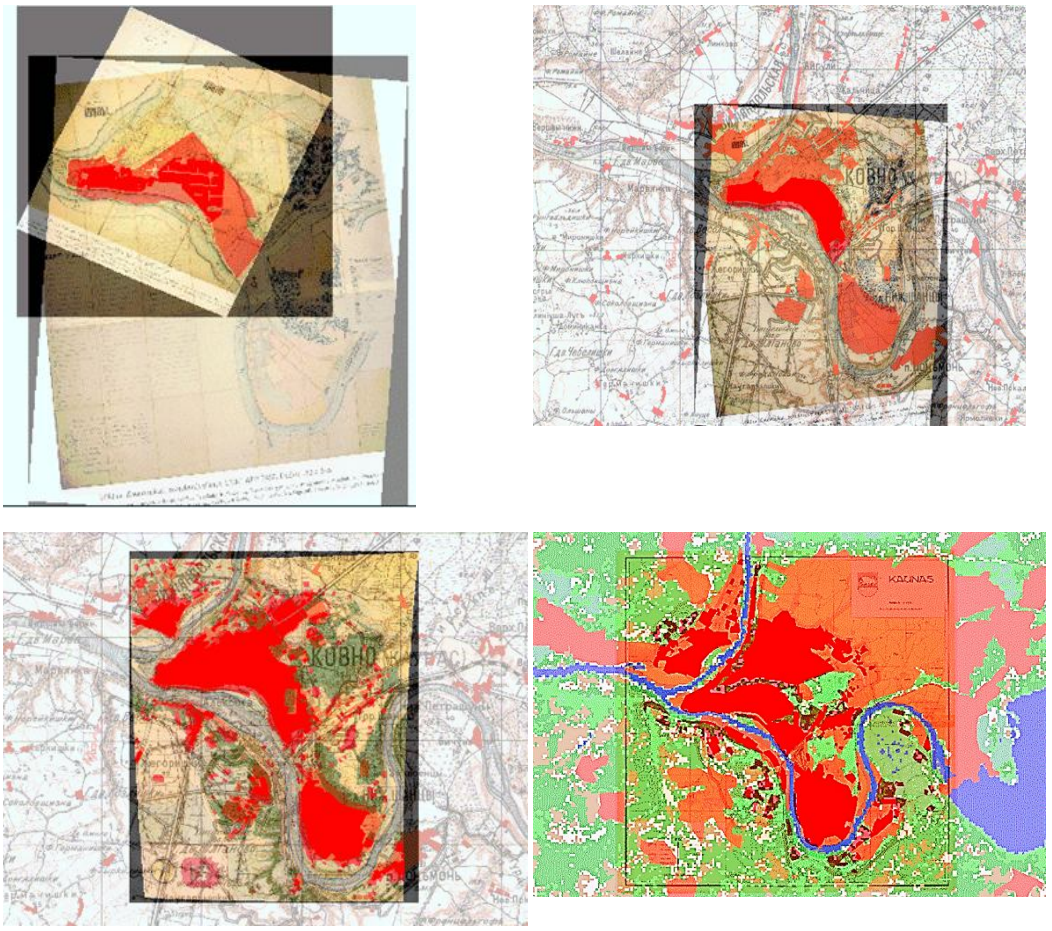


Figure 63 : visualisation de la modification du tracé hydrographique (source possible d'erreurs) lors de l'intégration des bases de données géographiques générées à partir d'images satellites et de cartes. Exemple du fleuve Niémen, Kaunas.

1910 (bleu foncé), 1975 (bleu clair), 2007 (bleu)

Zoom : 1910 (bleu foncé), 1975 (bleu clair), 2007 (bleu)

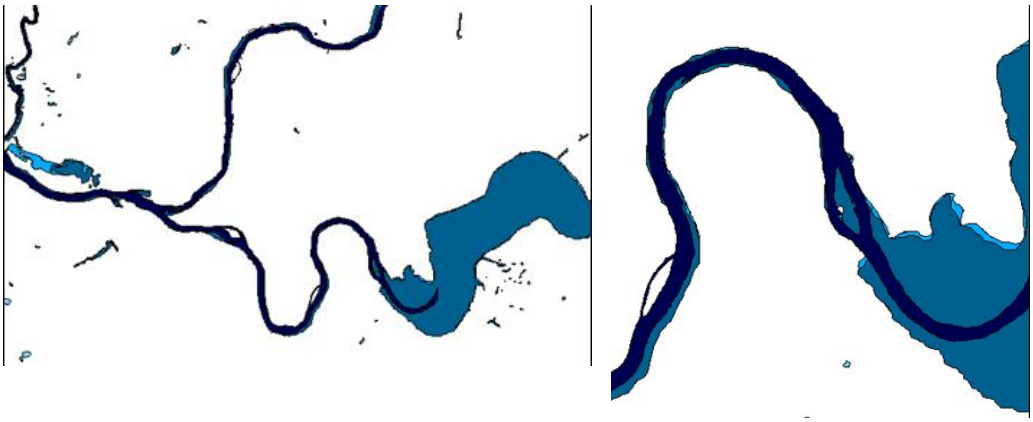
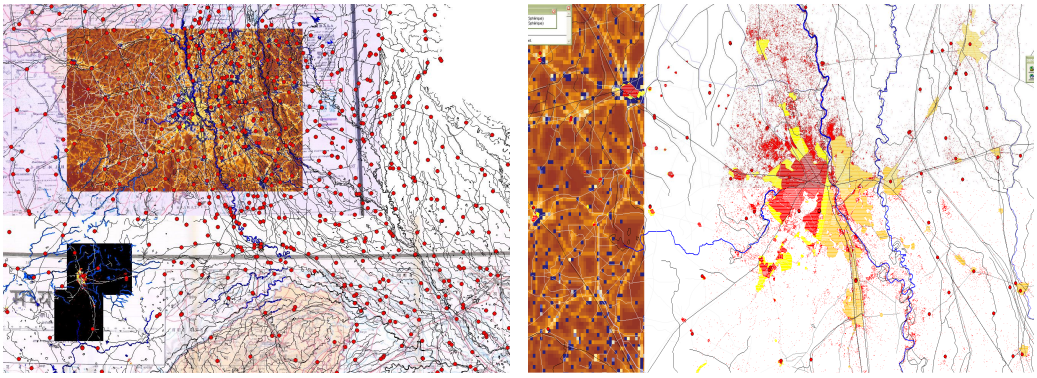


Figure 64 : visualisation d'une base de données géographiques intégrée. Corridor Delhi–Mumbai, Inde.

Visualisation d'extraits de la base de données géographiques intégrée.



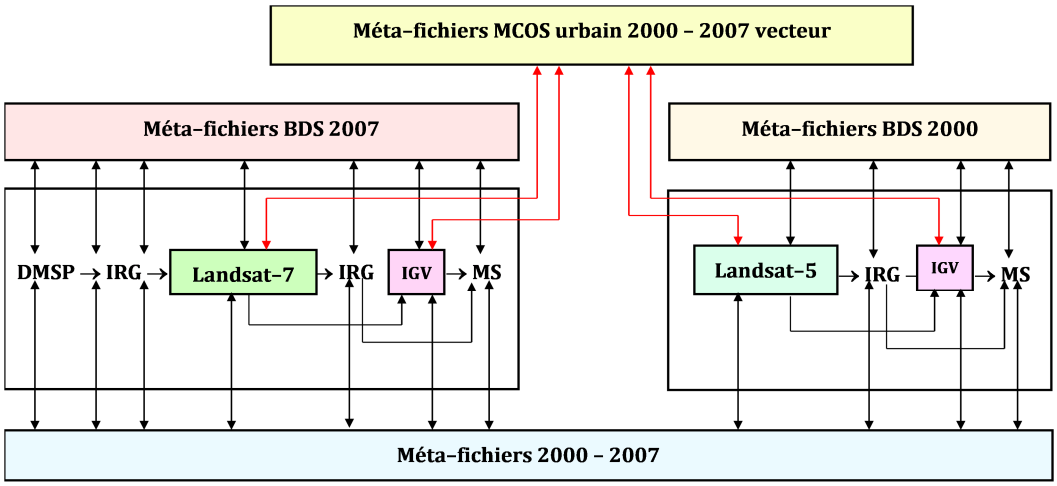
ARCHITECTURE DU SGIMT

STRUCTURE DU SGIMT

La structuration (le schéma d'organisation du stockage des données) est organisée par catégories de données, par dates, types de données spatiales et géographiques et par catégories thématiques (informations produites). L'ensemble des couches de données et d'informations ainsi que les modèles spatiaux sont liés entre eux de façon séquentielle (thématiques) et hiérarchique : SGIMT/Bases de données géographiques et territoriales (BDGT)/Bases de

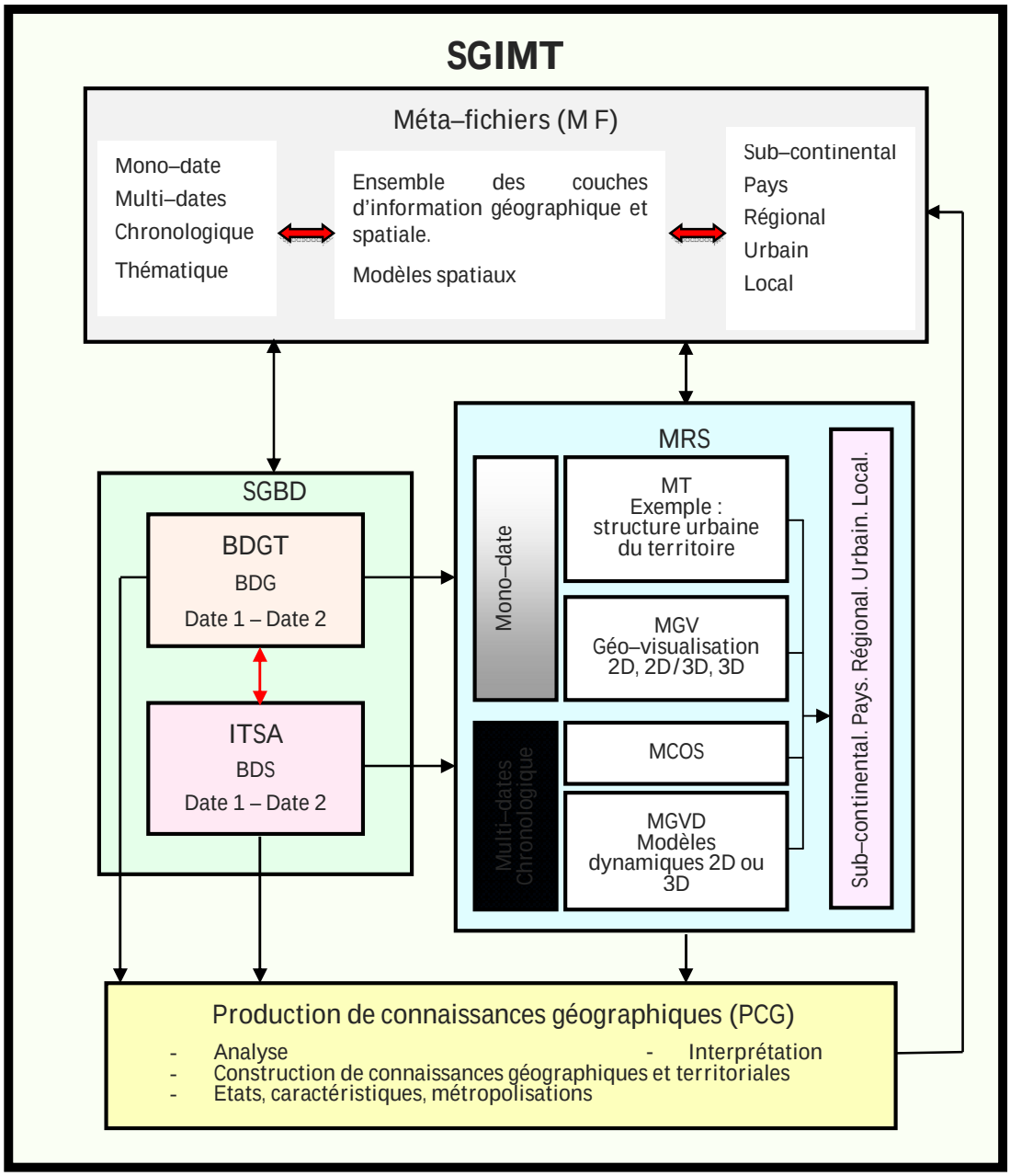
données géographiques (BDG)/Bases de données/Informations géographiques rasters (IGR) – informations géographiques vectorielles (IGV) – modèles spatiaux (MS). L'ensemble des liens entre les couches d'informations et les répertoires de données sont organisés par les méta–fichiers.

Figure 65 : organisation par méta–fichiers.



L'intérêt de ce double mode d'organisation des données, connaissances et informations géographiques, est d'avoir une structure de données fondée sur les répertoires, totalement transposable d'un système d'information géographique à un autre et de pouvoir dans le même temps gérer, afficher, traiter, modéliser thématiquement, sur certaines dates, certaines périodes ou à certains niveaux géographiques les bases de données et d'informations spatiales et géographiques.

Figure 66 : organisation fonctionnelle du SGIMT.



Légende :

- ❑ SGIMT : système géographique d'information et de modélisation territoriale.
- ❑ MF : méta–fichiers.
- ❑ MRS : modèle de représentation spatiale.
  - MT : modèle thématique.
  - MGV : modèle de géo–visualisation.
  - MCOS : modèle de changement d'occupation du sol.
  - MGVD : modèle de géo–visualisation dynamique.
- ❑ SGBD : système de gestion de base de données.

  BDGT : base de données géographiques thématiques.
  - BDG : base de données géographiques.
  - IGR : information géographique raster.
  - IGV : information géographique vectorielle.

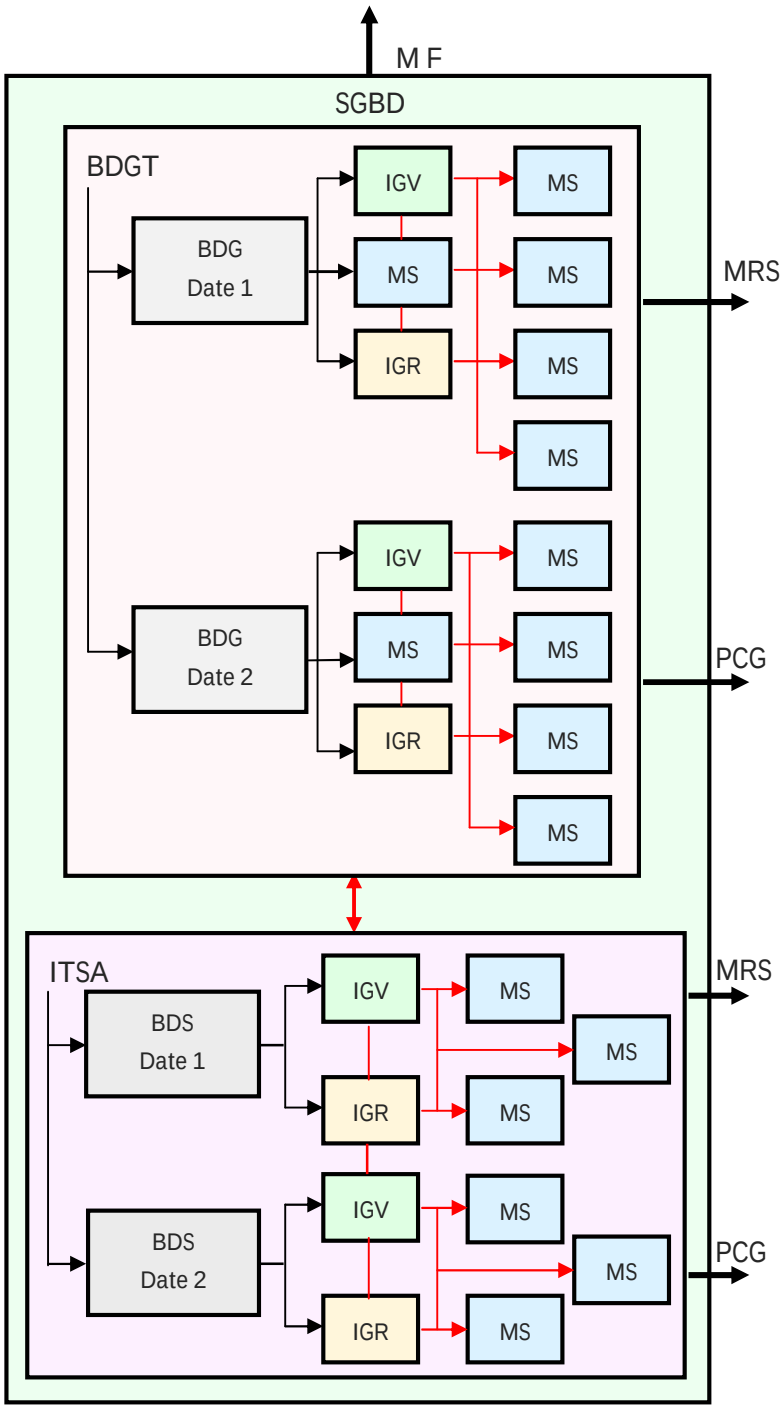
- MS : modèle spatial.

ITSA : image de télédétection spatiale et aéroportée.

- BDS : base de données spatiales.

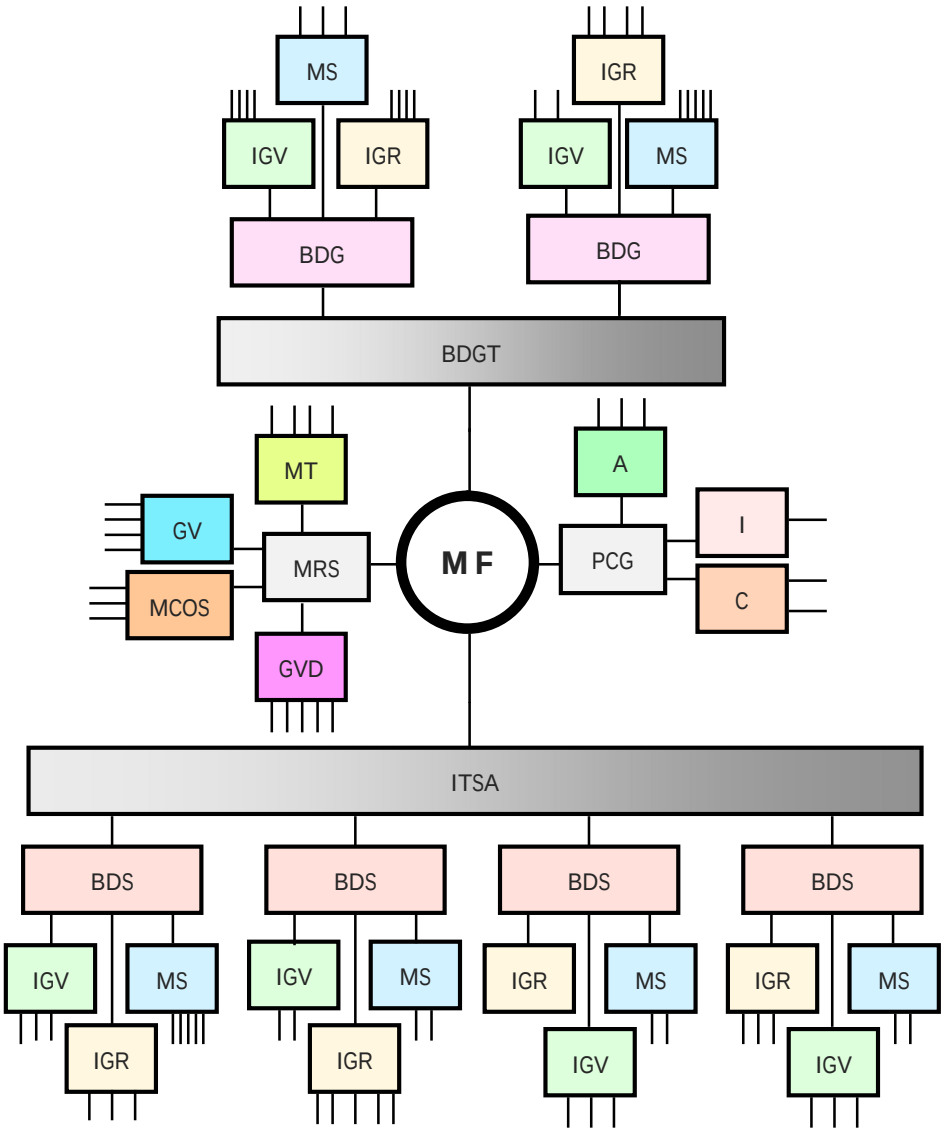
❑ PCG : production de connaissances géographiques.

Figure 67 : organisation fonctionnelle du SGIMT (suite). Décomposition du SGBD.



La structuration du SGMIT s'organise autour de quatre modules : ITSA, BDGT, MRS et PCG intégrant chacun sous une forme hiérarchisée des sous–modules, l'ensemble des modules et des fichiers étant liés entre eux par les méta–fichiers.

Figure 68 : organigramme méthodologique.



Légende :

- A : analyse I : interprétation C : connaissances
- BDG : base de données géographiques
- BDGT : base de données géographiques et territoriales
- BDS : base de données spatiales
- GV : géo–visualisation
- GVD : géo–visualisation dynamique
- IGR : information géographique raster
- IGV : information géographique vectorielle
- ITSA : image de télédétection spatiale et aéroportée

- MCOS : modèle de changement d'occupation du sol
- MF : méta–fichiers
- MRS : modèle de représentation spatiale
- MS : modèle spatial
- MT : modèle territorial
- PCG : production de connaissances géographiques

ARCHITECTURE DE STOCKAGE DES DONNEES

Les architectures des SGIMT (Afrique de l'ouest, Inde du Nord-Ouest, Pays baltes) ont été construites de manière à être transposables (utilisables) et interopérables sur trois types de plates-formes SIG : ArcGIS, Geomedia Pro et MapInfo. Les SGIMT se distinguent par la capacité à intégrer des données et des informations hétérogènes géométriquement (échelles, projections), spatialement (résolutions, surfaces, géo–localisations), sémantiquement (données et informations attributaires textuelles, numériques, images). Trois logiques combinées de normalisation des bases de données géographiques hétérogènes ont été développées et appliquées de concert de façon simultanée :

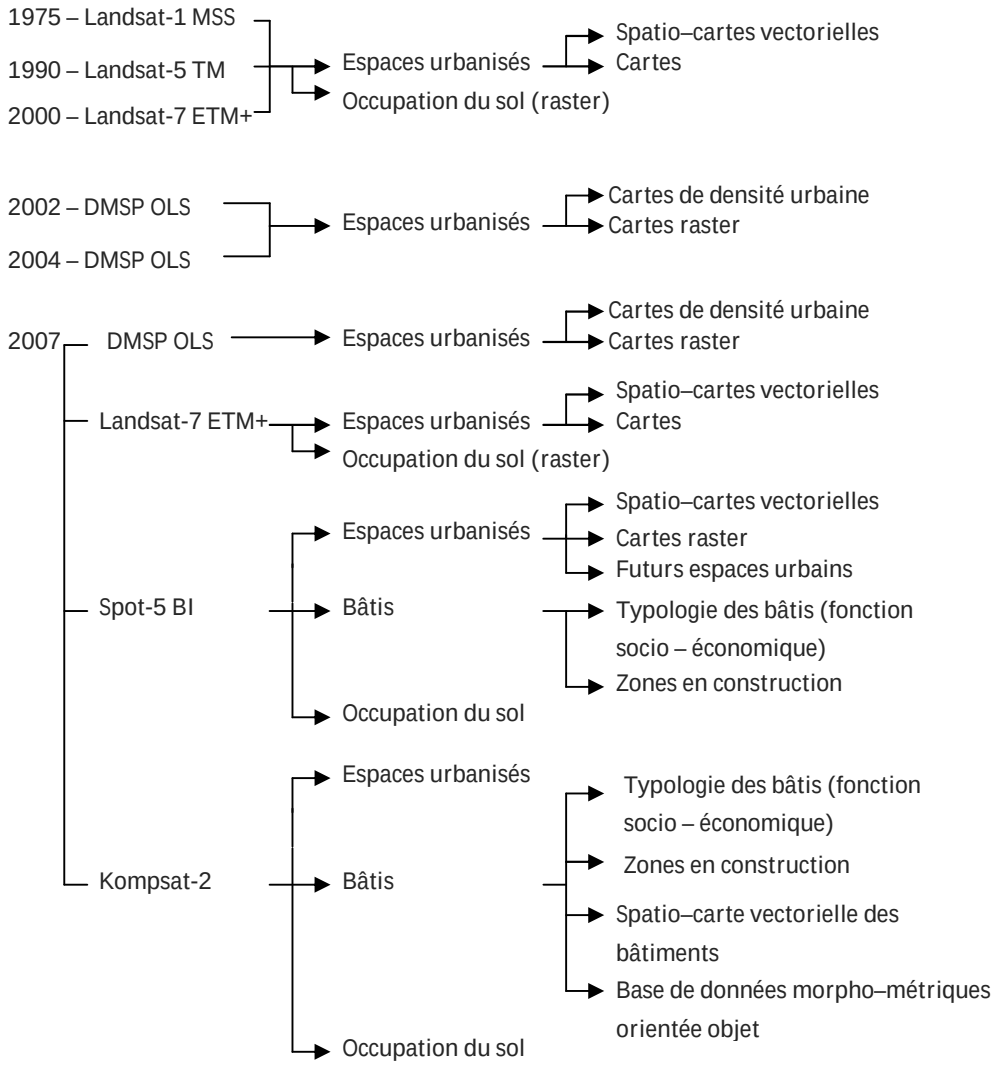
- ✓ une première basée sur une structure de géocodes hiérarchisée.
- ✓ une seconde sur une organisation hiérarchisée et différenciée du stockage des données.
- ✓ une troisième sur un système de projection géodésique commun basé sur celui des images satellite, à savoir, le système UTM. La structure normalisée générée a été appliquée sur les trois ensembles d'architecture MCDG renvoyant eux-mêmes aux types d'applications développées dans l'étude des processus d'urbanisation et de métropolisation.

Le système de gestion des bases de données se divise en trois modules de données géographiques et spatiales :

- ✓ Images de télédétection spatiale et aéroportées (ITSA).
- ✓ Bases de données géographiques et territoriales (BDGT).
- ✓ Modèle de représentation spatiale (MRS).
- ✓ Production de connaissances géographiques (PCG).

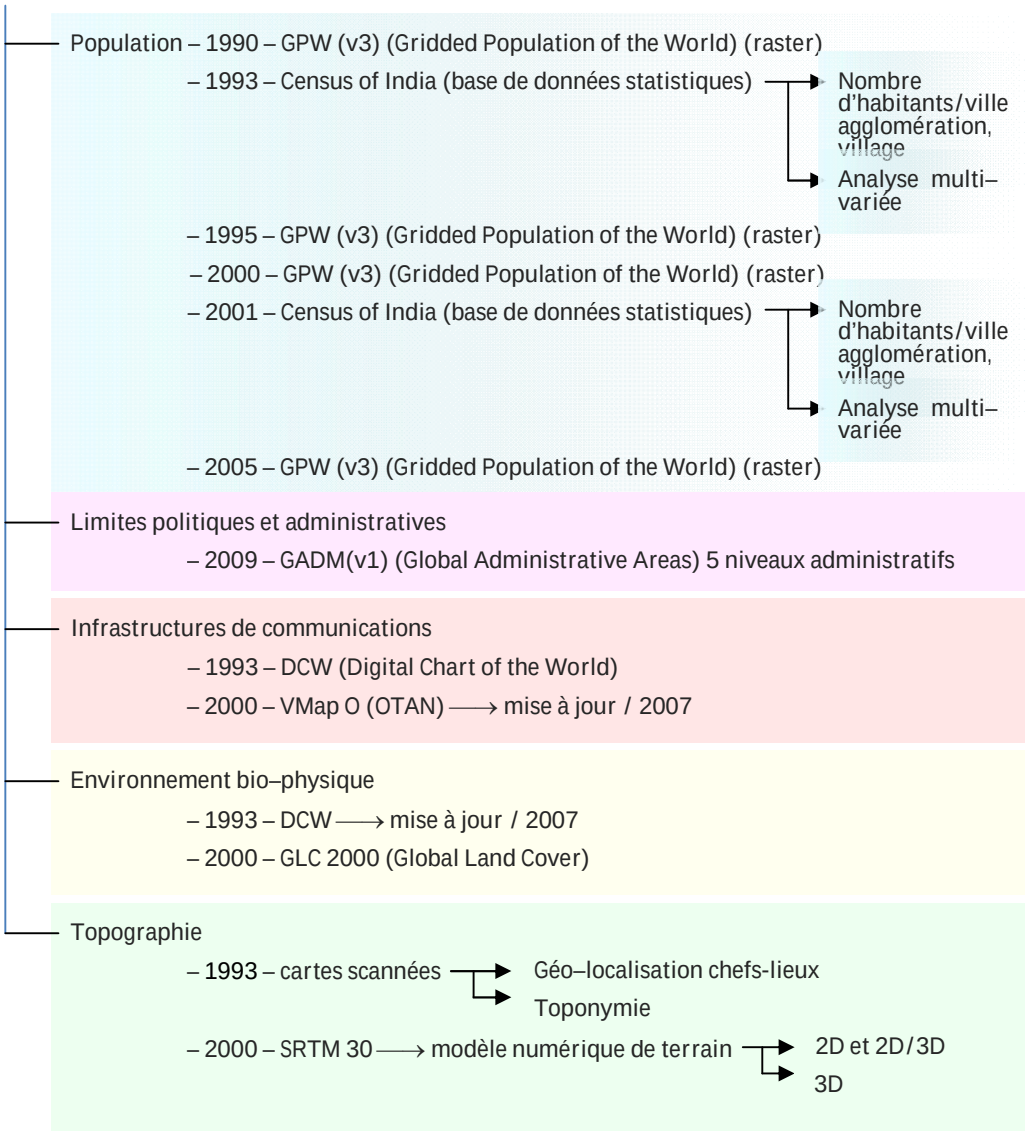
SGBD

Images de télédétection spatiale et aéroportée (ITSA)



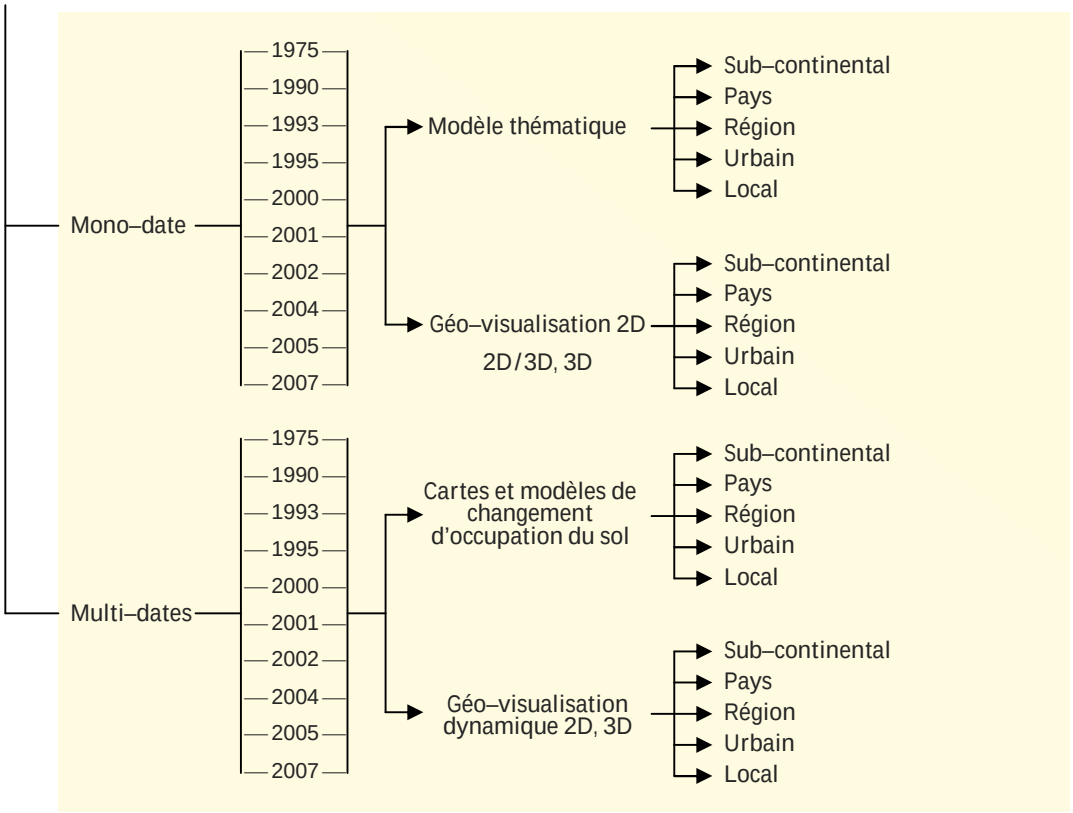
SGBD

Bases de données géographiques et territoriales

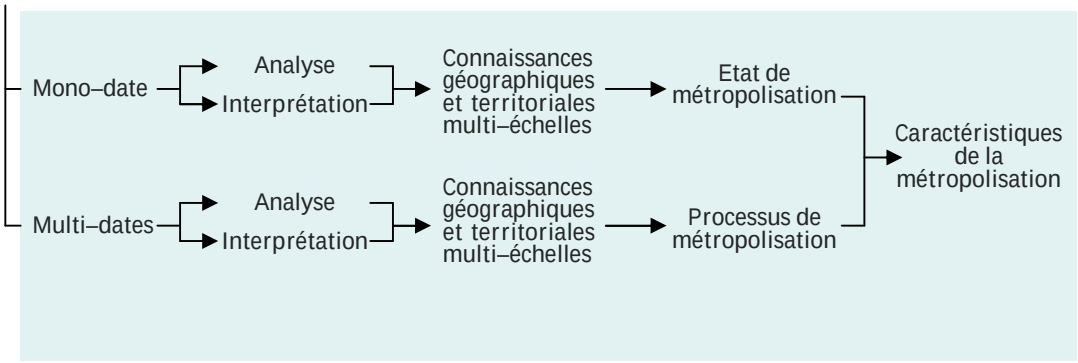


SGBD

Modèle de représentation spatiale



Production de connaissances géographiques



2.6.2. SIMULATION EMPIRIQUE ET GEO–VISUALISATION 2D/3D

MODELE DE SIMULATION NUMERIQUE

La simulation numérique est l'un des outils permettant de retraduire une réalité des processus géographiques. La simulation ou plutôt les simulations numériques en géographie sont essentiellement des modélisations spatialisées de la réalité des transformations de l'espace géographique ou de scénarii(s) possibles d'évolution. Elle donne, en ce sens, un caractère scientifique à ce type de démarche géographique.

Les simulations numériques sont basées, pour l'essentiel, sur des modèles spatiaux et géographiques théoriques qui vont être testés et confrontés à la réalité des dynamiques géographiques en utilisant des modélisations mathématiques mises en œuvre informatiquement. Les résultats des simulations sont visualisés sous la forme de graphiques et d'images.

Le développement de la simulation numérique en géographie tend à se développer pour probablement devenir une démarche indispensable à la compréhension et à la représentation des phénomènes, processus et dynamiques géographiques. Elle se heurte cependant à deux aspects : les modèles de simulations morphologiques et morphogénétiques qui sont basés sur la modélisation de l'évolution des formes géographiques et spatiales, à l'instar des modèles fractals, rendent compte de l'évolution spatiale d'une agglomération ou de sa morphogénèse de façon très satisfaisante. Mais ils ont un « pouvoir » explicatif faible. A l'inverse, les modèles fondés sur les systèmes multi–agents (SMA) permettent d'analyser les interactions entre les agents (les objets géographiques) et d'avancer dans la compréhension des mécanismes géographiques et dans l'élaboration de règles géographiques. Dans la simulation par agents (géographiques), les différentes entités géographiques et spatiales interagissent entre elles. Elle positionne le géographe dans des analyses asynchrones. La difficulté de spatialiser le réel est une des limites de cette approche. Les résultats des simulations par agents rendent mal compte de l'évolution spatiale d'un territoire urbain par exemple.

L'intérêt des démarches par simulation tient à l'idée de représenter le réel, l'espace géographique, ses évolutions, dynamiques et transformations, en se basant sur des postulats théoriques. Ces modèles spatio–géographiques sont construits pour simuler des processus et décrire des phénomènes géographiques précis : la croissance urbaine, la transformation des parcelles forestières, etc. Les modèles de simulations développés en géographie sont essentiellement des simulations discrètes, qu'elles soient asynchrones (*time-slicing*) ou synchrones (*event-sequencing*).

Le modèle de simulation dynamique empirique est développé à partir des résultats des séquences d'images satellites et aéroportées et de bases de données géographiques (MNT, réseau de transport, etc.). Il se distingue de la plupart des modèles de simulation en géographie par le fait qu'il ne se base pas sur les modèles théoriques et les règles spatiales servant à élaborer les simulations mais sur le caractère empirique des mesures séquentielles faites sur dix, vingt, trente ans (Afrique de l'ouest, Inde du nord-ouest, Pays baltes) ou sur plus de cent ans (Kaunas, Lituanie). Le caractère discontinu et daté des mesures spectrales de la portion d'espace géographique étudiée place ce modèle dans la catégorie des simulations à évènements discrets :

- ✓ Les mesures de télédétection permettent de reconnaître et d'identifier les changements d'états majeurs (et mineurs).
- ✓ Les variables d'états utilisées sont discrètes. Ce sont les objets géographiques.
- ✓ Les variables et l'espace d'état (la portion de l'espace géographique couverte par les scènes satellites ou aéroportées) sont finies et dénombrables.
- ✓ On mesure les changements d'états (les évènements) de manière discrète dans le temps à un instant donné.

La fusion dans le modèle de données et informations géographiques issues des bases de données géographiques (MNT, routes, etc.) permet de renforcer le caractère explicatif ou du moins structurant de la topographie, des infrastructures de transport, etc.

La simulation spatiale à évènements discrets permet l'étude du comportement d'un territoire au cours du temps grâce à la génération des évènements (les changements) caractérisant la portion de l'espace géographique étudiée (Erard, Déguénon, 1996) (Fleury, Lacomme, Tanguy, 2006).

Le modèle de simulation à évènements discrets créé peut être rapporté à une démarche conduisant à la construction et à l'enrichissement de connaissances géographiques. Démarche de production de connaissances géographiques qui est basée sur le modèle spatial de simulation empirique, qui lui-même, découle de la construction d'un système géographique d'information et de modélisation territoriale (SGIMT), système hybridé, intégrant télédétection–SIG–modélisation spatiale–Géo–visualisation.

Le niveau de véracité et la finesse du modèle de simulation à évènements discrets généré tiennent, pour l'essentiel, aux caractéristiques des images de télédétection utilisées et aux méthodologies d'analyse et de traitement d'images à produire de l'information géographique.

Le choix de s'appuyer sur des logiques empiriques, c'est-à-dire, à partir de mesures d'une réalité géographique et physique tangible, vise à coller au maximum à la réalité des processus géographiques, d'analyser leurs impacts socio–environnementaux, d'en évaluer les conséquences possibles. Il se base sur une réalité géographique a posteriori qui s'inscrit en aval des dynamiques de transformations sociales avec la mesure de l'inscription physique de la territorialisation (métropolisation) au travers de l'utilisation et de l'aménagement de l'espace géographique par les sociétés.

Tableau 14 : caractéristiques du modèle de simulation empirique.

Problématique	Compréhension des processus spatiaux de métropolisation.
Paramètres	Temps Objets géographiques urbains (bâtis, centres urbains). Réseau de communication. Topographie. Hydrologie. Etc.
Modèle	Simulation à évènements discrets.
Interface de représentation	Géo–visualisation 2D, 2D/3D ou 3D.

Fleury, G., Lacomme, P., Tanguy, A. (2006). *Simulation à événements discrets. Modèles déterministes et stochastiques. Exemples d'applications implémentés en Delphi et en C++.* Paris : Eyrolles.

Erard, J.-P., Déguénon, P. (1996). *Simulation par événements discrets. Concept et réalisations en SIMULA, ADA et SMALLTALK.* Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.

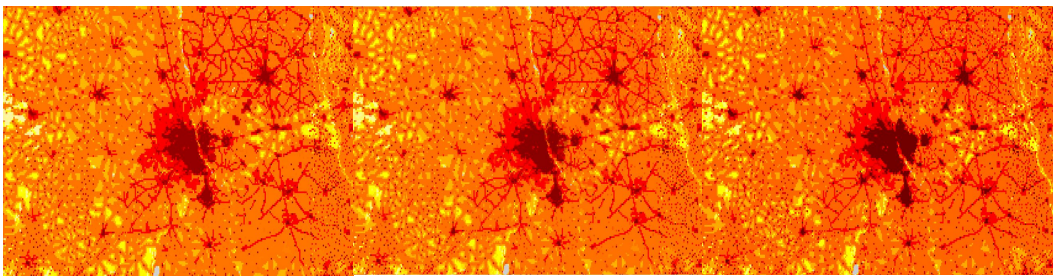
TEMPS, MOUVEMENT ET DYNAMIQUE

L'intégration de la dimension dynamique dans la modélisation des processus d'urbanisation et de métropolisation vise à présenter le caractère « non statistique » des transformations territoriales en cours. L'intégration des différents temps de l'urbain sous une forme dynamique donne une représentation continue des transformations territoriales actuelles et passées. La cartographie dynamique de l'urbanisation, en 2D comme en 3D, permet de mieux appréhender visuellement la réalité des processus géographiques urbains qui

sont, par essence, complexes par le nombre d'objets géographiques en mouvement et en interaction.

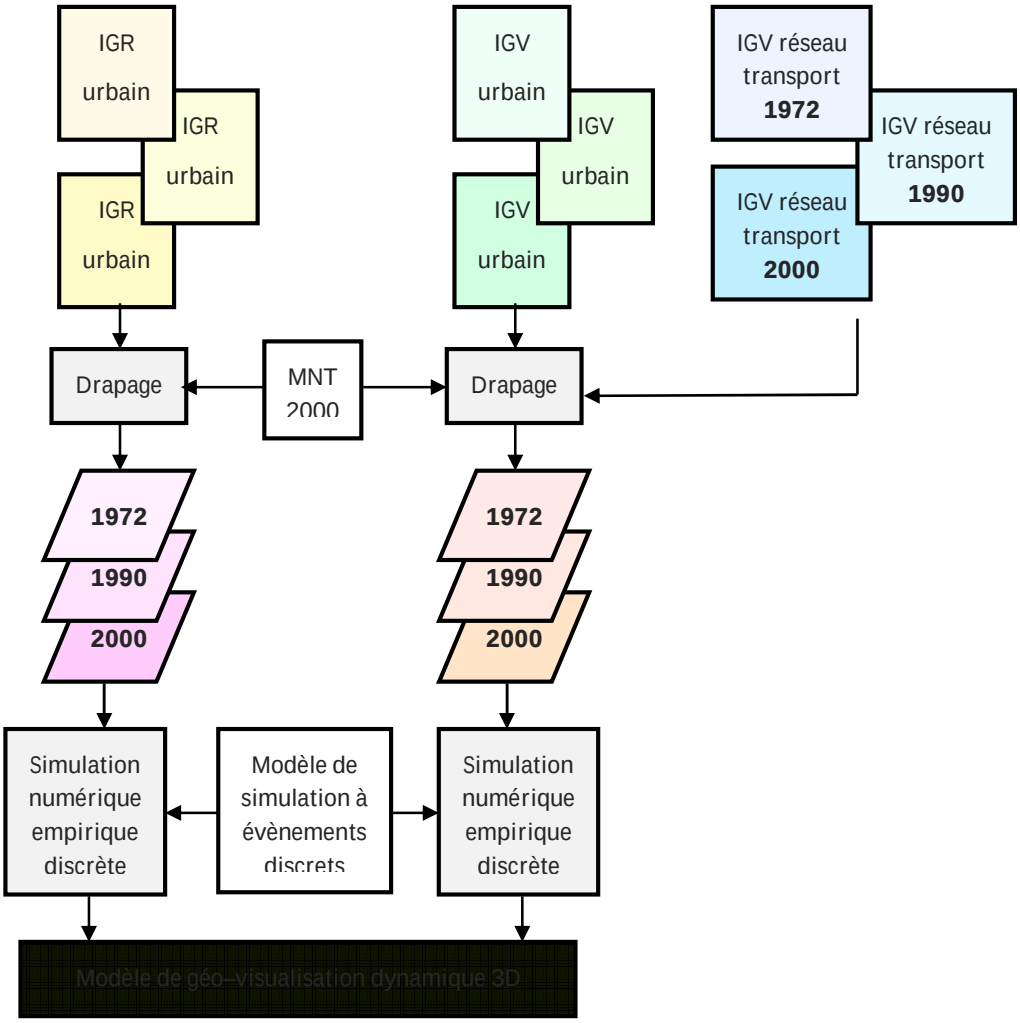
Figure 69 : extrait d'une simulation de la croissance urbaine de la région de Delhi entre 2002 et 2006, Inde.

Temps T : 2002 Temps T+2 : 2004 Temps T+4 : 2006



Avec la modélisation dynamique de l'espace géographique urbain, le temps se confond avec la notion de mouvement, de transformation. La mise en mouvement temporelle et visuelle de la territorialisation fait que le temps s'amalgame avec la notion de dynamique. La dynamique n'est pas le temps, mais elle se définit comme la succession de cartes et d'images de l'urbanisation élaborées à différents pas de temps.

Figure 70 : organigramme méthodologique.



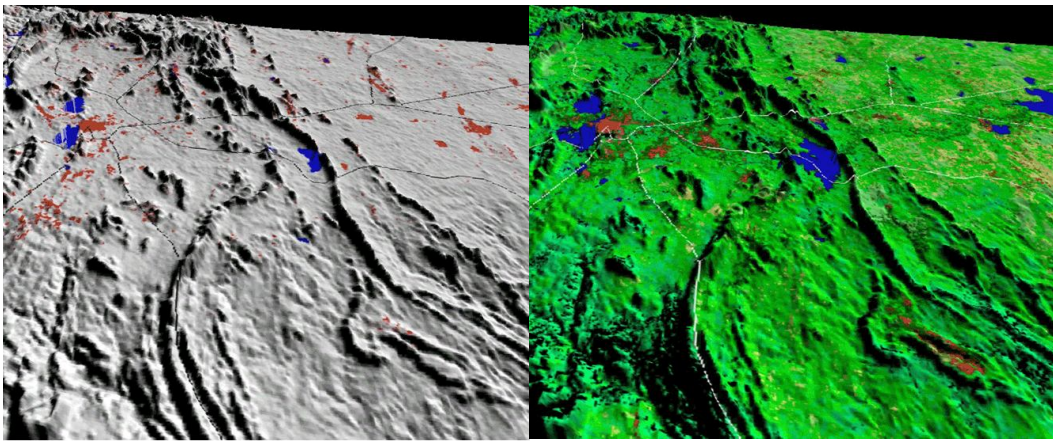
Le caractère dynamique du modèle de simulation empirique de géo–visualisation 2D ou 3D permet :

- ✓ De donner au géographe une vision synthétique, intuitive et évolutive des phénomènes et processus territoriaux étudiés.
- ✓ De représenter sous une forme dynamique une réalité spatiale des transformations territoriales en cours formalisée sous la forme d'informations géographiques–objets.

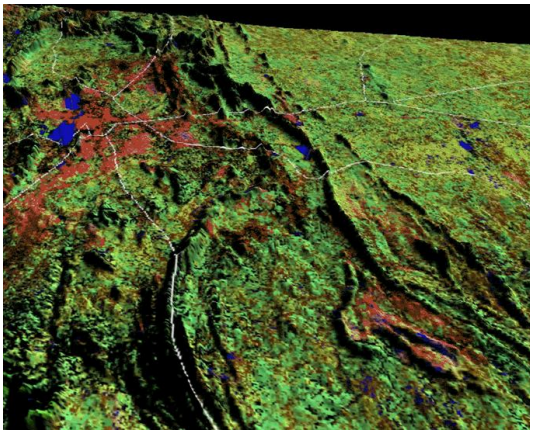
- ✓ Il représente géo–spatialement le « comportement » (dynamique) de certains objets géographiques transformant le territoire, donnant une valeur « transitoire » aux processus modélisés par simulation.

Figure 71 : géo–visualisation 3D de la simulation empirique de la croissance urbaine de la région d'Udaipur, Inde.

Temps T : Udaipur 1975 Temps T +15 : Udaipur 1990



Temps T+25 : Udaipur 2000



Le modèle de géo–visualisation dynamique 3D se caractérise par l'intégration conjointe de la géo–visualisation 3D et des représentations dynamiques pour figurer l'évolution d'objets géographiques urbains. Les systèmes d'information géographiques temporels 3D dynamiques résultent de la combinaison, puis de la fusion de trois éléments dans le SIG : le temps, la dynamique et la représentation 3D, auxquels il faut y ajouter la dimension géographique multi–scalaire (échelles de figurations cartographiques et images). La fusion du contenu des couches d'informations ou de données géographiques concernées crée une nouvelle information géographique, parfois inédite. Le temps est modélisé à travers la fusion diachronique des spatio–cartes des territoires urbanisés, elles-mêmes générées par une série de traitements images effectués à partir de données

satellites. Chaque résolution spatiale renvoie à un niveau propre d'analyse géographique et de géo–visualisation des dynamiques d'urbanisation, de l'échelle du bâti à celle de la fédération indienne.

Il améliore sensiblement les analyses qui peuvent en être faites et les connaissances géographiques produites. La représentation de la croissance urbaine en 3D et sous une forme dynamique rend aisée la géo–visualisation de l'intensité, la portée spatiale et les impacts des phénomènes d'urbanisation sur le territoire. Elle rend accessible et intelligible la représentation de phénomènes géographiques complexes. En ce sens, l'intégration conjointe de la géo–visualisation 3D et des représentations dynamiques pour figurer l'évolution d'objets géographiques urbains améliorent sensiblement les analyses qui peuvent en être faites et les connaissances géographiques produites.

Elle permet de mesurer, caractériser et modéliser les transformations socio–spatiales en prenant en compte conjointement la globalité et les particularités locales du processus d'urbanisation à différentes échelles géographiques et temporelles, d'identifier les conséquences géographiques et, à certains niveaux spatiaux, les impacts environnementaux. La géo–visualisation dynamique 3D participe en ce sens à une nouvelle forme d'intelligibilité territoriale.

Cependant, en rendant accessible et intelligible la représentation de phénomènes géographiques complexes (Malinverni et al., 2002), la géo–visualisation rend des services inégalables et son potentiel de développement est considérable. L'introduction de la représentation 2D/3D pour géo–visualiser la structure des espaces urbanisés qui ont été extraits à partir des images satellites et modélisés (Gadal, 2003; Niebergall et al., 2006), permet d'analyser et de comprendre plus facilement l'organisation des territoires. Intégrés dans un système d'information géographique, structurés, mis en relation avec d'autres informations géographiques comme, par exemple, les modèles numériques de terrain représentant les formes du relief, les axes routiers, les modèles géographiques produits donnent une représentation spatialisée de l'évolution urbaine des territoires.
La conception et l'emploi de modèles spatiaux et géographiques de simulation ont posé depuis une vingtaine d'années les jalons de nouveaux questionnements théoriques et méthodologiques sur l'étude de la transformation des territoires en cours et la manière de les étudier en géographie. Questionnements théoriques qui se sont focalisés, pour l'essentiel, avec le développement des SMA sur les notions de complexité.

MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN (MNT)

La représentation 3D est basée sur la construction de modèles numériques de terrain sur lesquels sont fusionnés, à une ou plusieurs dates, les états de l'étalement urbain à une échelle géographique donnée, locale, régionale ou globale. La caractérisation multi–scalaire de l'urbanisation 3D dynamique renforce le niveau de compréhension des processus géographiques en cours aux échelles globale, régionale et locale.

Les modèles numériques de terrain (MNT) sont une représentation en trois dimensions d'une portion de l'espace géographique représentant des valeurs altimétriques numérisées sous la forme d'une matrice de pixels ou de points (Podobnikar, 2010).

Le modèle numérique de terrain est une des informations clé donnant une facilité de compréhension et de lecture des processus géographiques d'urbanisation et de métropolisation en cours. L'intégration de MNT dans le modèle de géo–visualisation 3D permet, à la fois, de prendre en compte des variables de « contraintes » explicatives comme la topographie et de se rapprocher du regard (vision) du géographe sur le territoire par la verticalisation de la représentation spatiale (avec l'intégration de la troisième dimension).

Elle montre le rôle prépondérant de la structure de l'espace géographique sur la nature et les formes prises par les mutations territoriales avec, comme facteurs géographiques premiers, l'urbanisation et la métropolisation. L'utilisation de MNT permet de prendre en compte le relief comme un facteur géographique explicatif conséquent à l'implantation, à la présence et aux formes de développement des lieux urbains.

Longtemps, la production et l'usage de MNT ont été réservés au domaine militaire. En l'espace de quelques décennies, les techniques d'acquisition se sont considérablement développées de pair avec la précision altimétrique et la couverture géographique. Auparavant, le coût d'acquisition élevé limitait l'utilisation des MNT à certaines portions de l'espace géographique. Aujourd'hui, plus des trois quarts des terres émergées ont été numérisées. La mission de la navette Endeavour, en février 2000, a permis d'obtenir pour l'ensemble des États-Unis, des MNT d'une résolution de trois secondes d'arc (90x90 mètres) et de une seconde d'arc (30x30 mètres) par interférométrie radar.
En septembre 2003, les États-Unis ont rendu ces données publiques, mettant fin à l'hégémonie militaire sur les MNT même si certaines données ont été volontairement altérées pour des raisons de sécurité nationale. Leur libre accès place les utilisateurs étrangers sous la dépendance directe des USA en termes d'acquisition, de diffusion, de qualité et d'applications possibles. Du fait du

développement continu de traitements informatiques plus performants et moins onéreux, la production et l'exploitation de MNT sont en passe de se généraliser, notamment pour la modélisation des dynamiques urbaines et des processus de métropolisation.

EXEMPLE DE L'AXE DELHI–MUMBAI (INDE)

La génération des cartes 3D dynamiques se fait par des fusions successives des informations géographiques produites par télédétection spatiale, à savoir les surfaces couvertes par les objets urbains entre 1975 et 2007. Le MNT, couvrant la zone d'étude, est fusionné avec les spatio–cartes vectorielles ou rasters mosaïquées, c'est-à-dire, assemblées entre elles pour couvrir la totalité des mille cinq cents kilomètres du corridor Delhi–Mumbai. Les fusions, MNT/spatio–carte, de l'urbanisation sont faites à chaque date de prise de vue des images satellites. La génération de la simulation dynamique se fait par le séquençage des images aux différentes dates sur le modèle numérique de terrain.

Tableau 15 : tableau des MNT SRTM mosaïqués et intégrés dans le SGIMT (axe Delhi–Mumbai).

ID	Ville	État	MNT1	MNT2	MNT3
1	Chandigarh	Penjab & Haryana	u03_p147r039		
2	Delhi	Territoire capital	u03_p146r040	u03_p147r040	
3	Jaipur	Rajasthan	u03_p147r041		
4	Bhilwara	Rajasthan	u03_p147r042	u03_p147r043	u03_p148r042
5	Udaipur	Rajasthan	u03_p148r043		
6	Ahmadabad	Gujarat	u03_p148r044		
7	Ahmadnagar	Maharashtra	u03_p146r047		
8	Aurangabad	Maharashtra	u03_p146r046		
9	Bhopal	Madhya Pradesh	u03_p145r044		
10	Dhule	Maharashtra	u03_p147r045	u03_p147r046	
11	Guna	Madhya Pradesh	u03_p146r043		
12	Indore	Madhya Pradesh	u03_p146r044		
13	Surat	Gujarat	u03_p148r045		
14	Navsari	Gujarat	u03_p148r046		
15	Mumbai	Maharashtra	u03_p148r047		
16	Agra	Uttar Pradesh	u03_p146r041		
17	Moradabad	Uttar Pradesh	u03_p145r040		
18	Dehra Dun	Uttar Pradesh	u03_p146r039		
19	Gwalior	Madhya Pradesh	u03_p146r042		
20	Ulhasnagar	Maharashtra	u03_p147r047		
21	Burhanpur	Madhya Pradesh	u03_p146r045		
22	Ratlam	Madhya Pradesh	u03_p147r044		

Les MNT utilisés sont issus à la suite d'une campagne d'acquisition spatiale menée par la navette spatiale Endeavour en février 2000 au cours d'une mission de onze jours autour de la Terre.

L'altitude de prise de vue était comprise entre 190 et 270 km avec une inclinaison de 71 degrés. Ces données ont été acquises par interférométrie radar entre le 56e degré de latitude Sud et le 60e degré de latitude Nord. Cette campagne a permis d'obtenir des MNT pour environ 80% des terres émergées. Les MNT générés, les SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), ont été produits par la NASA et la NGA (*National Geospatial Agency*). Ils sont distribués gratuitement par l'USGS (*United State Geological Survey*) depuis 2003. Les SRTM se présentent comme des images rasters codées sur 16 bits dans le système de projection géodésique UTM WGS 84. Trois niveaux de résolution spatiale ont été produits : les SRTM 1 destinés exclusivement aux USA (30x30 mètres), les SRTM 3 (90x90 mètres) pour l'ensemble de la surface de la Terre, les SRTM 30, issus du GTOPO 30 d'une résolution de 930x930 mètres. Les MNT utilisés en Inde sont des SRTM Level 2.0 d'une résolution 30x30 mètres (soit plus de 1 Téra octets de données). Le système de coordonnées géodésiques est commun.

Figure 72 : phases de création du modèle numérique de terrain.

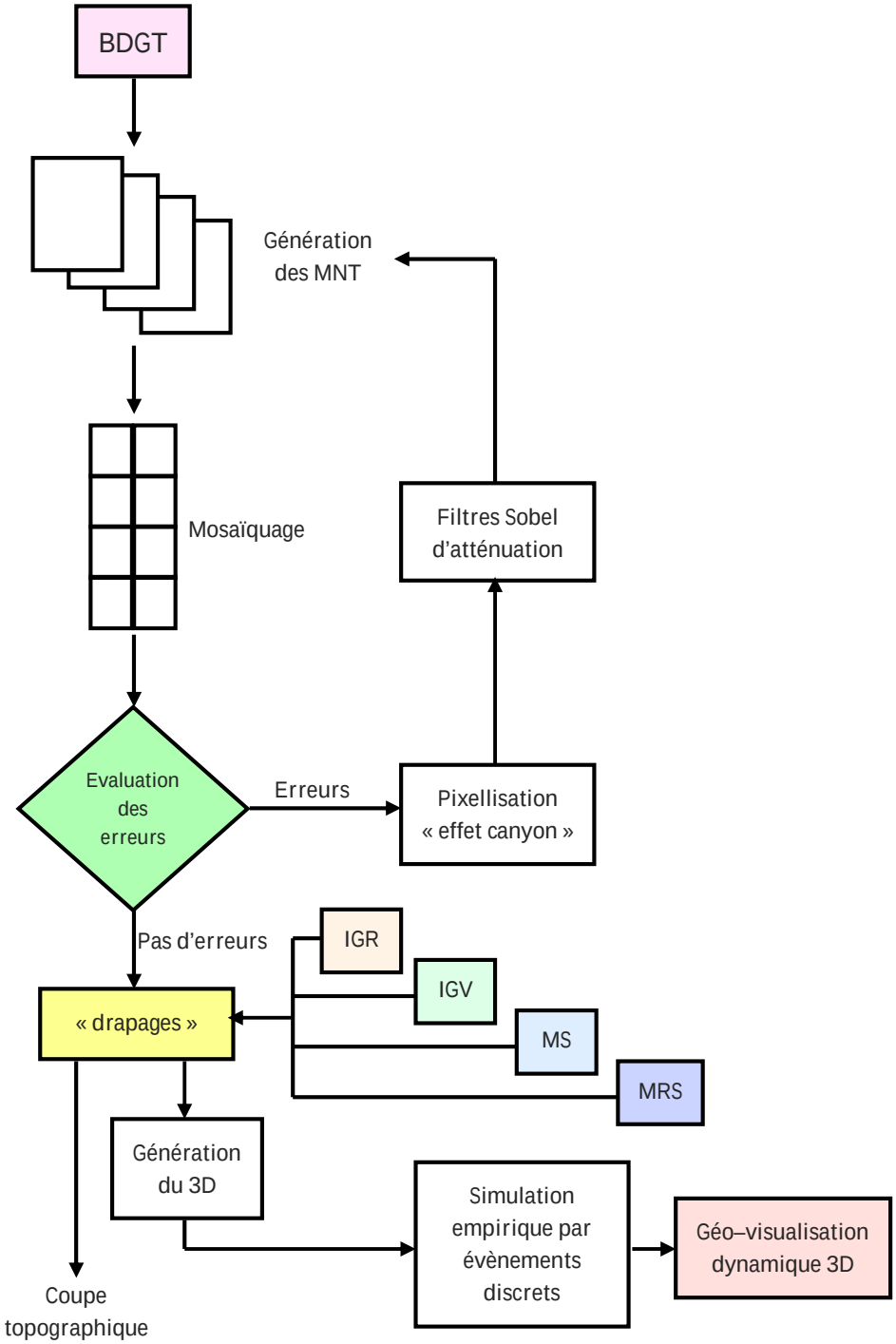
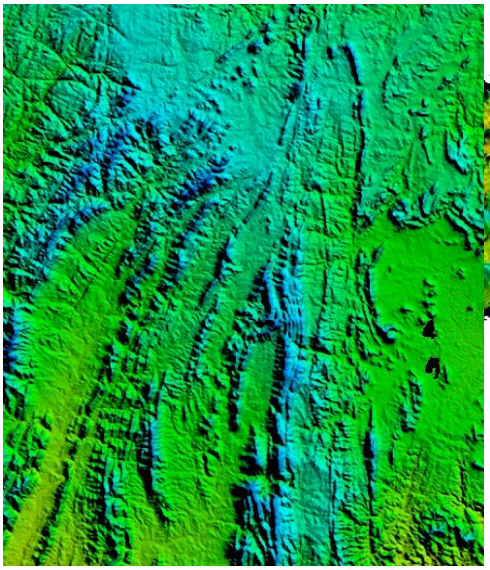
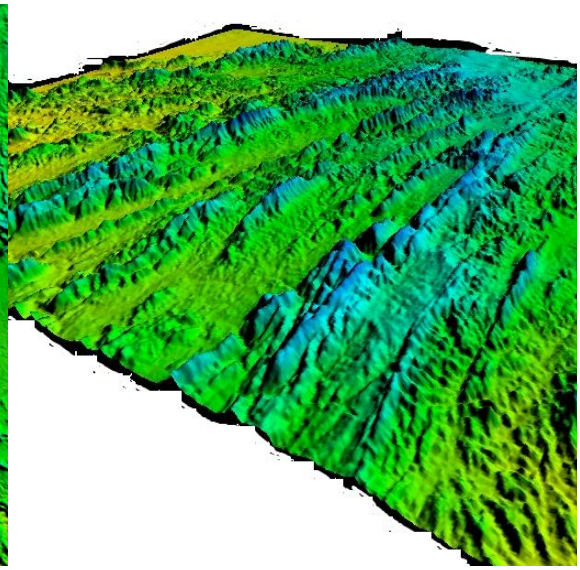


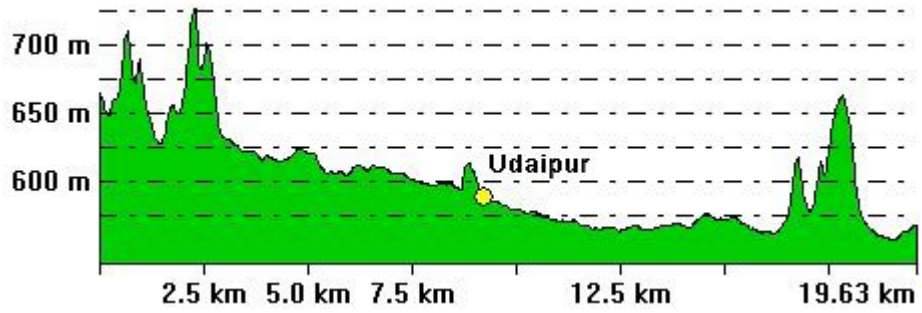
Figure 73 : génération du MNT de la région d'Udaipur (Inde).

Géo–visualisation 2D



Géo–visualisation 3D

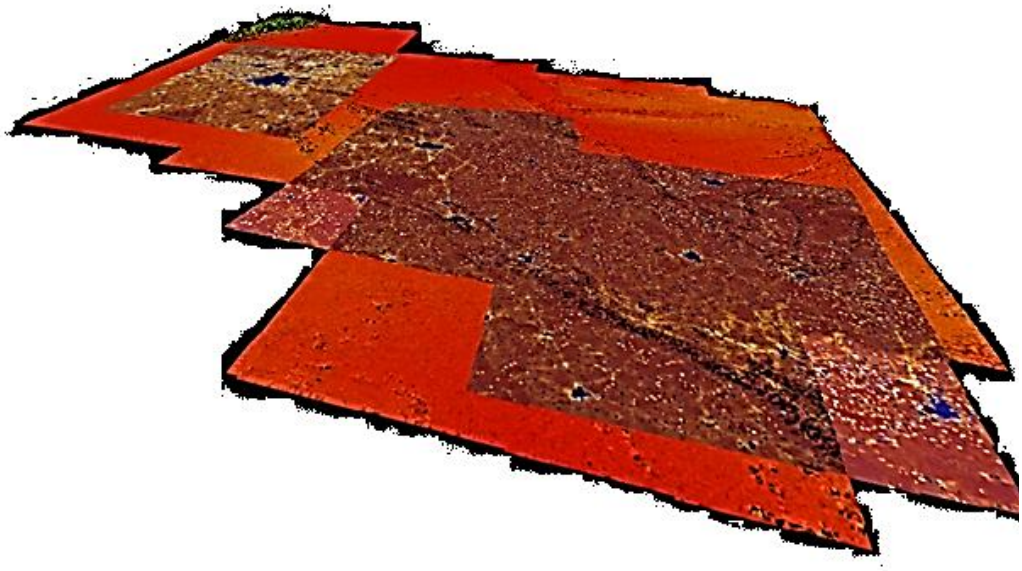




Calcul du profil topographique

Deux types de fusion MNT/spatio–cartes de l'urbain ont été générés avec les images Landsat-1, 5, 7, Spot-3, 5 et Kompsat-2 : celui associant les spatio–cartes vectorielles d'étalement de l'urbain, ceux fusionnés avec la répartition des objets bâtis. Les MNT SRTM créés dans l'analyse des processus d'urbanisation du corridor Delhi–Mumbai couvrent des surfaces de 34255 km² pour une résolution spatiale de 90x90 mètres. La fusion du MNT avec les spatio–cartes de densité de bâti produites à partir des images satellites DMSP F-15 montre l'ensemble du processus d'urbanisation sur la totalité du corridor de développement urbain Delhi–Mumbai.

Figure 74 : extrait du MNT Delhi–Mumbai, Inde (Delhi–Ahmedabad) fusionné avec le résultat de l'extraction des centres urbains à partir d'une scène DMSP-OLS en 2007.



Les images DMSP donnent une représentation globale des mutations de l'espace géographique sur la totalité des mille cinq cents kilomètres du corridor de développement Delhi–Mumbai et des centres urbains de plus d'un million d'habitants. En revanche, seules les images métriques à haute résolution spatiale (comme Kompsat-2 ou Ikonos 1A) permettent d'analyser les processus d'urbanisation et de changement d'occupation des sols au niveau du bâtiment et de la parcelle. Ces images satellites peuvent être utilisées, par exemple, pour analyser des fonctions socio-économiques des bâtiments ou pour identifier des zones de conflit d'usage du sol générées par l'urbanisation (Gadal, 2009). En revanche, la taille de ces images alourdit considérablement celle du SIG et nécessite des puissances considérables de calcul pour intégrer en un seul fichier le modèle numérique de terrain et obtenir une visualisation en 3D dynamique.

LIMITES

Les limites de la cartographie 2D/3D dynamique ne sont ni conceptuelles, ni méthodologiques. La qualité et le niveau de précision des modèles de simulation et de géo–visualisation dynamique 3D dépendent des informations géographiques employées ou générées à partir de modèles numériques de terrain et d'images satellites pour l'essentiel. Les erreurs détectées sont en général de trois types :

- ✓ Celles imputables au logiciel utilisé (ENVI générant de fortes pixellisations). L'utilisation d'un filtre de Sobel permet d'atténuer la pixellisation.

- ✓ Celles liées à l'incapacité de gérer les cours d'eaux (effet « canyon ») et les lignes de côtes littorales. Le masquage des effets « canyons » avec des fichiers rasters par fusion permet de pallier visuellement à ce problème.
- ✓ Présence de pixels « aberrants » : absence de données altimétriques.

Figure 75 : exemple d'erreurs.
Effet « cayon », extrait du MNT du corridor Delhi–Mumbai, Inde.

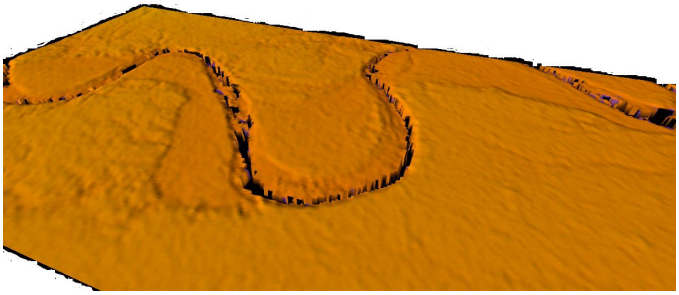


Figure 76 : exemple de pixels aberrants, Kaunas, Lituanie.
En noir : pixels aberrants. MNT corrigé (il reste des pixels aberrants sur le lac : utilisation d'un masque « eau »).

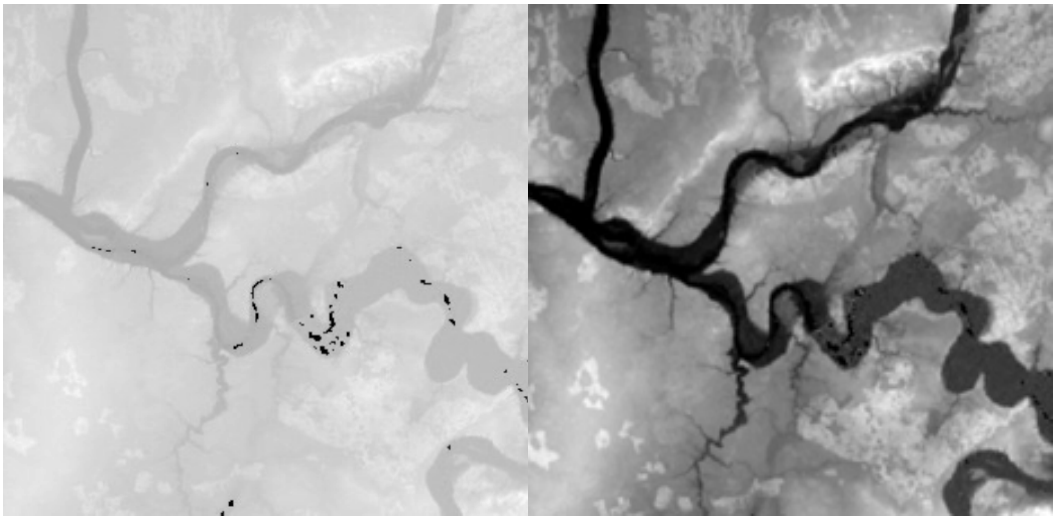


Figure 77 : génération du MNT, Kaunas, Lituanie.

Calcul du MNT en 3D, application du masque « eau » (fleuve Niémen et lac Kauno Mare).

Fusion avec le résultat de la reconnaissance et l'extraction du bâti en 2000 à partir d'une scène multi–spectrale Landsat-7 ETM+

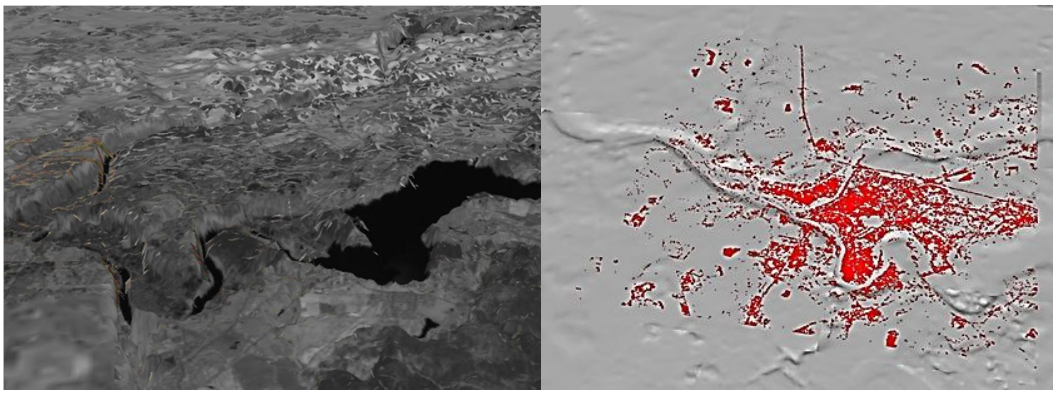
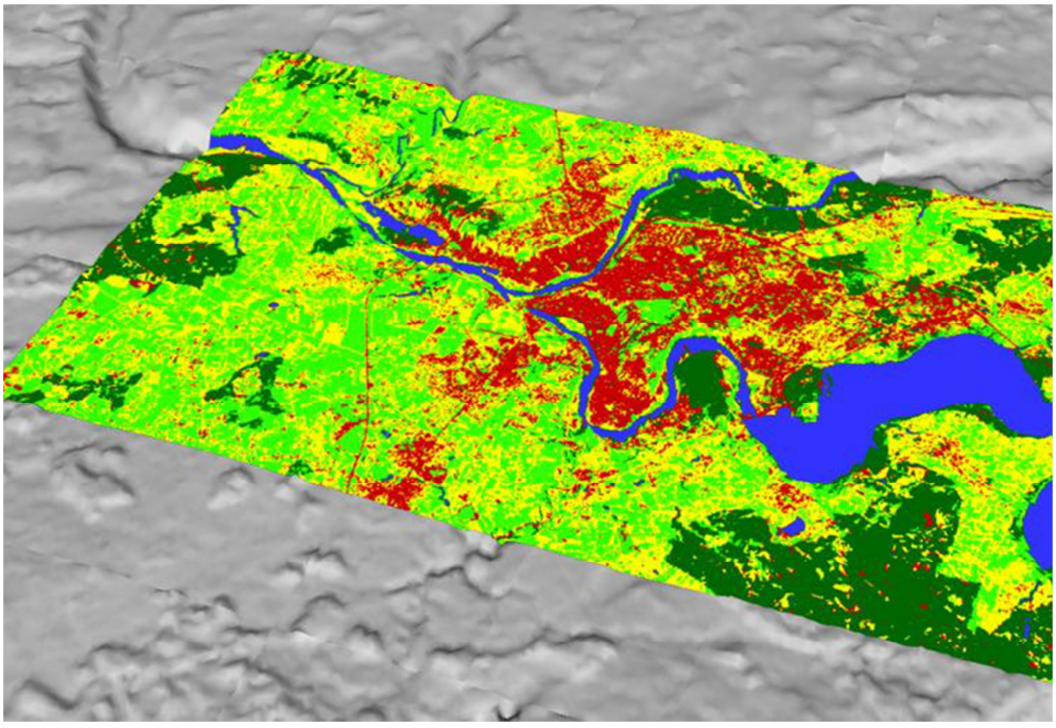


Figure 78 : MNT fusionné avec le résultat d'une classification de l'occupation des sols, Kaunas, Lituanie.

Fusion avec le résultat de la classification de l'occupation des sols en 2007 produite à partir des données multi–spectrales Landsat-7ETM+



La résolution spatiale des MNT, des spatio–cartes, leur capacité de restitution de la réalité du terrain et des processus territoriaux dépendent de l'échelle

d'application. La gestion et le traitement de larges bases de données géographiques, les coûts et les temps de production sont actuellement les facteurs limitant l'application de la géo–visualisation 3D en urbanisme (Kwan et al, 2005 ; Zhu et al, 2008 ; Zhu et al, 2009).

Pour des applications à l'échelle régionale, la plus faible précision est compensée par des surfaces couvertes plus importantes de l'ordre de la centaine de kilomètres. Le niveau de résolution spatiale des MNT est primordial lorsque le relief est peu marqué. Il permet de mettre en évidence ou non les variations d'altitude. Les résolutions spatiales des images Landsat, Spot et des MNT de type SRTM level 2.0 permettent de bien modéliser les dynamiques urbaines aux échelles régionales. Par exemple, pour des applications à l'échelle du bâtiment ou de l'îlot urbain en aménagement, on aura recours à des MNT produits à partir de relevés GPS et des images de télédétection d'une précision centimétrique. Ces approches sont adéquates pour des petites surfaces mais ne peuvent être utilisées à l'échelle des agglomérations ou des réseaux d'agglomérations, c'est-à-dire, à des territoires couvrant plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres.

2.7. ONTOLOGIE DE L'ESPACE GEOGRAPHIQUE, LIEU-OBJET ET THEORIE SEMANTIQUE DE LA REPRESENTATION DES DONNEES SPATIALES

2.7.1. ELEMENTS ONTOLOGIQUES DE L'ESPACE GEOGRAPHIQUE

La recherche d'ontologies géographiques universelles capables de représenter sémantiquement l'espace géographique et ses multiples dynamiques constitue un des axes de recherche majeur pour certains géomaticiens européens et nord-américains. L'enjeu de ces recherches est de contribuer à l'élaboration de nouvelles théories et modèles sémantiques SIG. Ces recherches ont fait l'objet d'un certain nombre de recherches dans les années 1990, puis ont quasiment disparues dans les années 2000.

La télédétection, les systèmes d'information géographiques, la modélisation spatiale, la cartographie, donnent une représentation formalisée et une explication de l'organisation de la surface de la Terre, l'espace géographique. Elles mesurent les formes d'organisation territoriale structurant le continuum géographique et spatial par la reconnaissance et l'identification géo–localisée des objets et des lieux géographiques.

Localisations, objets et lieux sont des éléments ontologiques intrinsèques de l'espace géographique. Ils sont également des composants propres à l'information géographique. Ce sont des concepts–clés, des éléments géographiques définissant la notion d'espace géographique.

La définition de l'espace géographique, donnée par des géographes français (Brunet, Ferras, Théry, 1992), (Pumain, Saint-Julien, 2004), met l'accent sur ces trois concepts ontologiques. Le concept d'espace géographique est basé sur la localisation, le lieu et l'objet géographique, qui peut être une réalité humaine ou « naturelle », ou une réalité géographique construite, pensée et idéalisée. L'espace géographique est le produit des interactions et des interrelations entre lieu–objet et peut être formalisé par la logique Tout–Partie (Ferrier, Hubert, Nicolas, 2005). En télédétection, en SIG, l'espace géographique est généré par la reconnaissance et la représentation des objets géographiques et les interrelations entre eux. L'ensemble des approches est basé sur le processus de différenciation lieu–objet. La différenciation peut résulter de la reconnaissance des objets géographiques, la reconnaissance des lieux géographiques ou de la reconnaissance des objets et des lieux géographiques. Leur identification est basée sur la détection

Les lieux géographiques, les objets et les limites identifiées sont fondés sur une réalité humaine et physique : le continuum surface de la Terre conceptualisé en géographie par la notion d'espace géographique. Il résulte d'une réalité

géographique conceptualisée et produite par la société (par exemple les villes) ou par une réalité physique existante, sémantiquement définie par les géographes (par exemple, les montagnes, les mers, les rivières). Ces objets géographiques peuvent être classés comme des *Fiat objets* (Smith, 2001).

Plusieurs de ces axiomes géographiques, les ontologies communes de l'espace géographique, ont été présentés par Georges Nicolas–O dans *L'espace d'origine. Axiomatisation de la géographie* (Nicolas–O, 1984). L'espace géographique est défini comme la relation entre les objets. L'espace géographique est la relation entre les objets (axiomatique définie) sur la surface de la Terre. Les axiomes de la géographie sont au nombre de trois :

- ✓ l'axiome chorologique : peut être n'importe quel objet géographique (tangible ou intangible) qui différencie l'espace terrestre.
- ✓ L'axiome de situation: peut-être tout objet géographique, matériel ou immatériel, en rapport spatial avec un objet situé en un autre lieu de la Terre.
- ✓ L'axiome de succession: peut-être tout objet géographique tangible ou intangible dont les rapports non exclusivement spatiaux s'accordent avec des successions observées.

Il a les propriétés suivantes :

- ✓ Non réciprocité et non linéarité des distances entre les objets géographiques.
- ✓ Entre deux objets spatiaux, la ligne droite n'est pas nécessairement la plus courte.
- ✓ La somme spatiale géographique des parties (de sous–ensembles d'objets géographiques) dans un tout géographique est une ultra-totalisation (logique Tout–Parties) (Nicolas–O, 1984).

Des essais de théorisation de la représentation de l'espace géographique ont été développés par Casati, Smith, Varzi (Casati, Smith, Varzi, 1998). Ils ont mis en évidence les notions ontologiques clés pouvant conduire à une théorisation de la représentation de l'espace géographique. Les lieux–objets sont des éléments ontologiques de bases de l'espace géographique qui tire sa substance de la théorie du Tout et des Parties (Simons, 1987) (Varzi, 2007). Le Tout constitue la totalité de la surface de la Terre, l'espace géographique, divisé en plusieurs Parties. Ils sont représentés dans les cartes, dans les bases de données géographiques, les SIG et la modélisation spatiale par deux ontologies géo–localisées de l'espace géographique : le lieu et l'objet.

2.7.2. OBJETS ET LIEUX GEOGRAPHIQUES

LIEUX, OBJETS, LOCALISATION ET ESPACE GEOGRAPHIQUE

L'objet géographique est un couple inséparable entre l'information et la localisation (Nicolas-O, 1984). Il est dans de nombreux cas le produit de la délimitation du continuum terrestre (Smith, Mark, 1998). La reconnaissance des objets géographiques par les approches spatiales, en particulier avec le traitement d'images de télédétection, dépend des caractéristiques intrinsèques des images satellitaires ou aériennes : les résolutions spatiales et spectrales utilisées, les méthodologies de traitement d'images employées pour générer l'information géographique, la reconnaissance et l'extraction des objets géographiques (classification spectrale, agrégation filtre passe-bas, analyse de texture, morphologie mathématique, etc.) et leur morphologie (les formes, les domaines, etc.) (Gadal, 2000). Les objets géographiques reconnus sont déterminés par le niveau de l'analyse géographique : les parcelles, les villes, les niveaux régionaux, etc.

Les objets géographiques identifiés dépendent des échelles et du niveau d'analyse géographique. Pour chaque niveau géographique et selon le sujet géographique, correspond un certain type d'objets géographiques. Une partie de ces objets géographiques structurant et organisant l'espace géographique sont indépendants de la perception et du produit des géographes comme, par exemple, les lacs, les maisons, les routes, les parcelles agricoles, etc. Une partie de ces objets géographiques résultant de la construction humaine comme les Etats ou générés par l'analyse spatiale : catégorisation des structures du paysage, distribution des populations, etc.

Certains auteurs comme Georges Nicolas–O postulent à l'existence de plusieurs espaces géographiques pour chaque type d'objets géographiques (Nicolas–O, 1984). Certains autres comme Barry Smith et Achille Varzi (Smith, Varzi, 2000) catégorisent les objets en Bona Fine (la Terre, une personne) ou comme Fiat (liés à un concept géographique). Il est difficile pour cette dernière catégorie, de déterminer précisément la limite, comme par exemple, un territoire metropolisé (Gadal, 2003) ou une zone bioclimatique (Burrough, Frank, 1996).

Les objets géographiques se réfèrent à l'existence de méta–réalités ou d'une réalité conceptualisée de la surface de la Terre - l'espace géographique. L'anthropisation de la Terre concerne l'ensemble de la surface terrestre plus ou moins directement et indirectement. L'espace géographique apparaît comme une explication globale de la société. Les différentes représentations et conceptualisations de l'utilisation de l'espace géographique déterminent de façon plus ou moins visible des objets définissant l'espace géographique.

L'analyse des processus géographiques, l'identification des structures spatiales, l'étude de l'organisation des territoires par télédétection, SIG, simulation, etc. génère des méta–réalités (formalisées, conceptualisées) de l'espace géographique. Elle se base sur l'utilisation d'ontologies géographiques universelles : l'objet, le lieu et la localisation. Ces ontologies géographiques, structurent l'information géographique tout autant qu'elles orientent les méthodes d'analyses et de traitements. Elles représentent un objet géo–localisé sur un lieu en SIG. Objet, lieu et localisation sont les entités de base qui servent à reconnaître, identifier et caractériser une entité géographique. Ce sont des ontologies structurant les méthodologies en télédétection et en SIG. On cherche en télédétection à identifier des objets géographiques, des lieux, etc.
Identifier les ontologies universelles de l'espace géographique suppose d'abord d'avoir les capacités de reconnaître, d'extraire et de visualiser sur des images numériques utilisées dans les systèmes de géomatique certains d'entre eux : lieux, objets et localisations. Ils sont reconnus, en traitement d'images par la détection et l'extraction de leurs caractéristiques homogènes ou/et leurs limites, générant une partition de l'image. Par extension, une segmentation de certaines parties de la portion de surface de la Terre analysée. Parties qui sont le lieu ou/et l'objet localisé avec le système de coordonnées. Ces trois composantes ontologiques de l'espace géographique, le lieu–objet–localisation, permettent de produire une description conceptualisée et formalisée de la surface de la Terre et peuvent être immédiatement intégrées dans le SIG ou représentées en traitement d'images.

RECONNAISSANCE DES LIEUX ET OBJETS GEOGRAPHIQUES (TOUT ET PARTIES)

La mise en évidence des lieux et des objets résulte des méthodes de production géographique. Le couple lieu–objet, les entités géographiques et spatiales, localisées et situées, constituent l'un des caractères ontologique de l'espace géographique. Il est utilisé intuitivement par les géographes pour analyser l'espace géographique.

La géographie, avec ou sans cartographie, a quelques constantes : la recherche de la description et la représentation de l'espace géographique fondée sur ses composants sémantiques : les objets géographiques. Ces descriptions et modes de formalisation, cartes, images, textes, etc. sont basés sur les processus de différenciation des composantes géographiques, physiques et humaines, structurant l'espace géographique : les limites pour différencier les objets physiques comme les montagnes, les terres, les frontières séparant les pays, etc. Ces objets géographiques, conçus et construits, sont les éléments intrinsèques de la surface de la Terre et de l'espace géographique : les Parties (les objets géographiques) d'un Tout (la Terre).

Tout et Parties constituent l'un des fondements conceptuel de la géographie, de la cartographie et de la géomatique. Ils structurent les représentations de l'espace géographique (Gadal, Nicolas, 2000).

La reconnaissance des parties, notamment en télédétection, traitement et analyse d'images passe par l'identification de leurs limites, des frontières (Gadal, 1998), des lieux, des formes et localisations. Le lieu, l'objet et la localisation sont les éléments de base ontologiques fondamentaux du concept d'espace géographique. Ils sont également les composants de base sémantique des représentations géographiques dans la cartographie, la télédétection et les SIG. Chaque objet géographique représenté en cartographie ou en SIG, a une localisation, est attaché à un lieu (constituant du lieu).

Face à l'utilisation de la logique Tout–Partie, les géographes ont adopté des attitudes différentes. Certains le voient comme quelque chose de si général qu'il n'a aucun intérêt pratique dans la géographie et la géomatique. D'autres, cependant, pensent que c'est le point de départ nécessaire pour comprendre le traitement de la segmentation spatiale par la reconnaissance des limites, des frontières, les gradients des objets géographiques : le processus menant à la création des connaissances géographiques grâce à la modélisation et à la représentation de l'espace géographique. D'autres géographes croient son caractère original trop rudimentaire et partiel. Pour nombre de spécialistes en sciences cognitives appliquées à la géographie, la logique Tout–Partie est un outil nécessaire pour analyser l'espace géographique (Casati, Varzi, 1999) et représenter en cartographie numérique, en SIG, par télédétection ou géo–visualisation les lieux-objets géographiques.

Si la logique Tout–Partie est nécessaire pour « penser comment géographier » et représenter l'espace géographique en géomatique, il est nécessaire d'utiliser le calcul mathématique et informatique pour différencier, reconnaître et identifier les lieux et les objets géographiques.

TELEDETECTION, TRAITEMENT D'IMAGE ET DIFFERENTIATION SPATIALE

Identifier les ontologies universelles de l'espace géographique suppose d'abord d'avoir les capacités de reconnaître, d'extraire et de visualiser sur des images numériques utilisées dans les systèmes de géomatique certains d'entre eux : lieux, objets et localisations. Ils sont reconnus, en traitement d'images de télédétection par la détection et l'extraction de leurs caractéristiques homogènes ou/et leurs limites, générant une partition de l'image, une segmentation dans certaines parties de la portion de surface de la Terre analysée. Parties qui sont le lieu situé ou/et l'objet localisé avec le système de coordonnées. Ces trois composantes ontologiques de l'espace géographique, le lieu–objet–localisation, permettent de produire une description conceptualisée et formalisée de la surface de la Terre et peuvent être immédiatement intégrées dans le SIG ou représentées spatialement ou cartographiquement.

La majorité des architectures de SIG est structurée pour la gestion et l'analyse d'informations géographiques monographiques. Chaque couche est composée d'une catégorie sémantique du lieu–objet. De nombreux SIG représentent l'espace géographique sous une forme de la monographie par une superposition de couches d'informations géographiques.

La reconnaissance des objets et des lieux se fait par la différenciation. Le processus de différenciation spatiale et géographique dépend des approches, des données et des méthodologies employées. Les caractéristiques des capteurs de télédétection et les méthodes de traitement ont un impact direct sur les résultats de la partition de l'espace géographique (Gadal, 2000).

Les démarches par télédétection permettent de reconnaître et d'extraire des objets et des lieux à partir desquels on construit une représentation de la réalité de l'espace géographique. Pendant longtemps, la description et la représentation de l'espace géographique ont été indissociables du processus de cartographie. Dans les approches géomatique et plus particulièrement en télédétection, la représentation et la cartographie de l'espace géographique sont faits avec l'extraction d'entités spatiales, les lieux–objets géographiques par la reconnaissance des lieux ou des limites des objets, la classification des caractères biophysiques similaires (par exemple, la radiométrie), etc. Ces traitements donnent une représentation segmentée de l'espace géographique en des lieux–objets. Les méthodes de traitement d'images conduisent à la reconnaissance et à l'extraction de structures spatiales homogènes, sans qu'il soit possible a priori de les nommer. Il est possible de détecter les formes de l'objet « pays » par exemple ou de l'objet « région » sans le nommer sémantiquement (Korzybski, 1998). Or chaque entité géographique en géomatique, comprend deux éléments : un lieu et

un objet. Le lieu et l'objet sont indissociables. Les relations géographiques entre lieu et d'objet qui résultent de la différenciation sont uniques. Aucun lieu d'un « pays » où lieu d'une « région » n'est pas a priori identique à tout autre « objet–pays » ou « objet–région ».

La reconnaissance et l'identification des lieux-objets dépendent des approches, des systèmes de mesure et des méthodologies utilisées :

- ✓ Des caractéristiques géographiques similaires, générant des lieux–objets géographiques homogènes (Gadal, 1998).
- ✓ Ou par leurs limites (Gadal, Jeansoulin, 1998) (Smith, Mark, 1998) (Smith, Varzi, 2000).

LA DIFFERENCIATION SPATIALE

La différenciation comme méthode d'analyse de l'espace géographique renvoie à une différence « interne » de chaque entité géographique sur la surface de la Terre. La différenciation, comme approche de l'espace géographique et comme modèle de représentation, dépend des méthodes et techniques permettant d'identifier les différences « internes » du continuum spatial (surface de la Terre). Elle renvoie au choix des méthodes et des procédures de calculs différentiant géographiquement le continuum spatial. Télédétection et SIG sont des entrées privilégiées. Elles permettent de reconnaitre, identifier, formaliser, stocker et analyser les lieux–objets,

Le produit de la connaissance géographique est constitué dans la relation inséparable entre sujet et objet. Il est le résultat de la construction de la réalité par le sujet par la différenciation. Par exemple, l'analyse d'images et les méthodologies de traitement en télédétection, ont pour objectif de détecter, de reconnaître, d'identifier sémantiquement les lieux et les objets situés à la surface de la Terre. Dans le cas de la reconnaissance des lieux par télédétection, seules les formes et surfaces des entités spatiales sont extraites et visualisées sur les images. N'importe quel lieu–objet sur la surface de la Terre est une entité spatiale qui appartient simultanément à deux ensembles : l'ensemble des lieux et l'ensemble des objets. Il n'y a pas d'objet sans lieu. Par exemple, une ville, Paris, est un objet et un lieu. C'est un lieu unique, localisé, une surface scalaire avec une morphologie spécifique. Ils forment une information géographique.

Chaque information géographique comprend également deux éléments : un lieu et un objet à la fois, lieux et objets sont inséparables.

La différenciation géographique peut entraîner quatre possibilités :

- ✓ Différenciation par le lieu et par l'objet.

- ✓ Différenciation par le lieu.
- ✓ Différenciation par l'objet.
- ✓ Absence de différenciation par le lieu et l'objet.

Si le lieu est différencié, mais pas l'objet, nous disons que le couple est faiblement différencié par le lieu : c'est le cas de l'information qui désigne une classe d'objets, par exemple, la stratigraphie et la tectonique (sites géologiques), les frontières des États (lieu politique), les populations (répartitions démographiques). Chacun est différencié uniquement par la position où il est.

Si l'objet est différencié, mais pas le lieu, nous disons que le couple est faiblement différencié par l'objet. Ainsi, à l'image de la théorie normative de la centralité (Christaller, 1933), des informations sur des objets relatifs au rôle joué par les villes dans le commerce, administration de transit (les «fonctions urbaines») sont représentées sur le sommet d'hexagones réguliers, au milieu des six côtés ou dans les triangles équilatéraux qui forment les hexagones. Cette information ne concerne pas les lieux géographiques réels, mais l'emplacement possible de ces «fonctions urbaines». Les emplacements sont déterminés par les propriétés géométriques des nœuds.

Si le lieu et l'objet sont tous les deux différenciés, il est dit que le couple est fortement différencié par le lieu et l'objet. Un poème lyrique dans une tradition orale qui raconte un voyage mythique, la description littéraire ou scientifique de la surface de la Terre ou un graphique (géométrique ou non) de cette surface sont géographiquement différenciés.

Si le lieu et l'objet sont indifférenciés, nous disons que le couple est indifférencié. Une zone transport homogène où il est possible de se déplacer au même coût dans toutes les directions par les réseaux de transport (générant des formes identiques dans un espace géométrique qui n'est pas différencié par leurs lieux ou par des objets). Si à une échelle donnée ces espaces ne sont pas géographiquement différenciées, ils pourraient le devenir à une échelle différente. La différenciation géographique n'est pas absolue mais relative aux informations et l'échelle géographique de l'étude.

2.7.3. REGLES SPATIALES DE LA LOGIQUE TOUT–PARTIE EN GEOMATIQUE

TOUT PARTIE ET CATEGORISATION DES RELATIONS SPATIALES

Les « régions » géographiques constituent un système relationnel qui a été classé dans les différentes formes de séparation : séparation, des relations de contiguïté, de superposition, etc. (Varzi, 1997) (Smith, Mark, 1998) (Smith, 2001), les frontières, limites, marges, etc. (Gadal, Jeansoulin, 2000).

Le Tout spatial, en l'absence de processus de différenciation, a son origine dans le voisinage des objets. Réciproquement, les objets de voisinage peuvent être distingués par la séparation. Selon Jean Piaget (Piaget, 1972), ce serait une relation spatiale qui correspond à une perception primitive, qui est impliquée dans les unités de séparation ou dans l'analyse des éléments dans un tout complet. La différenciation des parties spatiales est aussi une relation primitive spatiale. Elle doit être associée à un troisième rapport (Grize, 1969), l'ordre et la succession et un quatrième rapport, l'entourage ou l'enveloppement (Nicolas–O, 1984). Les relations spatiales données par la perception primitive seraient, par conséquent, de voisinage, de séparation, d'ordre, couvrant et de continuité. Elles sont topologiques et non Euclidiennes.

Certains géographes ont essayé de développer dans le cadre de la « géographie naïve » des règles formalisées qui ont été intégrées en tant que modèles en SIG sur les formes et catégories de « pensée spatiale » des individus (Egenhofer, Mark, 1995). La question de la catégorisation des entités spatiales et des objets géographiques et la formalisation des relations sont également un enjeu important développé dans les sciences linguistiques et cognitives (Aurnague, Hickmann, Vieu, 2007). Le but est d'avoir une meilleure compréhension des mécanismes de la perception humaine de l'espace géographique et d'utiliser les résultats pour l'élaboration des nouvelles conceptions SIG plus proches de la pensée humaine.

ENTITE SPATIALE, ENTITE GEOGRAPHIQUE

En télédétection, les informations sur la surface de la Terre peuvent être spatiales sans être géographiques. Pour distinguer l'objet géographique de l'objet terrestre spatial, deux définitions devraient donc être proposées :

- ✓ Définition 1: Est spatial n`importe quel lieu–objet indissociable.
- ✓ Définition 2: Est géographique n`importe quelle information qui différencie, soit le lieu ou l'objet ou le lieu et l'objet, d'une entité spatiale située ou localisée sur la surface de la Terre.

PARTITION HIERARCHIQUE, PARTITION SEMANTIQUE HIERARCHISEE (EMBOITEE)

La géographie ne peut pas exister sans la Terre qui est son objet primitif. Nous pouvons assimiler l'objet Terre à un ensemble considéré comme un Tout. La Terre est seulement l'objet tout primitif, défini, étudié et utilisé par les géographes depuis l'antiquité pour faire de la géographie et de la géomatique (Nicolas, 1999).
Les éléments de cet ensemble, les Parties, sous-ensembles du Tout, sont des objets géographiques d'ordre 1. Caractérisés par une propriété supplémentaire,

les Parties du Tout, les « terres » et les « eaux », sont les objets géographiques d'ordre 2. Il est clair que les développements ultérieurs de cette approche généreront les parties d'ordre successif (3, 4, n) qui dépendront de la distinction effectuée selon les problèmes considérés. Par conséquent, chaque distinction conduit à des Parties du Tout qui peuvent à leur tour être considérées comme le Tout et subdivisées en de nouvelles Parties. Ainsi, la Partie « eau », considérée comme un Tout, peut être subdivisée en Parties « océans » et « mers » et la Partie « terres », considérée comme un Tout, peut être subdivisée en Parties « continents » et « îles ». Par conséquent, si une distinction implique une différenciation, la suite conduit à une partition spatiale qui génère des catégories d'équivalence. De cette manière, dans les États, les divisions politiques et administratives différencient les catégories : région, département, district, etc. Toutefois, il arrive que la propriété considérée soit singulière. Les états qui pratiquent des « valeurs » identiques comme « l'égalité » ou la « fraternité » dans les relations internationales ont fait la guerre au nom de ces valeurs. Par conséquent, la différenciation du Tout dans Parties n'est pas plus immédiate. Elle peut cependant être interprétée comme une équivalence (réflexive, symétrique et transitive) ou une relation de tolérance (réflexive et symétrique mais non transitive) (Gadal, Nicolas, 2001). Ainsi, les États qui ont fait la guerre au nom de valeurs identiques sont susceptibles d'être mis dans la même classe, car ils sont équivalents en droit. Ils établissent entre eux des relations basées sur la guerre (gouverné ou non par les conventions internationales), blocus, embargo, etc. jusqu'à la paix armée avec la participation dans des alliances antagonistes qui génèrent de nombreuses classes de tolérance.

LOGIQUE TOUT–PARTIE ET DIFFERENTIATION GEOGRAPHIQUE

Le point de vue qui est adopté ici ne consiste pas à chercher un métalangage géographique, mais d'essayer de formuler les règles qui permettraient de conceptualiser les relations entre l'espace géographique.

Les trois premières règles de la logique Tout–Partie (T/P) expriment la possibilité de lier les parties résultant de la différenciation de l'objet primitif - la Terre - et d'en tirer les conséquences logiques. La première règle T/P est formulée à partir de la possibilité de transformer n'importe quelle Partie en Tout et de connecter ainsi indéfiniment Tout et Parties.

Tout–Partie règle 1 : règle de relation spatiale (RRS)	La surface de la Terre comme un Tout peut être divisée en Parties qui sont en relation spatiale. Les Parties distinctes les unes des autres peuvent être soit spatialement disjointes ou superposées.
L'opération « relation spatiale » entre les Parties et le Tout est soit une partition ou une décomposition (exacte ou floue). Le cas « totalement spatialement disjoint » correspond à des différenciations spécifiques menant à des Parties disjointes deux par deux.	

La deuxième règle, la règle d'équivalence (ER), et la troisième, la règle de la somme spatiale (SSR), expriment le fait que la logique Tout–Partie s'applique non seulement au Tout primaire (la Terre) mais aussi à chaque Tout ultérieur.

Tout–Partie règle 2 : règle d'équivalence (ER)	Toute Partie peut être définie comme équivalente à un ensemble. Tous les ensembles obtenus par l'utilisation de l'ER peuvent être subdivisés en Parties. Ces « Tout–s » ont les mêmes propriétés spatiales comme le Tout d'origine (la Terre).
La règle d'équivalence (ER) exprime le fait que la logique Tout–Partie s'applique non seulement au tout primaire (la Terre) mais aussi à chaque Tout ultérieur.	

Tout–Partie règle 3 : règle de la somme spatiale (RSS)	Toutes les Parties peuvent être spatialement liées avec une autre Partie. Le nombre de Parties dans la relation au Tout spatial est illimité. La règle de la somme spatiale (RSS) exprime le fait que la logique Tout–Partie s'applique non seulement au Tout primaire (la Terre) mais aussi à chaque Tout ultérieur.
On note que dans la décomposition d'un Tout en Parties, il y a une relation donnée de disjonction ou d'interférence entre deux Parties.	

Si les règles de la logique Tout–Partie étaient limitées aux trois premières, il est évident qu'elles exprimeraient seulement un fait banal et ordinaire, à savoir, la succession infinie de tiroir lequel est encastré dans un autre. L'ensemble du tiroir contenant des parties de tiroir qui, à leur tour, sont subdivisés en parties de tiroirs, etc.

Les géographes géomaticiens utilisent une quatrième règle : la règle d'équivalence par la RSS. Elle « agit » principalement pour relier les parties entre elles, de faire la « somme spatiale ». Ainsi, la somme spatiale de la terre, de l'eau et du relief, permet de comprendre les climats, soit en prenant seulement en considération l'ancienne division de l'atmosphère terrestre par les seules zones données de latitudes (climat équatorial, tropical, modéré et Arctique), mais tout en essayant de les définir dans la complexité de la distribution maritime,

continentale, à l'intérieur de chaque zone dans le cadre générale de la circulation atmosphérique.

Tout–Partie règle 4: règle d'équivalence par la somme spatiale (RESS)	N`importe quelle somme spatiale peut être définie comme un Tout.
Toutes les combinaisons spatiales possibles des relations spatiales entre les composants d'un Tout peuvent constituer des «totalités». Par conséquent, la même combinaison de relations spatiales peut correspondre à plusieurs Tout (totalités).	

D'AUTRES ESSAIS DE FORMALISATION

Le passage, entre l'espace géographique et la représentation formalisée du lieu–objet en géomatique, peut se faire par l'espace mathématique euclidien en utilisant la géo–spatiologie. L'espace mathématique euclidien permet de représenter le lieu–objet géographique résultant du processus de la différenciation par la localisation. La localisation peut être absolue (coordonnées géodésiques) ou relative (situation). D'autres formalisations, utilisant la mathématique euclidienne, ont été développées pour formaliser les interrelations entre les entités spatiales en utilisant la méréo–géométrie (Borgo, 2009). Cette technique a l'avantage de permettre l'utilisation de la distance mathématique euclidienne (réciproque et linéaire) et d'introduire directement l'usage de la géométrie pour représenter la surface de la Terre dans deux ou trois dimensions.

3. METROPOLISATION, URBANISATION ET DEVELOPPEMENT TERRITORIAL A TRAVERS LE PRISME DE LA GEOMATIQUE

3.1. MULTIPLICITE DES PROCESSUS D'URBANISATION ET DE TRANSFORMATION DES TERRITOIRES

3.1.1. UNIVERSALITE ET PARTICULARISMES DE LA METROPOLISATION

L'analyse des processus de métropolisation, des transformations des structures territoriales et des modes d'utilisation et d'organisation de l'espace géographique qui sont induits sur trois aires géoculturelles différentes a pour intérêts :

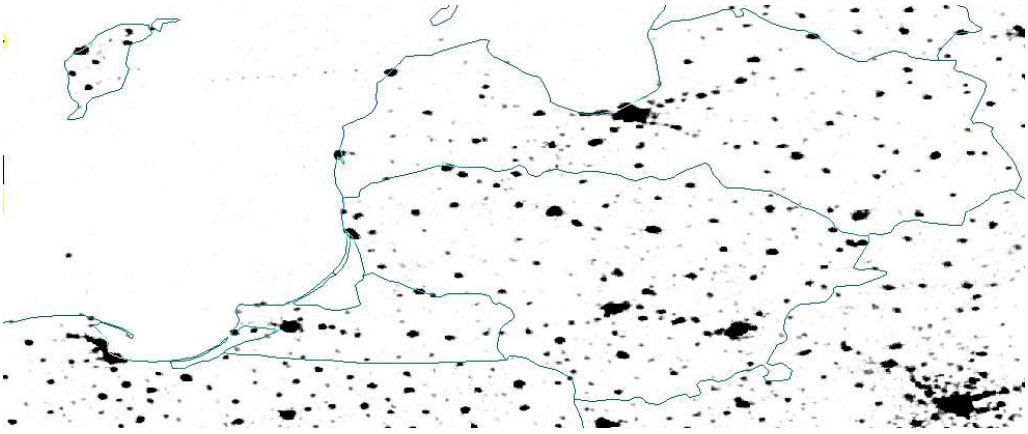
- ✓ D'identifier les caractères spatiaux communs témoins du caractère transnational et transculturel du processus de métropolisation. Cet indicateur pose en filagramme le problème de la nature sociétale du phénomène comme résultant de la diffusion des ou de certaines valeurs occidentales, de la modernité ou encore de l'universalité des dynamiques sociétales à l'échelle globale. Il peut se concevoir également comme le « meilleur » (ou du moins celui qui s'est imposé) modèle territorial d'optimisation socio–économique qui s'est diffusé, donnant à la métropolisation son caractère mondialisé. L'identification des caractères spatiaux communs permet de mettre en évidence les « valeurs » géographiques et territoriales communes d'une population à une autre, d'un espace géoculturel à l'autre.
- ✓ Les particularismes géographiques sont les indicateurs de développement les plus pertinents dans la compréhension des « clés » du développement des territoires. Le particularisme traduit une réalité qui renvoie les facettes du développement, des évènements géographiques.
- ✓ Des seuils de développement s'inscrivant spatialement et physiquement sur le territoire en posant de fait la métropolisation comme le stade actuel du développement des territoires, des lieux et modes de vie des populations.

L'analyse régionale multi–échelles et temporelle permet d'appréhender le caractère mondialisé du processus de métropolisation et d'appréhender à travers le prisme des dynamiques d'urbanisation et de métropolisation les niveaux de développement d'un territoire. Niveaux de développement qui sont quel que soit les échelles, géographiquement et spatialement segmentés. Sur un même territoire, des quartiers, des parties de territoires peuvent être des espaces de la

métropolisation et de la mondialisation et côtoyer d'autres espaces du sous–développement à quelques dizaines de mètres. La métropolisation apparaît comme un processus aréolaire, discontinu, concentré, localisé à des lieux et non de larges continuums de l'espace géographique. Et ce, quel que soit le niveau d'analyse géographique : qu'il soit au niveau subcontinental, régional, méso–urbain ou intra–urbain. La métropolisation est tout d'abord un processus ségrégé et ségrégatif, localisé à des lieux.

Figure 79 : un processus polarisé et spatialement discontinu.

Extrait d'une image segmentée DMSP-OLS F-10 sur les Pays baltes de 1992



L'aspect ségrégé et différencié de la métropolisation se traduit physiquement et spatialement à chaque niveau géographique d'analyse : au niveau continental ou subcontinental, national, régional, urbain, local.

3.1.2. LES CORRIDORS DE DEVELOPPEMENT : DES AXES DE COMMUNICATION STRUCTURANTS

Chacun des espaces en métropolisation étudiés s'insère dans un cadre politique d'intégration économique régional (trans–étatique) qui se structure autour d'axes de communication reliant les agglomérations entre–elles et une structure aéroportuaire mondiale assurant le rôle d'interface et d'échange multimodale. Ces axes de communication, le plus souvent autoroutiers, ont pour objectif premier d'accélérer le transit de marchandises, de biens et de personnes entre le nœud des échanges de la mondialisation (le port) et les territoires, en s'appuyant sur les villes, formant de fait des hinterlands de développement économique et urbain générant eux–mêmes de la métropolisation : les corridors de développement.

La vocation économique des axes structurants de communication prime généralement sur l'ensemble de la politique de développement et d'aménagement des territoires. La notion de développement territorial, humain et social, se trouve conditionnée par l'existence préalable de structures

territoriales (villes, centres urbains, bassins industriels). Structures territoriales préexistantes qui vont déterminer les niveaux et potentialités de développement économique et sociétal d'un territoire. L'idée est qu'à partir des centres relais préexistants, les axes de communication et d'échange génèrent du développement économique, « drivant » dans son sillage le développement humain et social. Peut–on dans ce cas parler de corridor de développement ? La notion de corridor de développement n'a-t-elle pas d'autre alternative que de s'accommoder de cette logique ?

Le développement d'axes de communication structurants, les relations entre ports et hinterlands ne font qu'accompagner, qu'accélérer, qu'optimiser des processus de transformations sociétaux, économiques et humains préexistants. Ils peuvent, comme en Inde ou dans les Pays baltes, accompagner, accélérer, induire, le développement urbain, économique et social par la concentration et les effets catalyseurs des investissements. Mais ils ne sont en rien l'élément principal induisant le développement urbain et la métropolisation, conséquences de la transformation de la société, de l'économie et du rapport des hommes à l'espace et aux territoires.

L'ensemble de ces trois territoires a été économiquement organisé selon une logique spatiale qui s'apparente à la logique d'hinterland. L'hinterland désigne l'aire d'influence et d'attractivité économique d'un port. Initialement, l'hinterland désignait la région qu'un port alimentait en marchandises et les biens qui étaient exportés à partir de ce dernier. Ce modèle d'organisation de l'espace et de structuration territoriale n'est en rien nouveau. Il a formé l'ossature de la structure territoriale coloniale de la France dans nombre de pays africains comme le Maroc (Gadal, 2001) (Gadal, 2003). Les axes de communication, associés à la notion de corridors de développement constituent le relais entre l'interface portuaire liant le territoire au Monde (échanges économiques) formant de fait des hinterlands de métropolisation duaux : un processus d'urbanisation et/ou de métropolisation littorale et une urbanisation/ métropolisation aréolaire formant ce que certains appellent des systèmes urbains ou des systèmes de ville.

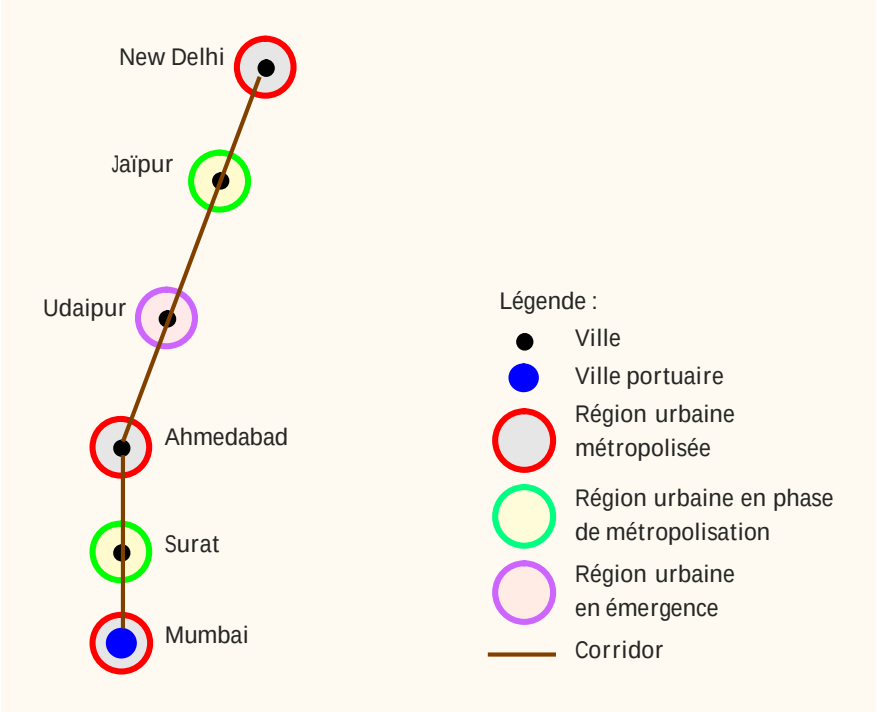
Elle est basée sur la notion d'interconnexion qui se fait par la route (autoroute), la mise en place de projets de transports ferrés grande vitesse et de points nodaux aéroportuaires, d'un ou plusieurs ports conduisant à l'émergence de territoires trans–étatiques régionalement intégrés économiquement et spatialement ou du moins liés.

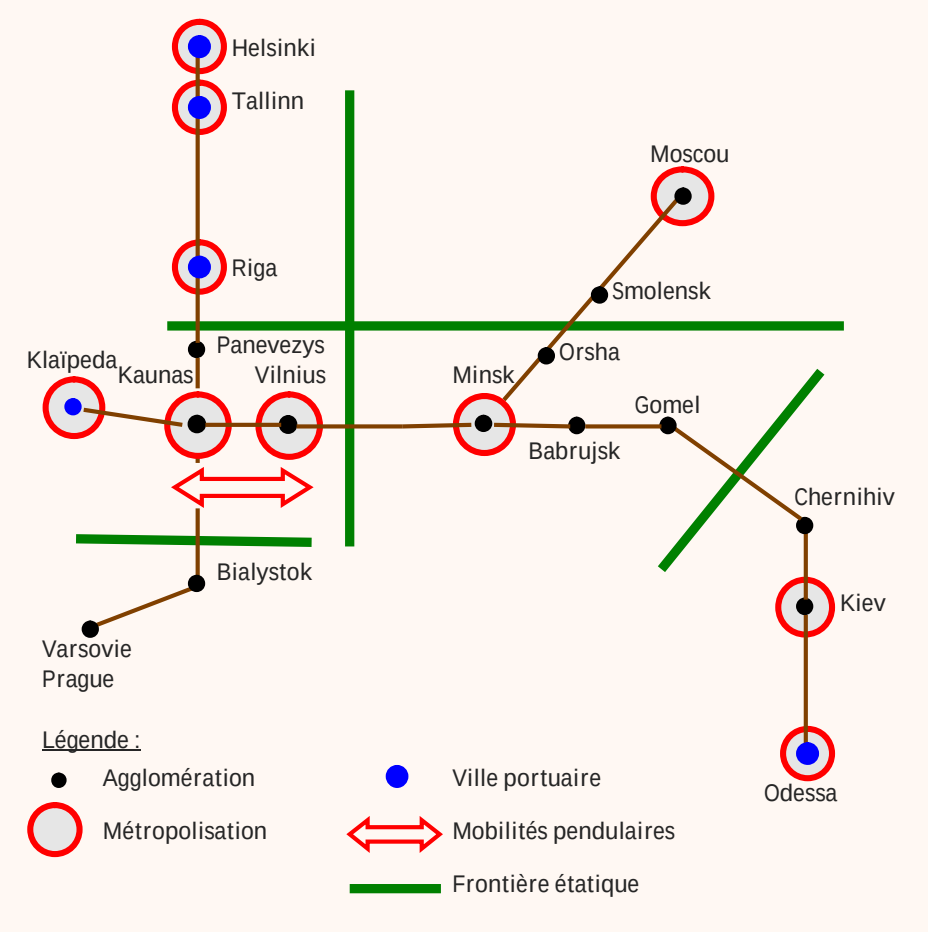
Elle forme, en ce sens, un des caractères communs aux trois territoires étudiés qui tient au modèle de développement trans–étatique dans lequel ils s'insèrent, les corridors de développement :

- ✓ En Lituanie et les Pays baltes, l'axe Riga–Kaunas–Varsovie et l'axe Klaïpeda/Kaliningrad–Kaunas–Vilnius–Minsk.
- ✓ En Inde, l'axe Delhi–Mumbai.
- ✓ En Afrique de l'ouest, l'axe Tanger–Nouakchott–Dakar.

Ces corridors de développement se structurent autour de la mise en place d'axes de communication « structurants » devant lier les différentes agglomérations, villes, centres urbains situés sur le tracé reliant l'interface portuaire au centre de commandement politique et/ou industriel localisé à plusieurs centaines de kilomètres. Ils se matérialisent par la construction d'axes autoroutiers, de voies de chemins de fer, des projets de TGV dans lesquels les villes, les centres urbains sont des éléments structurants, des « nœuds », des relais de communication et de développement. Le caractère intégrateur de ce modèle de développement économique et spatial, catalyseur des formes de structures urbaines organisant les lieux, génère une forme globalisée (mondialisé) d'urbanisation.

Figure 80 : exemples des corridors Delhi–Mumbai et Klaïpeda–Moscou–Kiev.





Les niveaux de développement économique et humain même fortement différenciés génèrent dans les trois cas d'étude des configurations spatiales et urbaines similaires. Mais « l'input » d'aménagement régional que constitue le double concept d'axe de transport structurant « port–agglomérations » sur lequel se greffe le concept territorial d'aménagement de « corridor de développement » reste difficilement quantifiable, même spatialement par télédétection. La question qui se pose tient au rôle du concept de « corridor de développement » dans la constitution des territoires métropolisés, territoires qui tendent comme en Inde, à former des corridors d'urbanisation plus ou plus moins continus le long des axes de communication. Axes de communication qui génèrent en Mauritanie des formes de pré–urbanisation le long de l'axe (Tanger–Rabat/Casablanca–Nouadhibou–Nouakchott–Saint–Louis–du–Sénégal–Dakar) construit par le Maroc avec le développement du système aéroportuaire globalisé de Tanger–Med.

Le fait d'axer le développement territorial sur les infrastructures de communication pour optimiser les échanges de biens de communication, routières pour l'essentiel, produit des échanges et à travers eux peuvent influer sur le développement économique mais pas forcément sur la métropolisation. Ce sont les mobilités de personnes et les infrastructures de télécommunication (combinées aux échanges économiques) qui font la métropolisation. La structure

métropolisée du territoire lituanien conçue et développée durant la période soviétique n'a pas ou peu évoluée en vingt ans. Avec l'entrée dans l'Union européenne et son rattachement à l'aire balto–scandinave, au corridor de développement Ouest–Est de la période soviétique, s'est ajouté le corridor de développement Nord–Sud de la via Baltica sans pour autant engendrer de réelles transformations territoriales, forme de développement économique significatif. Ce sont des corridors de transit, ponctués de villes et de centres urbains aux mêmes fonctions. Jusqu'à la mise en place de clusters scientifiques et industriels en 2009–2010, la Lituanie n'a eu qu'une politique d'aménagement limitée sans réelle stratégie, autre que de « satisfaire » localement les intérêts de « biznessmans » dans la construction de centres commerciaux.

3.1.3. INDICATEURS GEOGRAPHIQUES DE DEVELOPPEMENT

TEMPORALITES ET CHANGEMENTS

L'intérêt d'analyser simultanément sur une même période de temps les transformations territoriales conduisant à l'émergence de territoires métropolisés permet d'avoir une cartographie comparée des différents niveaux de développement urbain et/puis métropolisé. Elle permet également d'identifier pour chaque ou pour l'ensemble des territoires les « évènements » géographiques et spatiaux (les seuils spatiaux et territoriaux) conduisant au passage d'une structure territoriale à une autre. Passage d'un mode d'organisation et d'utilisation de l'espace géographique à un autre qui peut s'étaler sur dix ans voire vingt ans. La transition spatiale est avant tout une transition qui a une temporalité plus ou moins grande. L'inscription spatiale de la temporalité de la transition géographique permet de caractériser les formes de changement et les moteurs géographiques y conduisant. La transition temporelle est cependant mal prise en compte dans les études géographiques. Elle est trop rarement étudiée. Transitions spatiales et temporelles constituent également un indicateur géographique de changement de l'espace géographique et de développement.

La reconnaissance et l'identification des indicateurs géographiques, tout autant que leur définition préalable et a postériori au regard des mesures et résultats, sont contraints, en télédétection et dans la démarche SGIMT générée par la capacité de détection des capteurs au regard de leurs modes et formes d'inscriptions spatiales sur les territoires en phase d'urbanisation et de métropolisation. Les indicateurs géographiques observables par télédétection et modélisés par SGIMT sont des objets géographiques qui ont une localisation, une spatialité et un lieu.

L'analyse des transformations de l'espace géographique conduisant au développement des territoires métropolisés ou en métropolisation peut se faire à travers la mesure, la reconnaissance et l'analyse contextualisée d'objets géographiques témoins et acteurs des transformations de l'espace géographique.

Les indicateurs géographiques observables par télédétection et modélisables par SGIMT rendant compte des transitions spatiales et temporelles peuvent se diviser en deux sous–indicateurs : la transformation des structures spatiales qui, de façon réciproque, rend–compte de certaines transformations des structures territoriales.

Nombre d'objets géographiques sont à la fois des composants de la structure spatiale et de la structure territoriale de l'espace géographique. Structure spatiale et structure territoriale sont interdépendantes.

Tableau 16 : indicateurs géographiques.

Indicateur géographique	
Transition spatiale	Passage d'un mode d'organisation et d'utilisation de l'espace géographique à un autre.
Transition temporelle	Durée (période) temporelle de passage d'un mode d'organisation et d'utilisation de l'espace géographique à un autre.
Structure spatiale	Composants géographiques donnant une forme, une morphologie à l'espace géographique. Elle peut être d'origine anthropique et géophysique.
Structure territoriale	Composants géographiques créés et produits par l'homme pour aménager le territoire : routes, ports, villes, etc.
Discontinuité spatiale	Séparation, limite qui rend compte des différents objets géographiques et entités spatiales composant, structurant et organisant l'espace géographique. Elle a une origine géophysique et humaine à travers ses modes d'aménagement et d'utilisation de l'espace. Par exemple, le tracé d'une frontière ou/et la création d'objets géographiques pour aménager l'espace. Elle marque la limite de chaque entité spatiale et objet géographique donnant de fait un sens ontologique et sémantique à un objet.
Discontinuité territoriale	Séparation introduite par des objets géographiques, géophysiques, des usages du sol ou des aménagements à l'intérieur d'une même entité territoriale comme un pays, une commune, par

	exemple une autoroute, un lac, etc.
Limite territoriale	Séparation politique et administrative d'un territoire. Par exemple, une frontière.
Bâtis (individuel), collective, agrégée et connexe (urbain)	Mode et forme de territorialité et de territorialisation.
Infrastructures de communication	Nature, forme et intensité des liens, interrelations et échanges. Elles déterminent le niveau d'accessibilité aux lieux.

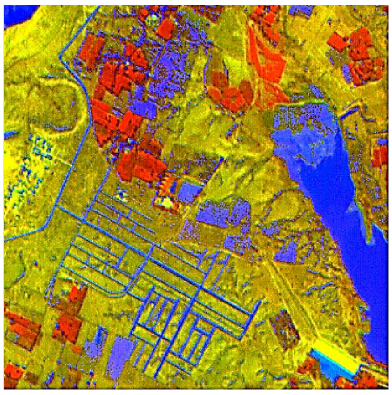
MARQUEURS DES TRANSFORMATIONS DE L'ESPACE GEOGRAPHIQUE

Certains objets géographiques observables par télédétection et modélisables par SGIMT rendent compte localement ou régionalement des changements et transformations de l'espace géographique. Objets qui peuvent être des composantes spatiales et/ou territoriales, par exemple :

- ✓ L'évolution du couvert forestier et son exploitation. Ils témoignent, à la fois, des changements d'utilisation de l'espace géographique, de transformations sociétales et politiques majeures de par l'inertie (temporalité des transformations spatiales) comme, par exemple, dans les Pays baltes.
- ✓ La transformation de l'agriculture marqueur d'une forme d'urbanité (espaces maraîchers) et lieux des futures zones d'extension de l'espace urbain.
- ✓ La présence de friches, de terrains nus, futurs lieux de l'extension de la ville (Jaipur).
- ✓ La construction de routes, axes de développement de l'urbanisation (Inde) ou n'ayant aucun impact (Via Baltica, Lituanie).
- ✓ Le mitage pavillonnaire des espaces agricoles, marqueur des futures zones d'extension de l'urbain (Jaipur).
- ✓ La densification intra–urbaine (Lituanie).

Figure 81 : exemples d'indicateurs de l'urbanisation : exemple de marqueurs temporels des futures zones d'extension de l'urbain.

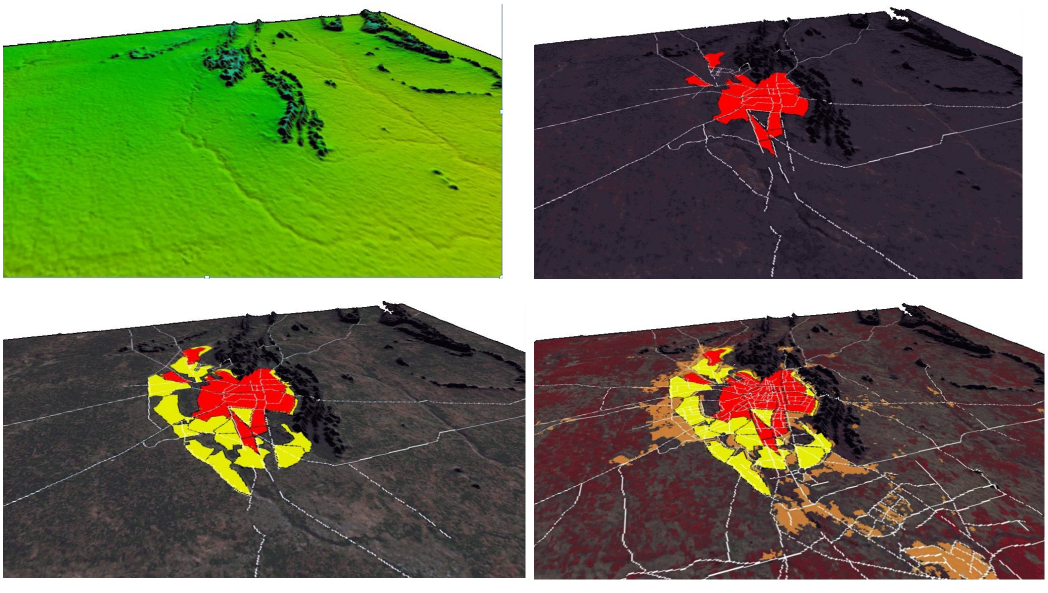
Reconnaissance d'un réseau viaire en construction, lieu de construction d'un nouveau quartier. On notera en rouge, les subsides de parcelles agricoles (Jaipur).



Mitage pavillonnaire en zone agricole (Jaipur).

Détecter, reconnaître et identifier par télédétection ces indicateurs de changements, permet de simuler empiriquement, par exemple, l'urbanisation, les transformations territoriales à partir de marqueurs géographiques qui ont une réalité spatiale et territoriale. C'est-à-dire, de simuler la future configuration d'un territoire à partir de critères géographiques, spatiaux et physiques tangibles et réels.

Figure 82 : marqueur spatial de changement (étalement urbain et réseau routier) simulé empiriquement (exemple de Jaipur, Inde).



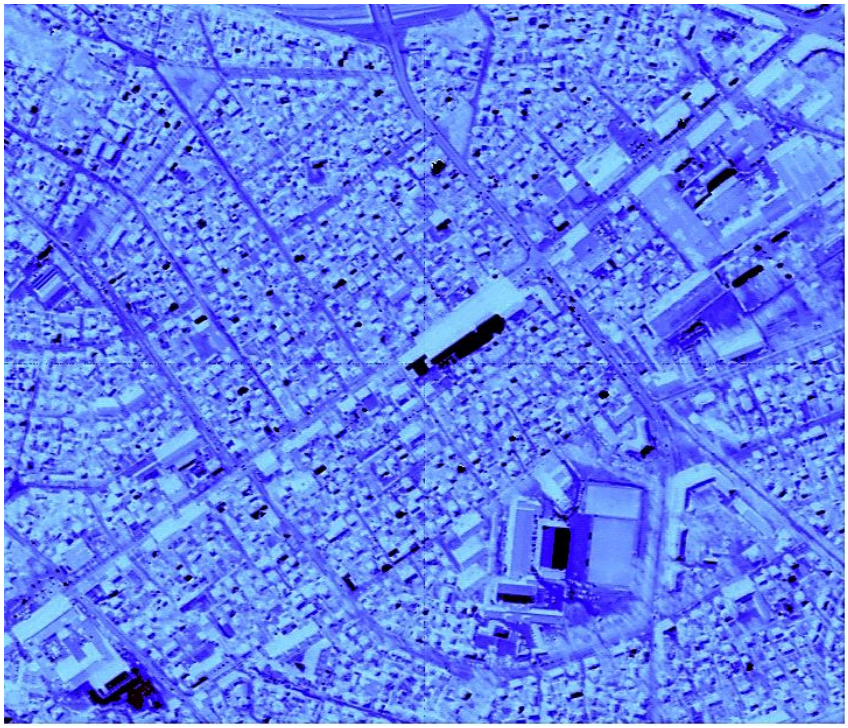
Ces marqueurs contextuels, spatiaux et temporels caractérisant le changement des structures spatiales et territoriales de l'espace géographique peuvent être complétés par d'autres indicateurs de développement relatifs au niveau et à l'environnement de vie :

- ✓ Types d'habitats.
- ✓ Types de quartiers, âges.
- ✓ Présence d'espaces verts, de jardins.
- ✓ Rénovation de l'habitat.
- ✓ Hauteur des bâtiments.
- ✓ Présence de centres commerciaux.
- ✓ Présence ou non de parcelles agricoles vivrières.
- ✓ Usines, zones industrielles, etc.
- ✓ Lieux de friches.
- ✓ Niveau de consommation d'énergie et d'électrification (mesures DMSP OLS de l'intensité lumineuse des centres urbains).
- ✓ etc.

La généralisation de la télédétection sub–métrique permet d'affiner et de développer des « batteries » d'indicateurs de développement et du niveau de vie. Niveau de vie qui peut être contextuellement mesuré et cartographié avec des images thermiques moyenne résolution (Gadal, 2001) (Gadal, 2008).

L'essentiel des études portent sur les questions d'environnement et de climatologie urbaine, rarement sur les indicateurs du niveau de vie à créer par télédétection et à recouper avec les autres mesures en SIG. Les variables environnementales et les niveaux de pollution sont certes des indicateurs de développement et indirectement de qualité de vie (jardins, parcs, etc.) et rentrent dans la mesure spatiale de la qualité de vie (indicateur spatialisé de développement humain) dans le sens où elle est une résultante d'un certain niveau de vie et de développement.

Figure 83 : exemple de mesures d'élévation du niveau de vie (économique) : capacité à rénover et à acheter du pavillonnaire neuf (exemple de Kaunas, Lituanie).



Les éléments en noir représentent la tôle aluminée des bâtiments. Les bâtiments dont la toiture est de grande superficie ont été construits récemment. Les éléments en noir sur les maisons pavillonnaires représentent des toitures qui ont été remplacées en lieu et place par des toitures en amiante.

3.2. UN TERRITOIRE METROPOLISE SANS METROPOLITE ? LA LITUANIE

3.2.1. UN PROCESSUS REGIONAL DE TRANSFORMATION TERRITORIALE POST–SOVIETIQUE DIFFERENCIE

MULTIPLICITE ET UNICITE DES STRUCTURES ET DYNAMIQUES TERRITORIALES

Depuis le retour à l'indépendance le 11 mars 1991 entraînant dans son sillage l'éclatement de l'URSS, le changement de régime politique et économique, l'absence de politique et de stratégie d'aménagement du territoire, l'intégration dans l'espace européen et baltique, ont profondément marqué les dynamiques spatiales et territoriales de la Lituanie des vingt dernières années : l'émigration massive (officiellement 1,2 million de lituaniens sur une population de 3

millions), la croissance, la périurbanisation, la gentrification, la déprise agricole, l'exploitation des ressources forestières.

Ces transformations, à la fois sociétales, urbaines et géographiques de l'espace géographique, ont été mises en évidence à partir de modèles de simulation spatiale créés à partir d'images satellites de la série Landsat et DMSP sur les quarante dernières années et complétées sur la région de Kaunas, seconde ville du pays, de documents cartographiques allant de la fin du XIXe siècle aux années 1960.

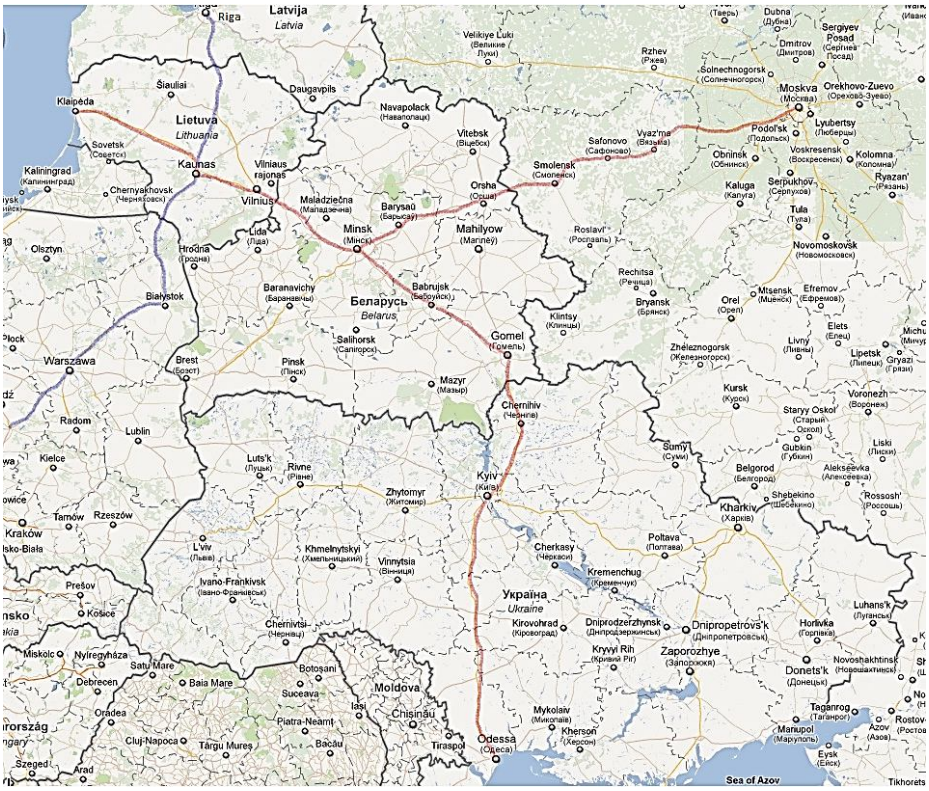
Les modèles générés mettent en évidence :

- ✓ Une permanence de la structure territoriale et urbaine soviétique qui n'a pas évoluée depuis 1991 à l'échelle nationale. Elle est et reste le modèle territorial structurant de référence.
- ✓ Une succession, plus qu'une surimposition, de modèles urbains et d'aménagement du territoire qui se sont juxtaposés aux niveaux méso et intra–urbain : Empire russe, période de l'indépendance 1920–1940, régime soviétique, régime libéral postindépendance (périurbanisation), métropolisation. Ils façonnent la morphologie des villes lituaniennes.
- ✓ Un processus émergent de métropolisation aux échelles nationale, régionale et locale.

Les transformations spatiales les plus importantes se concentrent au niveau individuel, celui du bâti, du local, intra – et méso–urbain. Elles ont un impact limité sur les transformations de la structure urbaine et territoriale nationale, plus important au niveau régional autour de Vilnius, de Klaïpeda et de Kaunas.

Le corridor de transport Klaïpeda–Kaunas–Vilnius reste l'axe structurant de développement de la Lituanie depuis la période soviétique. Il n'a pas ou peu varié depuis la fin de l'URSS. Ce corridor de développement stratégique lie le seul port de la mer Baltique (Klaïpeda), qui ne gèle pas durant l'hiver, avec Minsk, Moscou, Kiev et Odessa (en mer Noire). La Lituanie a hérité avec la fin de l'URSS de la partie aval de l'hinterland ouest de l'ex–URSS. Il conditionne pour une bonne part la géopolitique économique de la République lituanienne avec ses voisins, plus particulièrement la Biélorussie. La prégnance de l'organisation territoriale soviétique faisant de la Lituanie, un hinterland, tout autant qu'un corridor de développement, l'absence de réflexion et de plan stratégique post–indépendance, comme en Lettonie et contrairement à l'Estonie, maintient géographiquement, structurellement et territorialement la dépendance économique au marché de la Fédération de Russie et des pays membres de la CEI. Le pays peine à réorienter ou à diversifier ses réseaux économiques : 40% de l'économie lituanienne est dépendante du marché russe.

Figure 84 : corridors d'échanges économiques en Lituanie.



Sources : GoogleMap, 18 août 2011, enquêtes de terrain, 2006, 2009, 2011.

Bleu : via Baltica, axe de développement planifié par l'Union européenne (Prague–Varsovie–Kaunas–Riga–Tallinn–Helsinki).

Rouge : corridor d'échanges mis en place sous l'URSS. En phase de réactivation suivant un axe Odessa–Klaïpeda via Kiev et Minsk (échanges trans–asiatiques).

Le second corridor de développement qui a façonné les relations et une partie de l'économie lituanienne depuis le moyen-âge, l'axe Berlin–Varsovie–Kaunas–Riga–Tallinn, l'ancienne via Baltica, est un axe stratégique de développement acté et soutenu par l'Union européenne. Il ne fait cependant l'objet, malgré l'élaboration de plans stratégiques régionaux et interrégionaux de développement, d'aucun investissement, ni aménagement. Mis en sommeil durant la période communiste, son importance pour l'intensification des échanges pour l'Union européenne, l'Allemagne, la Pologne, la Lettonie, l'Estonie et la Finlande, voire Saint-Pétersbourg est capitale. D'autant plus que l'ancienne voie passant par l'ex–ville de Königsberg, aujourd'hui Kaliningrad est fermée. Les projets de TGV Berlin–Varsovie–Kaunas–Riga, d'autoroute, etc. se succèdent sans aboutir.

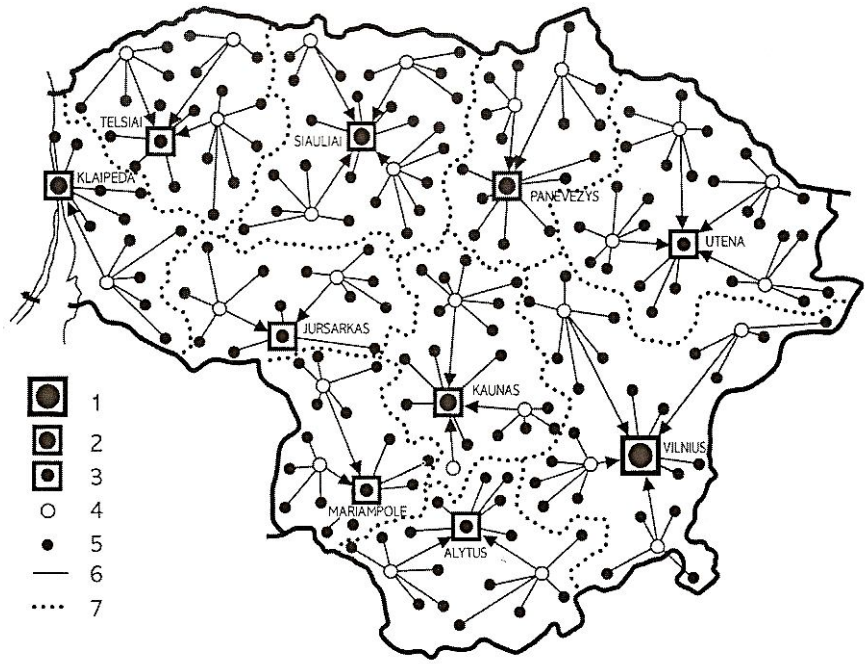
UNE STRUCTURE TERRITORIALE SOVIETIQUE PREEMINENTE

Plus de vingt ans après la fin de l'URSS (Union des républiques socialistes soviétiques), le territoire lituanien redevenu indépendant, a connu dès le début des années 1990 une série de mutations sociales, économiques et spatiales qui se sont traduites par des processus de croissance urbaine et de dispersion de l'habitat. Ces mutations spatiales et géographiques, essentiellement urbaines, ont peu affecté la structure territoriale du pays à l'échelle nationale. La structure spatiale et territoriale prédominante reste celle mise en place durant la période soviétique entre 1964 et 1967.

Les principales transformations territoriales observées durant les vingt dernières années le sont aux niveaux local, méso et intra–urbain avec une croissance urbaine tirée par l'accélération de la périurbanisation, la croissance urbaine et la dispersion de l'habitat en raison de la restitution d'une partie des terres collectivisées sous la période soviétique.

La structure territoriale et urbaine pensée, développée par les géographes lituaniens dans les années 1950 et appliquée par les aménageurs et architectes de KTU et de l'Université lituanienne d'agriculture (LZUU) dans les années 1960 est basée sur un modèle d'organisation de l'espace « centre–périphérie hiérarchisé (emboîté) ».

Figure 85 : structure urbaine et territoriale de la Lituanie soviétique.



Légende :
1 : Capitale. 2 : Centres régionaux basés sur les villes moyennes (dont Kaunas avec 400000 habitants). 3 : Centres urbains régionaux basés sur les petites villes. 4 : Centres de districts. 5 : Centres locaux. 6 : Liens infrastructurels. 7 : Limites administratives régionales.

Source : Vanagas, J., Neniskis, E. (2000). “Lietuvos miestu potencialas Baltijos juros region urbanistiniame kontekste”. Urbanistika ir architektura, t. 24, n°2, pp. 47-59.

C’est cette forme de structure territoriale issue de la période soviétique qui gouverne l’organisation spatiale, géographique et urbaine du pays. Ce modèle de structuration territorial a été guidé par les impératifs économiques agricoles et industriels de la planification soviétique. Il se caractère par un maillage systématique de villages urbains rattachés aux Kolkhozes couvrant l’ensemble du territoire de la Lituanie, d’un réseau de villes secondaires et primatiales accueillant industries lourdes et services. C’est sur la base de ce réseau de villes et de villages interconnectés par la route que vont s’appuyer les processus de délocalisation d’une partie des populations urbaines vers les « nouveaux » centres péri–urbains préexistants, à savoir les villages urbains à vocation agricole. Ces villages urbains vont durant la période de l’après indépendance jusqu’à aujourd’hui changer de statut, passant de chef–lieu urbain d’un territoire économique à vocation agricole à celui d’espace péri–urbain intégré à un espace en métropolisation, donnant au territoire lituanien son caractère de structure urbaine « aréolaire » dense et interconnectée.

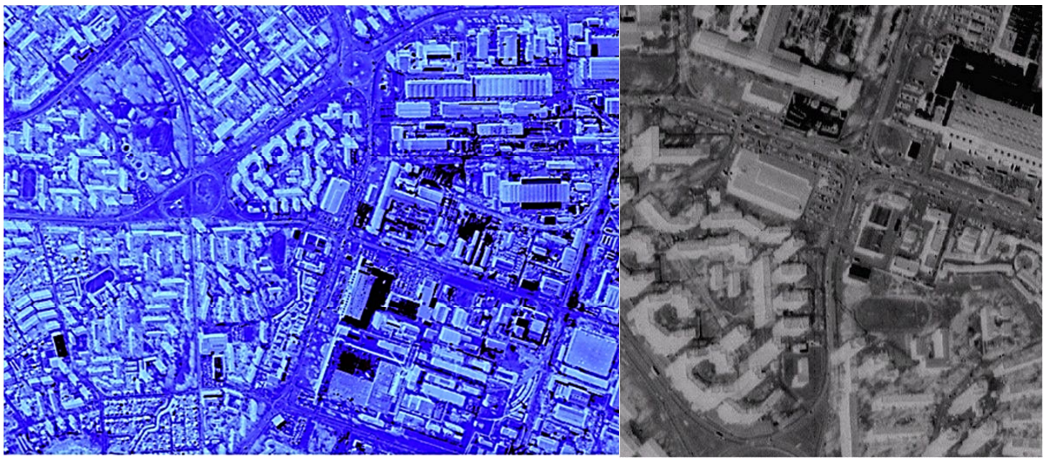
La politique d’aménagement soviétique, pensée, organisée et planifiée par le parti communiste, avait pour première et unique vocation l’optimisation rationnelle des systèmes économiques industriels de production (localisation, distribution, etc.), des infrastructures de communication, des services publics, associés à la planification économique ainsi des aires de loisirs et de vacances pour les travailleurs. Aires récréationnelles qui, sous la forme de parcs intégrés (écologiques, historiques, culturels, anthropologiques), intégraient les dimensions écologiques et environnementales. L’ensemble de la politique de planification spatiale, régionale était subordonné, via le Gosplan, au service central de planification économique (*Perspectives pour le développement et la répartition de l’industrie en Lituanie*, 1964).

La politique de planification régionale était considérée comme le meilleur instrument du développement économique et industriel (Vanagas et al. 2002) de l’URSS. Il était une des clés de voute de la politique de développement des douze républiques socialistes soviétiques. Dans la logique de planification économique « rationnelle » de l’espace géographique, les villes, les centres urbains, étaient considérés comme un maillon essentiel de la politique de concentration économique, industrielle et territoriale intégrant les « combinats » (groupes d’entreprises de plus de 10000 employés) et les ouvriers.

Figure 86 : reconnaissance d'un des combinats de Kaunas et des zones d'habitats HLM pour les ouvriers, ingénieurs et employés de la période soviétique.

Habitats collectifs (gauche), combinats industriels (droite)

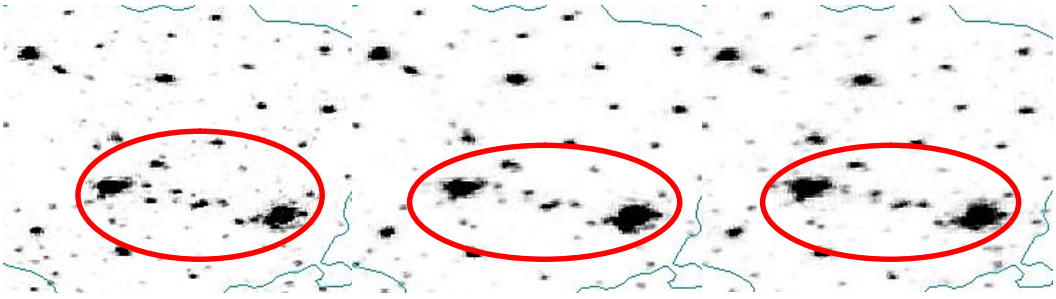
Géo–visualisation 3D d'habitats collectifs (premier plan) et d'usines (second plan)



La concentration industrielle a favorisé l'émergence de deux agglomérations distantes de 100 Km, Vilnius et Kaunas, rassemblant 1/3 de la population lituanienne, soit quasiment 1 million de personnes, sans pour autant donner naissance à un territoire urbanisé et métropolisé intégré tant la compétition et les tensions entre les deux dipôles est vive, malgré les maintes tentatives de planification visant à générer un territoire métropolisé bipolaire (Vanagas, 2002).

Figure 87 : reconnaissance de l'évolution du dipôle Kaunas–Vilnius entre 1992-2000–2009.

1992 (DMSP F-10) 2000 (DMSP F-14) 2009 (DMSP F-16)



L'expansion de l'urbanisation induite par l'industrialisation urbaine de masse en conglomérats a été possible grâce à l'arrivée massive des populations d'origine rurale (forcées à l'exode rural) et à la réforme de l'organisation économique de l'appareil de production agricole et des transformations des structures spatiales et territoriales qui l'a accompagnée. La collectivisation des terres agricoles avec

la création de conglomérats agricoles, les kolkhozes, s'est faite par la concentration des populations rurales dans des petites villes et villages urbains rassemblant services, administrations, écoles, etc., maillant l'ensemble du territoire, la destruction systématique des fermes agricoles qui couvraient l'ensemble du territoire de la Lituanie et des habitats dispersés associés. La structure spatiale de l'espace rural avant la soviétisation était basée sur le modèle de l'habitat fermier dispersé au milieu des terres, à l'instar d'un modèle d'organisation spatiale que l'on trouvait en Scanie (Sud de la Suède).

Le besoin de main d'œuvre pour les conglomérats industriels urbains, la réforme des structures agraires et la politique « volontariste » visant à diminuer la population rurale au profit de la population urbaine devant alimenter les usines en main d'œuvre, a conduit à transformer la structure socio–spatiale du pays, la population urbaine passant de 38% de la population lituanienne totale à 67,7% entre 1959 et 1990 (Institut de la statistique, 2011). Cet accroissement de la population urbaine s'est opéré sur deux périodes : 1959-1970 (38% à 52%) et 1977-1990 (52% à 67,7%).

Dans le même temps, la politique soviétique d'aménagement a contraint drastiquement l'expansion spatiale des villes et agglomérations conduisant à :

- ✓ Privilégier les grands ensembles HLM.
- ✓ En Lituanie à mettre en place une structure urbaine basée sur le concept de « système uni d'habitats » élaboré par K. Seselgis (Šeselgis et al. 1981) en répartissant une partie du développement urbain sur les petites villes.

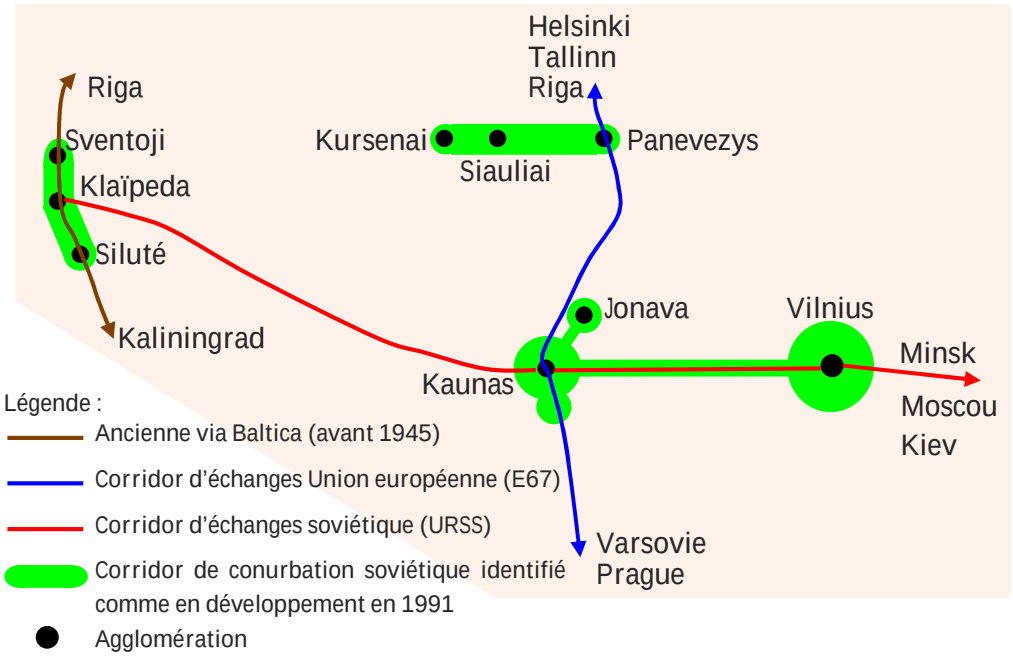
La mise en œuvre du concept d'aménagement et d'organisation territoriale du « système uni d'habitats » a conduit à l'émergence d'un système urbain relativement peu hiérarchisé, mais interconnecté, où chaque entité urbaine (villes, centres urbains et habitats ruraux), quel que soit sa catégorie est relié aux autres entités urbaines. Ce système urbain en réseau se fonde sur dix centres urbains régionaux - Alytus, Jurbarkas, Kaunas, Klaïpeda, Marijampolé, Panevezys, Plungé, Siauliai, Utena et Vilnius – maillant la totalité du territoire de la République socialiste soviétique de Lituanie.

De ce mode d'organisation spatial et territorial fondé sur dix villes ayant théoriquement les mêmes niveaux fonctionnels et administratifs va émerger une répartition de la population moins polarisée qu'en Lettonie ou en Estonie sur une ville, respectivement Riga (910000 habitants en 1989) et Tallinn. L'essentiel de la croissance urbaine va être tiré par le dipôle Vilnius (580000 habitants), Kaunas (418000 habitants), Klaïpeda (203000 habitants) (port de l'hinterland menant à Minsk, Moscou et Kiev), Siauliai (147000 habitants) et Panevezys (133347 habitants), mais surtout par les centres urbains de petite et moyenne importance. Centres de petite et moyenne importance qui limiteront l'immigration des autres républiques soviétiques en raison de leur faible attractivité (Vanagas et al. 2002).

De cette situation singulière va émerger en 1991 trois régions urbaines en devenir :

- ✓ Le dipôle Vilnius–Kaunas, rassemblant l'essentiel de la population lituanienne et des mobilités pendulaires (corridor de mobilité).
- ✓ Un processus de littoralisation Nord–Sud sur Klaïpeda, le long de la route menant à la frontière lettone et à Siluté (Sventoji–Palanga–Kretinga–Klaïpeda–Priekulé–Siluté).
- ✓ Un corridor urbain Est–Ouest (Panevezys–Seduva–Siauliai–Kupiskenai).

Figure 88 : conurbation en 1991.



Six centres urbains régionaux de « commandement » seront ajoutés entre 1970 et 1989 (Jonava, Kėdainiai, Mažeikiai, Telšiai, Ukmergė et Visaginas) maillant plus encore l'ensemble du territoire lituanien. L'adjonction de nouveaux centres urbains régionaux de commandement administratif et de services correspond à l'implantation de centres industriels majeurs (Jonava), d'une base aérienne militaire (Kėdainiai) ou encore d'un vaste complexe pétrochimique (Mažeikiai).

DES SOURCES DEMOGRAPHIQUES ET SOCIO–ECONOMIQUES PROBLEMATIQUES

Bien que la Lituanie possède un service statistique de qualité, avec un recensement de la population individualisé et géo–localisé, il est difficile de se baser sur les informations statistiques socio–démographiques et économiques pour asseoir une étude sur les transformations de l'espace urbain post–soviétique et plus généralement de l'ensemble du territoire de la Lituanie.

L'ensemble des informations collectées sont fausses ou presque. Cela tient aux lois qui contraignent un très grand nombre de lituaniens à falsifier leur lieu de vie, leur domicile, etc. La plupart des lituaniens vivant à l'étranger (officiellement

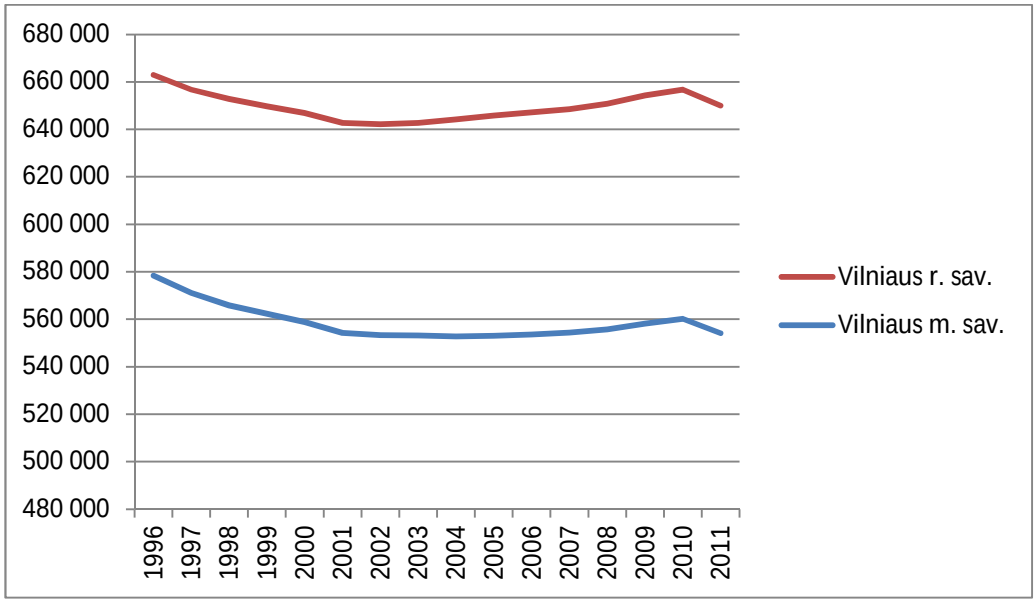
1 million à 1,2 million) restent enregistrés en Lituanie, en voici trois raisons essentielles :

- ✓ Uniquement les résidents lituaniens permanents en Lituanie peuvent acheter une résidence, des terres, un véhicule, etc. Seuls les lituaniens peuvent être propriétaires des terres, de logements, etc.
- ✓ Une défiance et une méfiance forte envers et contre l'Etat jugé corrompu, incompétent et ne servant que les intérêts particuliers des députés et des « millionnaires ».
- ✓ L'histoire récente et la prégnance de la période soviétique sont vivaces.

Aussi la plupart des lituaniens font de fausses déclarations à commencer par leur lieu de vie. S'y ajoutent les questions de déclarations fiscales et d'impositions : nombre d'émigrés (absence de chiffres) travaillent au noir en Grande-Bretagne ou en Irlande et restent en Lituanie. Ils sont officiellement enregistrés en Lituanie alors qu'officiellement 1,2 million de lituaniens sont à l'étranger sur une population de 3,3 millions de personnes.

Etre inscrit en Lituanie permettait jusqu'en 2010 de se faire soigner gratuitement en Lituanie. La nouvelle loi imposant aux personnes ne travaillant pas de contribuer à la sécurité sociale a réajusté partiellement le nombre de résidents : 80000 personnes vivant à l'étranger se sont désinscrites de la liste des habitants permanents pour ne pas cotiser à la sécurité sociale alors qu'elles ont répondu dans le même temps vivre en Lituanie au recensement du printemps 2011.

Figure 89 : baisse de la population (pic de 2010).



Source (données statistiques) : Institut lituanien de la statistique, 2011.

Légende : (rouge) – municipalité de la région de Vilnius, (bleu) – municipalité de la ville de Vilnius.

Après avoir accusé une baisse importante de la population durant les années 1990 (émigration en direction des pays anglo–saxons), les années 2000 sont caractérisées, en termes statistiques, par l'émergence d'un processus de métropolisation : gentrification du centre historique (courbe en bleue, Vilniaus miesto) et périurbanisation (courbe en rouge, région de Vilnius – Vilniaus regiono). La baisse importante enregistrée en 2010 (pic de 2010) est liée à la désinscription d'une partie des émigrés lituaniens des registres des impôts et de la sécurité sociale.

On remarquera qu'il est en outre difficile de procéder sur un même pas de temps à une analyse régionale et locale intégrée des processus de transformation territoriale et urbaine touchant les républiques de l'ex–URSS (Kaliningrad, Lituanie, Biélorussie, Lettonie et Estonie) et le nord de la Pologne (région de Gdansk) à partir de bases de données aux temporalités, structures et méthodes différentes, sans compter les difficultés d'accès. Ce problème d'harmonisation des données démographiques et socio–économiques géo–localisées n'est pas nouveau (Gadal, 2001) (Gadal, 2003) et à ce jour aucune méthode satisfaisante ne fonctionne, même à rapporter des données démographiques à des entités morphologiques. Cela ne règle rien au problème d'estimation de la qualité des données, de leur validité, de l'impact de leur structuration et de la valeur de leur comparabilité. La spatialisation des bases de données géographiques « au pixel », à l'entité spatiale n'est valable que localement (ou régionalement), c'est-à-dire, au sein de la même unité de collecte statistique rapportée (fusionnée) à l'image de télédétection ou aux données cartographiques intégrées en SIG (Gadal, 2011). Le nombre d'études menées par l'ORNL aux Etats-Unis, en Italie ou, par exemple, par l'IRD en France sur le développement de méthodes de fusion de données de recensement avec les images de télédétection aux résolutions spatiales kilométriques ou métriques est important. Les résultats avec les images kilométriques sont excellents (de l'ordre de 90%) sur les zones urbaines à forte densité de population, médiocres sur les espaces périurbains et les zones pavillonnaires.

MODELISATION DES TRANSFORMATIONS SPATIALES

DONNEES ET METHODOLOGIES

La modélisation des transformations spatiales s'est appuyée sur sept ensembles de données de télédétection spatiales et aéroportées :

- ✓ Sur l'ensemble de l'espace baltique, les images DMSP-OLS (1992-2010) et Landsat MSS/TM/ETM+ (1973-2009).
- ✓ Sur la frontière russo–lituanienne (Kaliningrad), les images Ikonos 2A (2009).

- ✓ Sur Kaunas, les images Kompsat-2 (2007).
- ✓ Sur l'ensemble de la Lituanie, les images de télédétection aéroportées centimétriques (2007).

S'y ajoutent les bases de données géographiques produites par l'Union européenne (Corine Land cover, etc.) ou mises à disposition par la NASA : SRTM, Vmap 0, etc. et le travail de terrain mené six semaines par an depuis 2005.

Les méthodologies conduisant à la reconnaissance, à l'extraction et à la construction d'informations géographiques, ont été présentées dans la partie 2, tout comme celles conduisant à des modèles de simulation pouvant être géo–visualisés en 2D ou 3D dynamiques.

UN PROCESSUS DE METROPOLISATION SOVIETIQUE ?

La question qui se pose en substance vingt ans après la fin de l'URSS est de savoir si certaines parties du territoire lituanien sont entrées dans la dynamique des processus de métropolisation ou sont aujourd'hui métropolisées. L'acuité de cette problématique tient à la fois du politique et des transformations sociétales post–soviétiques :

- ✓ Le souhait de voir émerger une métropole moyenne européenne : Vilnius, agglomération concentrant la presque totalité des investissements du gouvernement lituanien (rénovation urbaine du centre historique, quartier d'affaires) avec un succès des plus mitigé : une fois passé l'hyper–centre historique, la ville XIX^{e} et XX^{e} est en ruine, les rénovations effectuées il y a cinq à huit ans sont décrépies, etc. Le tourisme, essentiellement d'origine polonaise (pèlerinage de la Vierge noire) n'a pas décollé faute d'une réelle stratégie territoriale intégrée malgré une hôtellerie de qualité et des potentialités importantes, etc.
- ✓ L'émergence d'une classe d'âge post–communiste (qui n'a pas connu le communisme), une émigration vers les pays scandinaves et anglo–saxons d'un lituanien sur trois, l'intégration européenne, le changement de système économique et de régime politique, l'apparition d'une classe moyenne en 2005-2006 (années d'émergence et de ségrégation sociale).
- ✓ Les dichotomies entre la réalité des processus d'urbanisation et les plans d'aménagement urbain mis en place par les communes : l'urbanisation est guidée par le libéralisme, les cadres théoriques et les méthodes de planification soviétique (ils n'ont pas changé en vingt ans, ni chez les urbanistes et aménageurs, ni dans les universités) qui sont en totale contraction et en total décalage avec la réalité des dynamiques spatiales et processus d'urbanisation.
- ✓ Une absence de politique de développement territorial aux niveaux régional et national qui a duré presque vingt ans, a concentré l'ensemble

des crédits sur Vilnius, qui est aujourd'hui guidée par la mise en place de cinq clusters scientifiques et technologiques (2 sur Vilnius, 2 sur Kaunas, 1 à Klaïpeda). Politique qui peut être qualifiée d'inconsistante, ponctuelle, opportuniste et décousue, portée uniquement par l'obtention de crédits européens et le recyclage d'une partie des sommes obtenues au niveau des municipalités et des entreprises.

Cependant, en l'absence d'une réelle politique d'aménagement pensée aux niveaux national et régional, la structure territoriale du pays a peu changé. Les changements observés, mesurés par télédétection et modélisés en SGIMT, concernent les niveaux méso et intra–urbains et les bâtis. Ils sont portés par l'urbanisation, la densification des quartiers HLM soviétiques et à la périurbanisation. Périurbanisation qui s'appuie sur les villages urbains de la période soviétique et l'habitat rural dispersé de la période pré–communiste (qui avait été détruit).

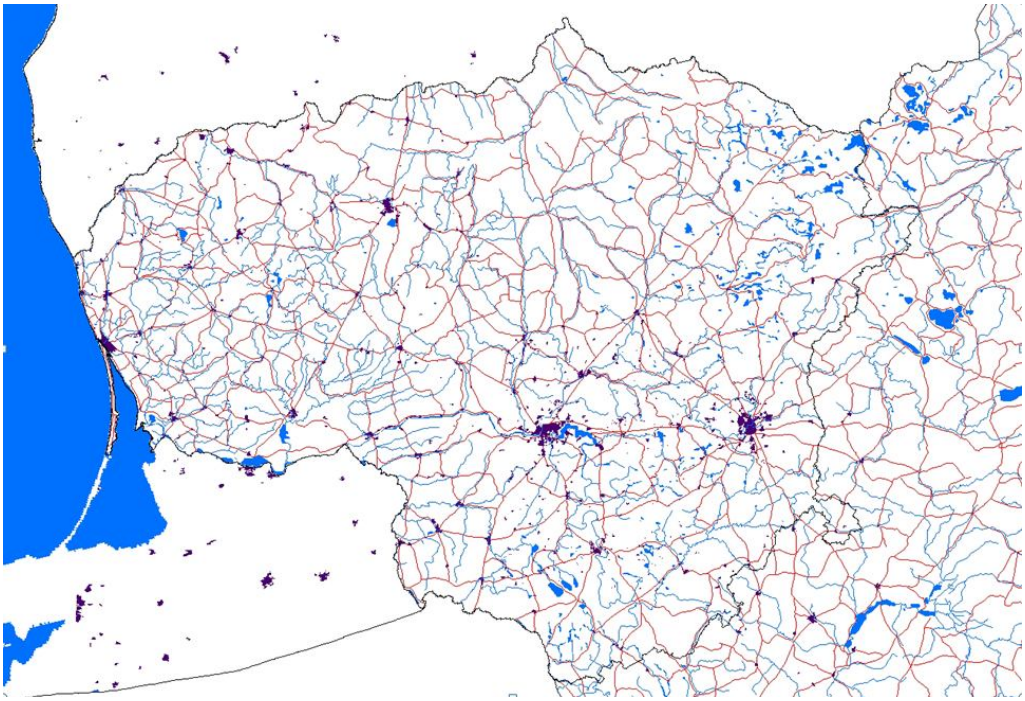
Le « squelette » territorial urbain reste celui mis en place sous la période soviétique. Entre la fin des années 1960 et 1991, le maillage territorial du territoire lituanien a généré une structure territoriale urbaine dense de villages urbains et de petites villes interconnectés, de laquelle ont émergé trois ensembles territoriaux, qui en 1991, pouvaient être considérés en métropolisation : le dipôle Kaunas–Vilnius, Klaïpeda, l'axe Šiauliai–Panevėžys : conurbation, périurbanisation, etc.

La métropolisation n'a pas été le phénomène géographique majeur des quarante dernières années qui a uniquement concerné les pays d'économie libérale. Elle a également été spatialement et structurellement un phénomène qui a touché l'URSS, sans peut être, que ce processus de transformation des territoires ait été pensé comme concept ou notion. L'organisation spatiale du territoire lituanien était pensée par le parti communiste sur la base de critères économiques. Elle devait répondre aux objectifs du Gosplan, aux besoins des conglomérats et des kolkhozes.

La particularité du système économique soviétique était que les centres de production (conglomérats et kolkhozes) et de services ne répondaient que peu aux besoins de l'économie locale. Le modèle économique soviétique était conçu de la sorte que l'ensemble des secteurs de production dépendait d'autres usines situées dans l'ensemble de l'URSS. L'objectif était de générer une interdépendance qui est matérialisée par les corridors de transports liant l'ensemble des centres industriels et urbains de l'Europe soviétique.

Analyse à l'échelle régionale

Figure 90 : structure urbaine de la Lituanie et de l'enclave de Kaliningrad en 1989.



En Lettonie, le système urbain développé durant la période soviétique, lui aussi fondé sur le concept de « système uni d'habitats », est basé sur un système urbain hiérarchisé à cinq niveaux (de Riga aux 564 villages urbains) dont la répartition spatiale est déterminée par les temps d'accès et de transports. La totalité des centres urbains et villages devaient être au plus à trois heures de temps de Riga.

Tableau 17 : système urbain hiérarchisé letton.

Niveau hiérarchique	Temps d'accès	Centres urbains
Centre du système uni d'habitats (Capitale)	180 minutes	Riga
Centres régionaux interdistricts	90 minutes	Daugavpils, Liepaja, Ventspils, Valmiera, Rezekne, Gulbene, Jekabpils
Centre de district	60 minutes	25 centres urbains
Centres inter–locaux	30 minutes	104 centres urbains (villages et petites villes)
Centres locaux	15 minutes	546 centres ruraux (hameaux, villages liés à un kolkhoze)

Figure 91 : simulation 1989–2001.

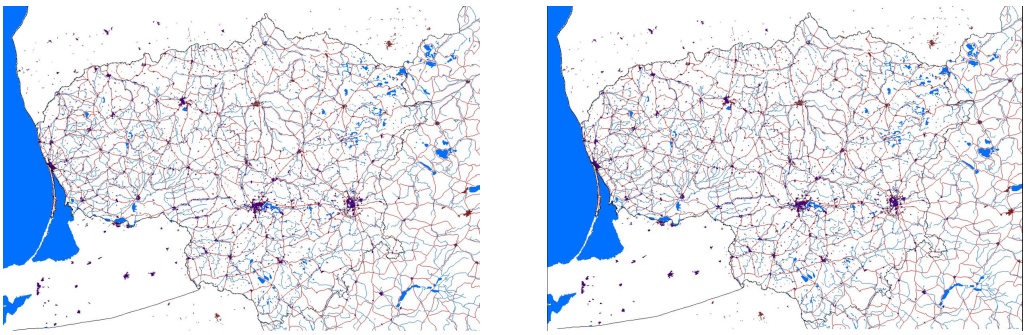
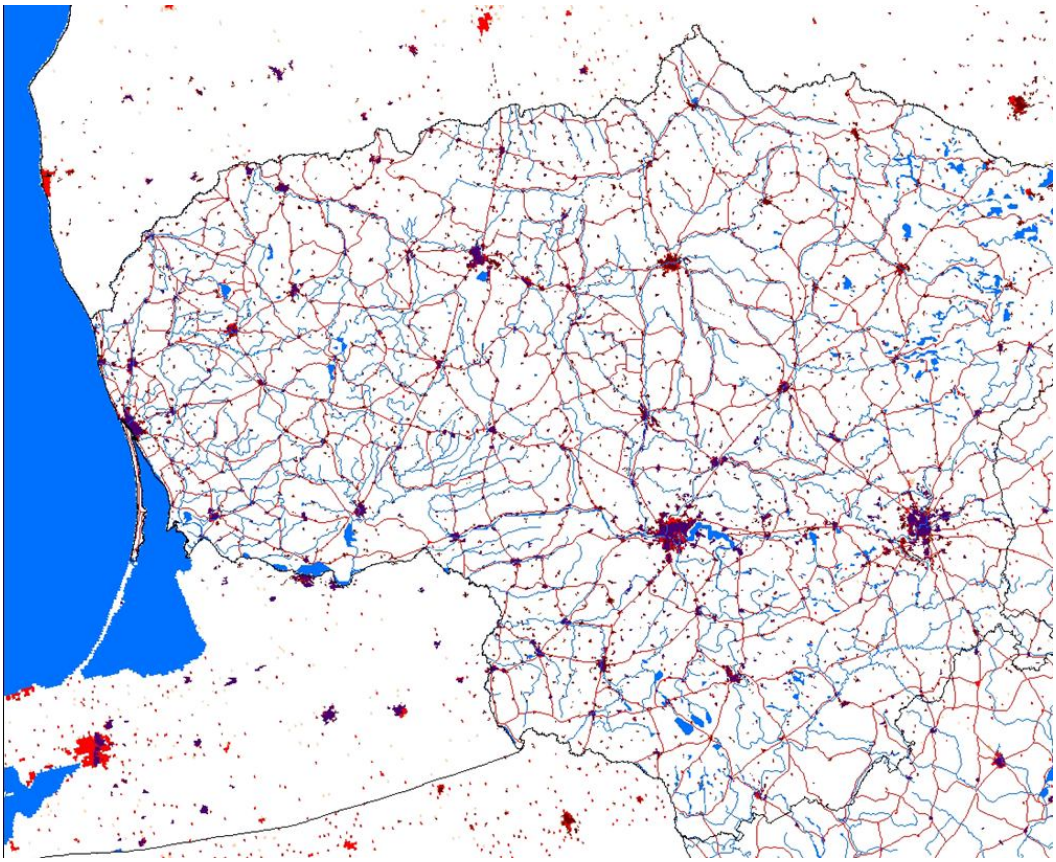


Figure 92 : structure urbaine de la Lituanie et de l'enclave de Kaliningrad en 2000.



Dix ans après l'indépendance des Pays baltes, la fin de l'URSS et du régime communiste en Europe, le territoire lituanien, comme celui des Etats voisins (Pologne, enclave de Kaliningrad, Biélorussie et Lettonie), va être caractérisé par une intense urbanisation. Urbanisation qui va être caractérisée en Pologne, dans l'enclave de Kaliningrad en Lituanie et en Lettonie par :

- ✓ Une croissance urbaine contiguë des centres urbains et des agglomérations, mettant fin à la politique de limitation de la croissance urbaine des villes soviétiques.
- ✓ Une intense urbanisation dispersée (habitat individuel) en Lituanie, dans le nord de la Pologne, autour de Kaliningrad (et sa partie ouest) et le sud de la Lettonie. Processus d'urbanisation dispersée qui tient en Lituanie et en Lettonie à la restitution ou, le plus souvent, à la redistribution des terres collectivisées ou spoliées durant la seconde guerre mondiale et les années qui ont suivi.

La croissance des agglomérations et des centres urbains, comme l'urbanisation dispersée affectant les espaces ruraux, est portée par le changement de régime politique, la libéralisation de l'économie, la privatisation des terres et des biens, alors que le système d'aménagement et de planification des territoires n'a pas changé. Les méthodes, les concepts, la législation (privatisation des terres mis à part) restent les mêmes. A titre d'exemple, la mise en place de nouveaux concepts

d'aménagement, associée à un nouveau découpage administratif prenant en compte l'émergence des processus de métropolisation, a été introduite dans l'enclave de Kaliningrad, comme dans toute la fédération de Russie en 2007-2008.

Les formes d'urbanisation qui en résultent, dépendent à la fois du modèle territorial qui a été façonné par le système communiste sur lequel l'urbanisation s'appuie, mais également, comme en Lituanie et en Lettonie sur la structure territoriale pré–soviétique mise en place entre le 16e et le 19e siècle dans les espaces ruraux. Il se caractérise par un habitat dispersé (distant de 1 à 3 Km) de fermes composées chacune de quatre bâtiments (maison, étable, ferme, sauna) et de villages linéaires le long d'une route (deux à trois bâtiments pouvant être joints formant un même ensemble de bâtiments).

Cette période est marquée par des processus de différenciation spatiale marqués entre les nouveaux Etats avec l'apparition de nouveaux Etats, de nouveaux modes d'organisation de l'espace sur la base de dynamiques géographiques, spatiales et territoriales similaires - la croissance urbaine – et d'un « input » politique commun, la privatisation et la restitution des terres. L'ensemble des centres urbains, quel que soit le poids démographique, la taille, etc., (villages, centres urbains, villes, agglomérations) est affecté par la diffusion de l'urbanisation. Ce processus géographique est dense et relativement homogène sur l'ensemble du territoire lituanien. La structure urbaine soviétique couvre de façon homogène la Lituanie, à l'instar de la structure de l'habitat rural pré–soviétique. Il s'appuie en Lituanie sur un réseau de villages urbains et d'habitats dispersés.

L'oblast de Kaliningrad est caractérisé par un important processus de périurbanisation autour de l'agglomération de Kaliningrad, le long du littoral et de l'axe routier Est–Ouest–Kaliningrad, auquel s'ajoute, comme en Lituanie, un processus de densification intra–urbain avec la construction d'immeubles, de centres commerciaux sur les espaces verts séparant les HLM.

Figure 93 : densification des espaces intra–urbains et croissance urbaine.

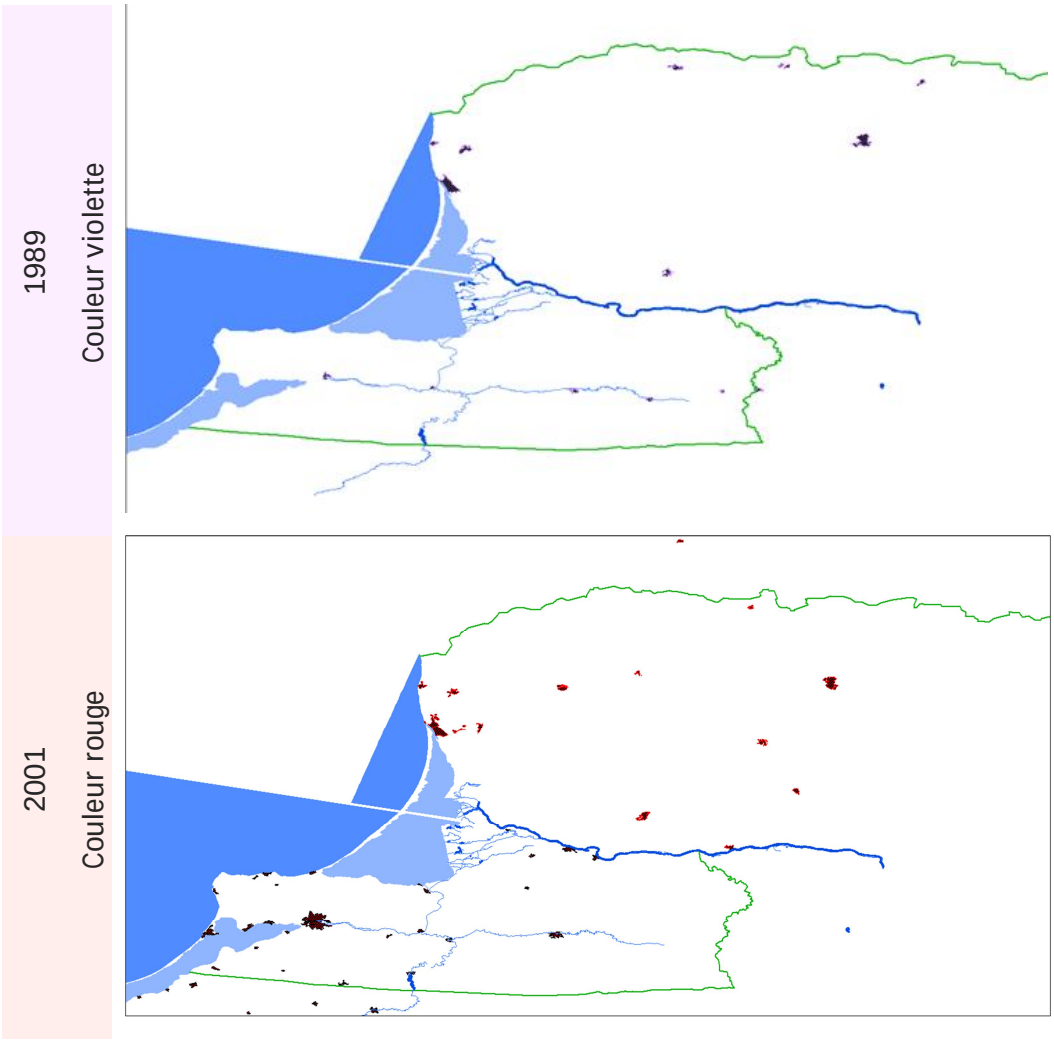
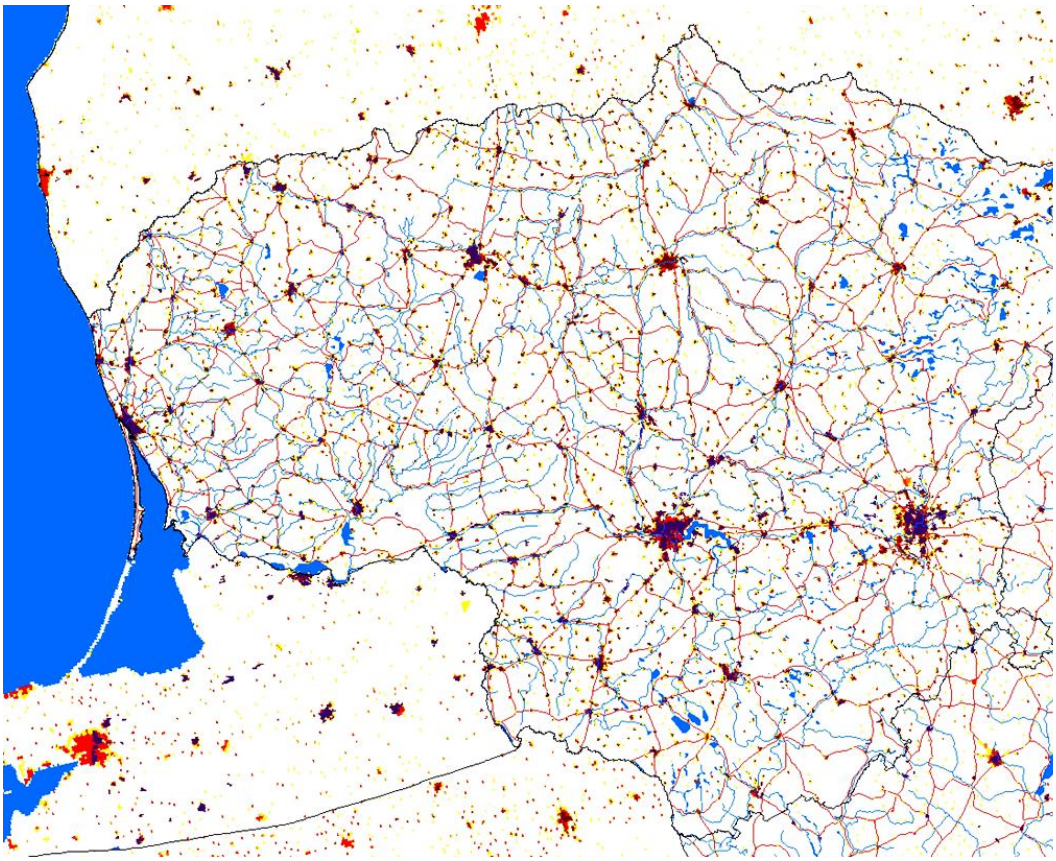


Figure 94 : structure urbaine de la Lituanie et de l'enclave de Kaliningrad 1989–2001–2007.



Légende : noir (1989), rouge (2001), jaune (2007), bleu (Mer Baltique)

Entre 2001 et 2007, l'essentiel des processus d'urbanisation en Lituanie est lié à la périurbanisation. Périurbanisation qui s'appuie sur les villages urbains des anciens kolkhozes et les petites villes érigées durant le soviétisme en centre de commandement régional. Ce processus de périurbanisation rayonnant autour des centres urbains jusqu'à 40 Km (analyse de terrain - dernière mission de terrain en Lettonie et en Lituanie – août 2011) des agglomérations comme Kaunas, Vilnius, Klaïpeda ou Riga (Lettonie) est associé à un processus de densification de l'habitat dans l'espace rural qui résulte d'une moindre pression foncière. Ce phénomène « classique » d'étalement spatial de l'aire « d'influence urbaine » des agglomérations générant des territoires en métropolisation en constante expansion spatiale. Ce phénomène d'extension spatiale est actuellement en train de modifier la fonction et la configuration spatiale des villages urbains comme Rumsiskes situés à mi-parcours de la zone d'extension spatiale de la métropolisation avec l'installation de centres commerciaux, de loisirs et de services (Rumsiskes est situé à 23 Km de Kaunas – soit un trajet de quinze minutes – et à 70 Km de Vilnius, le long de l'autoroute Kaunas–Vilnius).

Ces anciens villages urbains construits avec la création des kolkhozes (et d'infrastructures hydro–électriques comme à Rumsiskes), lieux de la

périurbanisation durant les dix dernières années, changent de statut depuis 2011, passant d'espace périurbain monofonctionnel à celui de lieux d'habitats, de loisirs et de services.

Le rétablissement des frontières a fait émerger, vingt ans après la fin du régime communiste, des processus de différenciation spatiaux et temporels importants qui tiennent à la prégnance des structures spatiales et territoriales existantes, des systèmes politiques et administratifs et de la culture. Le rôle et la valeur de l'histoire sur ces territoires en métropolisation sont insignifiants tellement ces territoires ont été remodelés, métissés, fragmentés, reconstitués ses deux cents dernières années. Le problème central est celui de l'identité. Identité qui a été réinventée par les soviétiques sur des versions historiques pour le moins « sélectives » et discriminatoires, identité des indépendances ou de la fin du soviétisme qui est remodelée sur des mythologies et des omissions historiques toutes aussi contestables. C'est la négation du passé qui prédomine. Ces mêmes territoires ont connu depuis la fin de la seconde guerre mondiale des transformations importantes de la composition ethnique et culturelle de la population :

- ✓ Le passage de la Lituanie d'un Etat séculaire balte multiculturel et multiconfessionnel (fortes minorités polonaises, prussiennes, allemandes, russes, suédoises) (catholique, juive et une minorité orthodoxe) à un Etat confessionnel homogène et majoritairement balte lituanien (plus de 85% de la population vivant dans le pays, russes et polonais représentant presque 15% de la population).
- ✓ La disparition de la Prusse entre la Pologne, l'enclave de Kaliningrad (territoire multiculturel de 1,5 million d'habitants composé majoritairement de moldaves, d'ukrainiens, de russes, de kazakhs et de tatars) et la Lituanie. La Prusse orientale était composée majoritairement de populations prusso–lituaniennes, prussiennes et allemandes. La prégnance spatiale et territoriale prussienne reste forte sur l'organisation de l'espace géographique.

Négation du passé qui n'affecte pas les processus de métropolisation et de transformation des territoires dans sa globalité mais qui, localement, ont un impact considérable sur la structure territoriale et les dynamiques spatiales dans le sens où elles s'appuient sur des stratifications territoriales qui, en Lituanie, en Lettonie, dans le nord de la Pologne ou dans l'enclave de Kaliningrad, depuis le 15e-16e siècle se juxtaposent spatialement sans avoir disparues.

Ce processus de différenciation spatiale et territoriale va s'exprimer entre 1991 et le début des années 2000 :

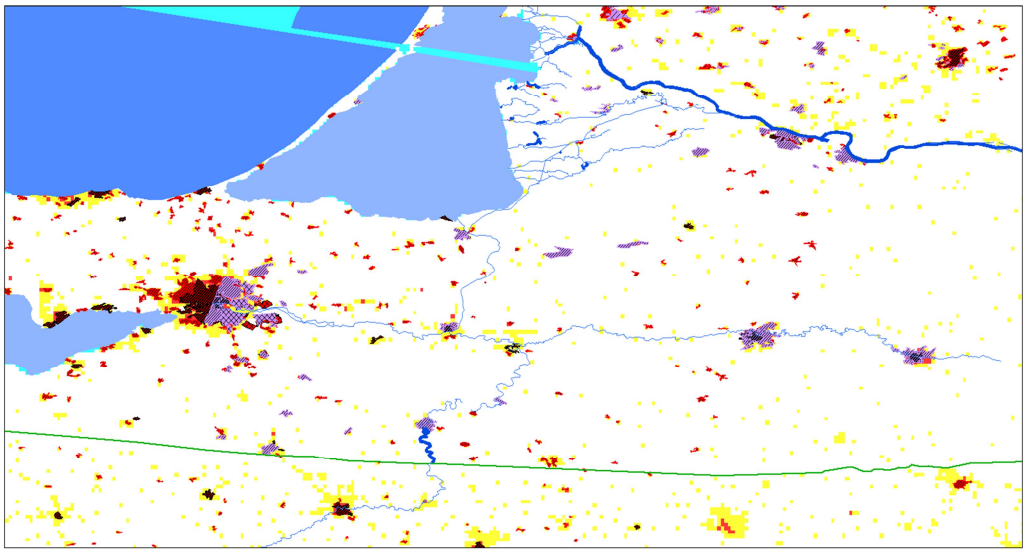
- ✓ En Lituanie et dans une moindre mesure en Lettonie, par une croissance urbaine, la périurbanisation et la dispersion de l'habitat en milieu rural.
- ✓ Dans l'enclave de Kaliningrad, par une périurbanisation circonscrite à Kaliningrad et à la côte baltique.

- ✓ Dans le nord de la Pologne par une urbanisation circonscrite également aux centres urbains et une faible périurbanisation.

Dans la décennie 2000, l'ensemble de l'espace baltique va être caractérisé par un processus de convergence des dynamiques spatiales et territoriales, plus particulièrement en Pologne, avec des processus de périurbanisation soutenus autour des centres urbains gommant le décalage temporel avec la Lituanie (phénomène de « rattrapage » spatial lié à la hausse du niveau de vie). Ce processus d'urbanisation et de périurbanisation va être soutenu jusqu'à la crise financière de 2008 qui a fortement freiné la croissance urbaine (à l'exception de l'enclave de Kaliningrad qui connaît une croissance économique, une urbanisation et une modernisation de ses infrastructures avec la construction d'autoroutes, de centres commerciaux intégrés, etc., soutenues grâce à son statut de zone franche et à l'installation de nombreuses usines et entreprises internationales). Périurbanisation qui reste circonscrite dans l'oblast de Kaliningrad à l'agglomération et à la structure territoriale héritée de la Prusse. L'impact du code de l'urbanisme soviétique jusqu'à la réforme de 2009–2010 touchant l'ensemble de la Fédération de Russie explique également la concentration de l'urbanisation à l'ancienne structure prussienne.

Figure 95 : urbanisation, périurbanisation et diffusion de l'habitat en zone rurale (1989–2007).

Sud de la Lituanie, enclave de Kaliningrad, Nord de la Pologne.



Légende : violet (1989), rouge (2001), jaune (2007), bleu (Mer Baltique)

On notera l'absence de données sur la partie ouest de Kaliningrad en 1989.

Analyse à l'échelle méso–urbaine

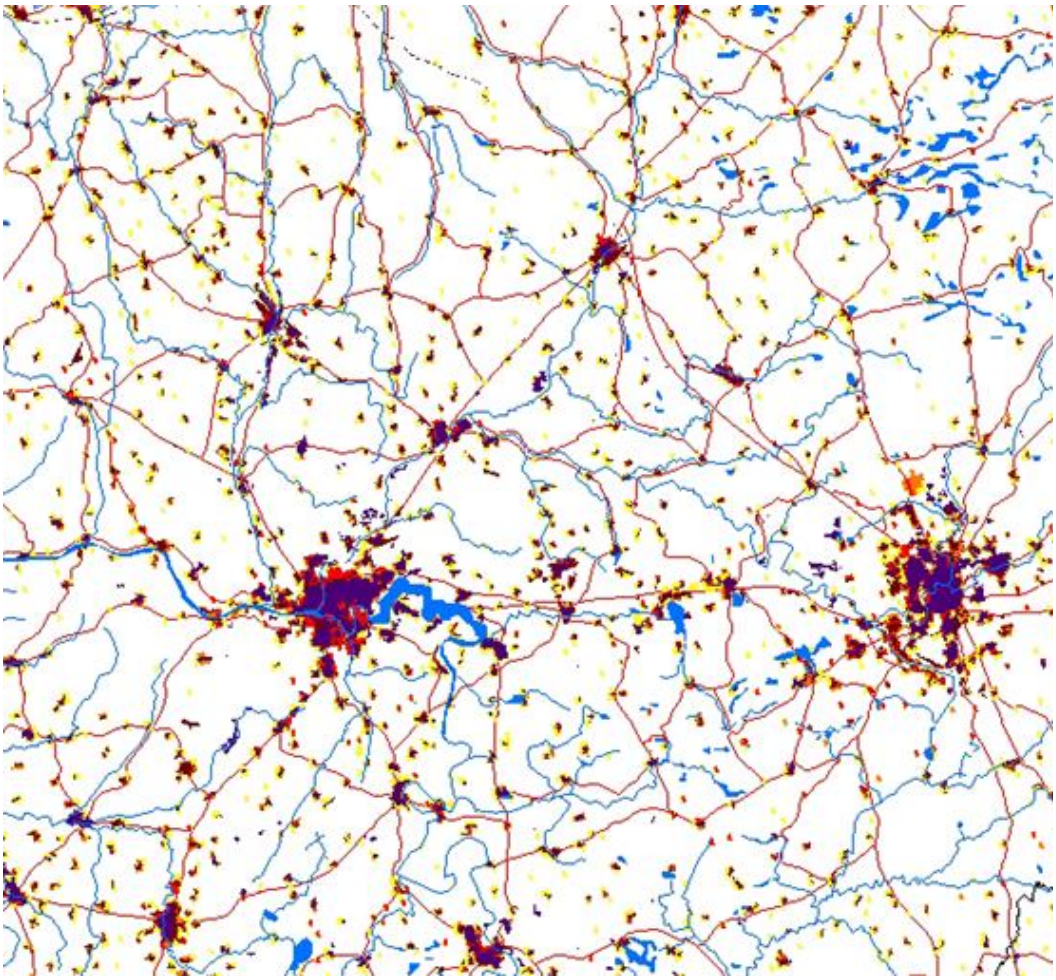
Les résultats obtenus à partir des simulations spatiales générées par télédétection mettent à mal l'idée, datant de la veille du retour à l'indépendance en 1991, de constitution de trois axes de conurbation :

- ✓ Un processus de littoralisation nord–sud structuré autour de Klaïpeda (Šilutė–Klaïpeda–Palanga–Sventoji).
- ✓ Un second Panevėžys–Šiauliai.
- ✓ Le dipôle Vilnius–Kaunas.

Des trois corridors de développement urbain, seul l'axe littoral suivant l'ancienne route baltique (Königsberg–Riga) est marqué par une intense conurbation. Conurbation littorale (littoralisation) qui rayonne sur 40 Km autour de Klaïpeda en suivant l'axe Klaïpeda–Kretinga et l'axe autoroutier Klaïpeda–Kaunas. Elle se caractérise spatialement par l'essor de zones résidentielles périurbaines qui s'appuient à la fois sur les structures urbaines existantes (villages, petites villes comme Šilutė ou Kretinga) et sur la construction ex–nihilo de quartiers pavillonnaires sur les anciens terrains agricoles le long des axes de communication autoroutiers (Klaïpeda–Kaunas) (Klaïpeda–Kretinga) (Klaïpeda–Palanga–Kretinga–Sventoji).

L'axe Panevėžys–Šiauliai et le dipôle Kaunas–Vilnius, dans une moindre mesure, ne sont pas affectés par un processus d'intégration territorial par l'urbain. La conurbation urbaine n'existe pas. Le processus de conurbation et d'intégration territoriale s'exprime par les mobilités pendulaires avec, pour Kaunas–Vilnius, des centres urbains relais le long des 100 Km d'autoroute séparant les deux agglomérations.

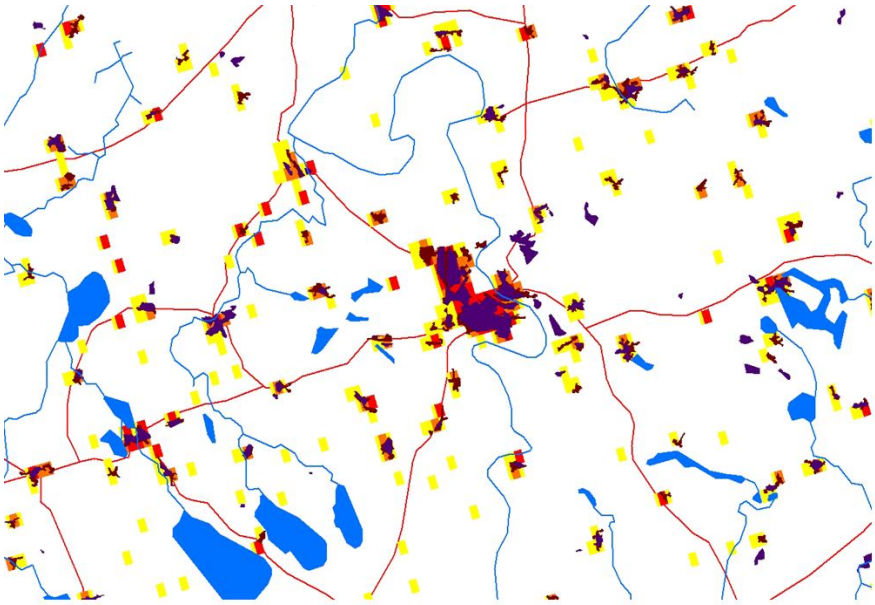
Figure 96 : extrait de la simulation de l'urbanisation (1989–2007), axe Kaunas–Vilnius.



Légende : violet (1989), rouge (2001), jaune (2007)

L'absence de conurbation tient à plusieurs éléments qui ont été évoqués, à savoir, la densification urbaine au sein même des villes, la dispersion de l'urbanisation sur les anciennes structures agraires pré–soviétiques (habitat agricole dispersé), la périurbanisation autour des centres urbains. Elle tient également au fait qu'elle s'exprime par les relations pendulaires de mobilité, par le faible nombre d'habitants : 3,3 millions d'habitants recensés en 2011, dont 1,2 million vivant officiellement à l'étranger sur un territoire 1/3 plus important que la Suisse. Ce modèle d'urbanisation se reproduit quelle que soit la taille du centre urbain.

Figure 97 : exemple d'Alytus.



Légende : violet (1989), rouge (2001), jaune (2007)

L'urbanisation en Lituanie tient essentiellement à un processus de transformation des modes de vie et d'habitat. Processus qui, avec un décalage temporel de trois à quatre décennies, s'exprime démographiquement par une baisse du nombre d'habitant de Kaunas et de Vilnius au profit de leur région. Processus démographique de métropolisation caractéristique marqué par une délocalisation (déconcentration) de la population urbaine au profit de zones urbaines « aréolaires », plus ou moins proches de l'agglomération (5 à 40 Km).

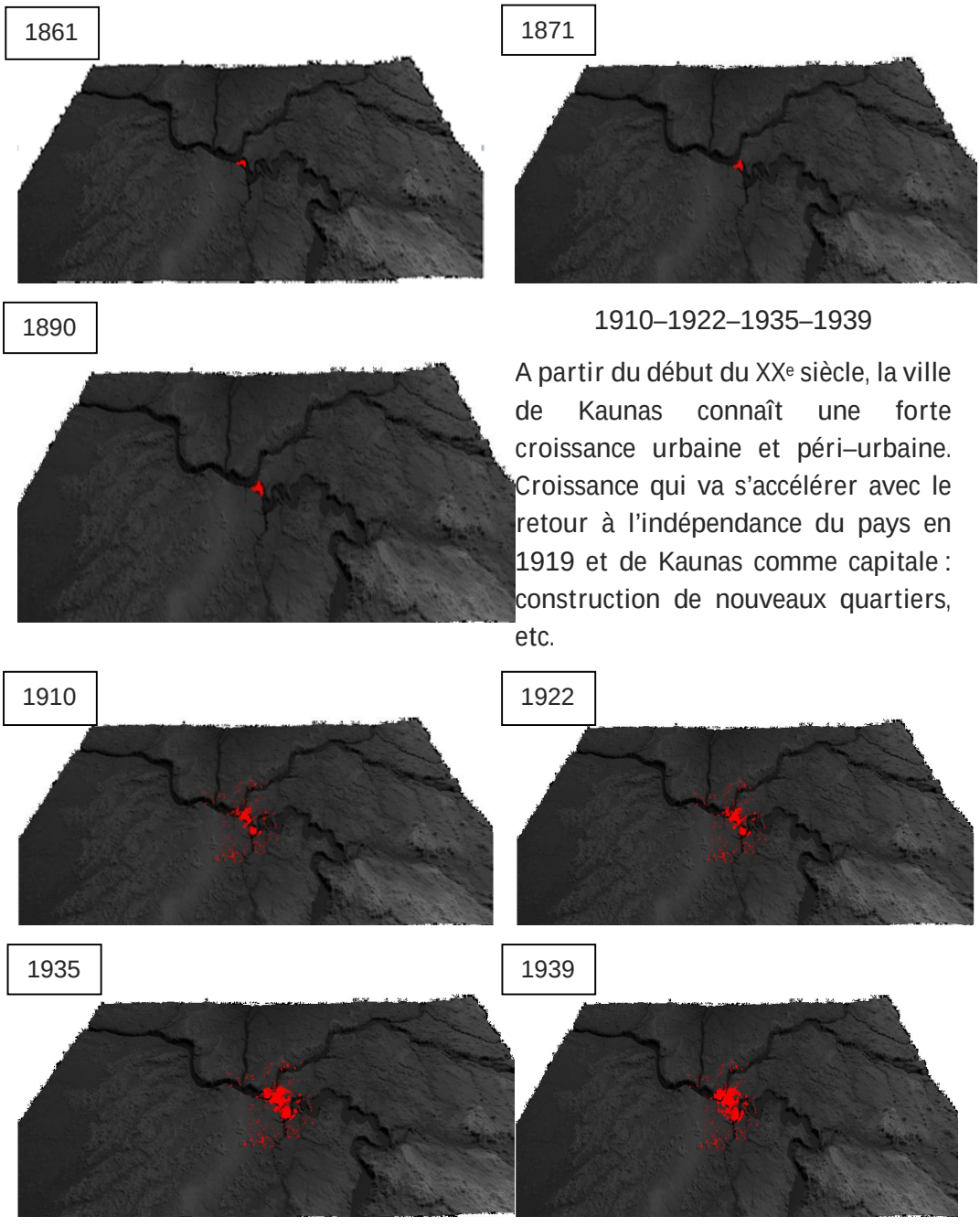
3.2.2. SIMULATION ET ANALYSE TEMPORELLE DE LA CROISSANCE URBAINE DE KAUNAS : 1861-2007

La modélisation par simulation empirique et la géo–visualisation 2D/3D de la croissance urbaine de l'agglomération de Kaunas, seconde ville du pays, pôle ouest du dipôle métropolisé Vilnius–Kaunas, a pour intérêt d'identifier les ruptures spatiales et temporelles marquant les différents stades de développement de la ville. Chacun de ces stades correspond à des périodes politiques, de développement économique et sociétal.

Figure 98 : développement urbain de la ville de Kaunas de 1861 à 2007.

1861–1871–1890

Ville de garnison de l'Empire Russe, Kaunas a un développement urbain relativement faible. La partie de la rive du Niémen, face à la ville historique, commence à s'urbaniser en 1890.



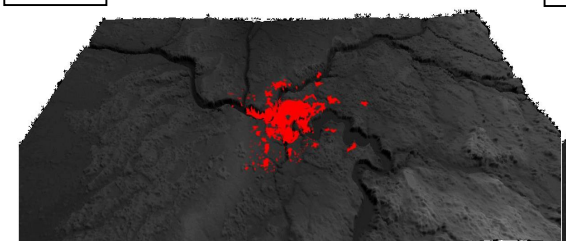
1910–1922–1935–1939

A partir du début du XXe siècle, la ville de Kaunas connaît une forte croissance urbaine et péri–urbaine. Croissance qui va s'accélérer avec le retour à l'indépendance du pays en 1919 et de Kaunas comme capitale : construction de nouveaux quartiers, etc.

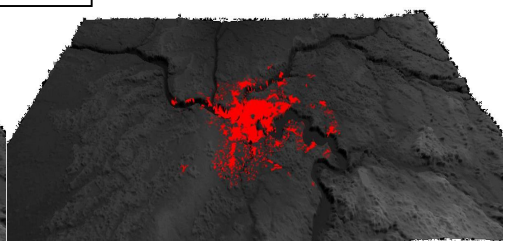
1940–1975 (seconde guerre mondiale, intégration dans l'Union soviétique) : absence de données cartographiques et aériennes.

1975–1979–1989 : la période soviétique est caractérisée par une seconde phase de transformation de la ville avec l'implantation des conglomérats industriels, des quartiers soviétiques HLM et l'émergence de territoires périurbains « aréolaires » distants de 5 à 30 Km du centre de Kaunas.

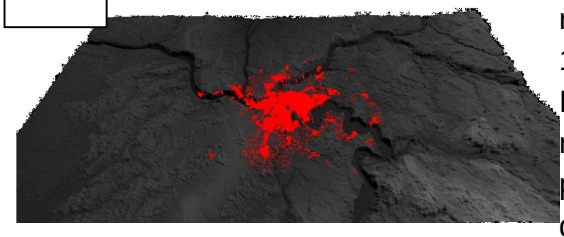
1975



1979

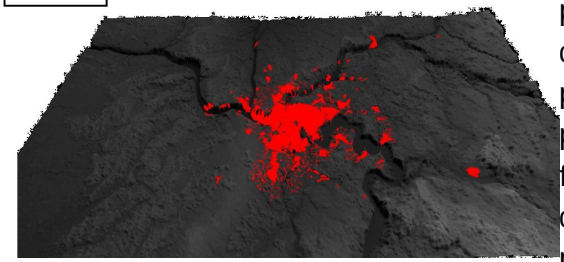


1989



1992 : L'image 2D/3D extraite du modèle de simulation spatiale de 1992 marque le point final de l'urbanisation de Kaunas sur le modèle soviétique. Il se caractérise par un processus de périurbanisation qui en l'espace de trois ans s'est accéléré.

1992



1992–1999–2001–2005–2007 : la période post–communiste est caractérisée par une accélération du processus d'urbanisation et de périurbanisation, l'émergence dès la fin des années 1990 de nouveaux centres périurbains distants de plusieurs dizaines de kilomètres, suivant les axes routiers et autoroutiers. La croissance urbaine est structurée par le modèle soviétique jusqu'à l'émergence d'une urbanisation de mobilité (*road urbanisation*). A partir des années 2000 on observe une forte croissance des centres périurbains, certains étant situés à plus 45 minutes de Kaunas.

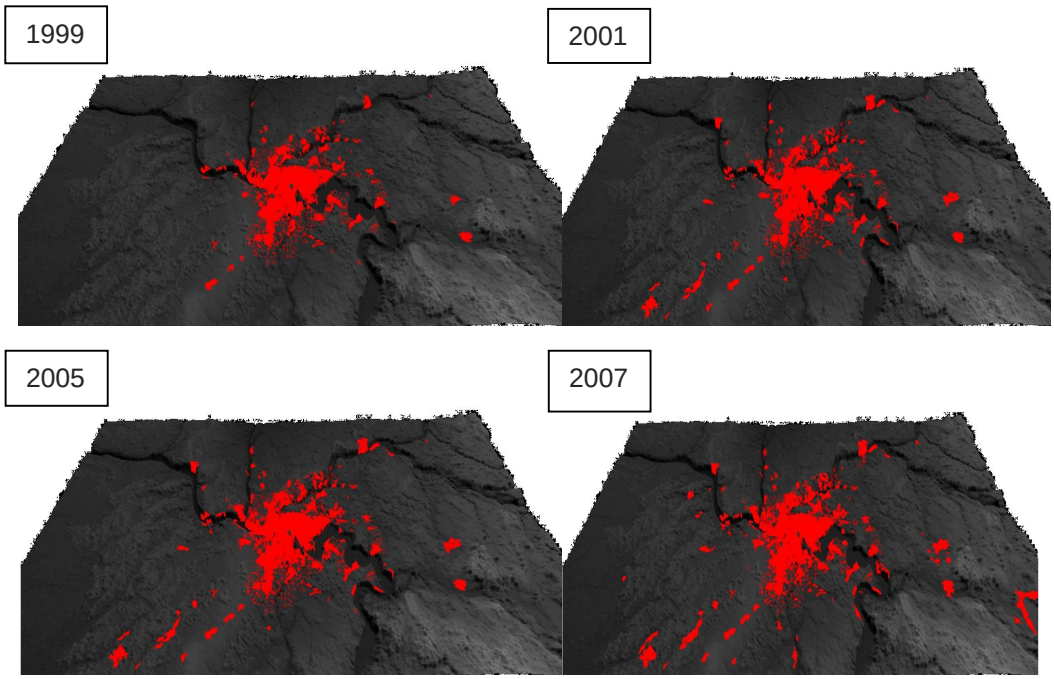
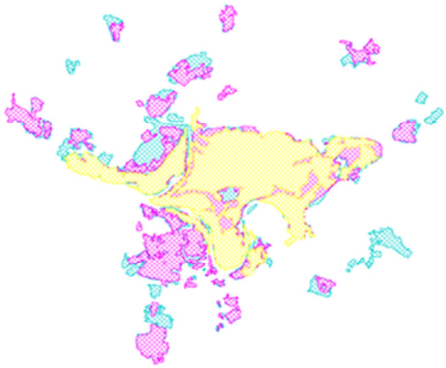


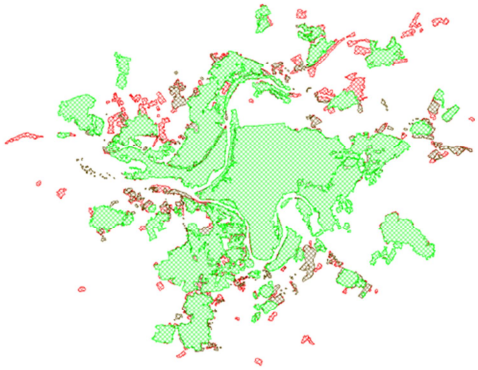
Figure 99 : représentation des trois phases de développement urbain.

Urbanisation en 1910

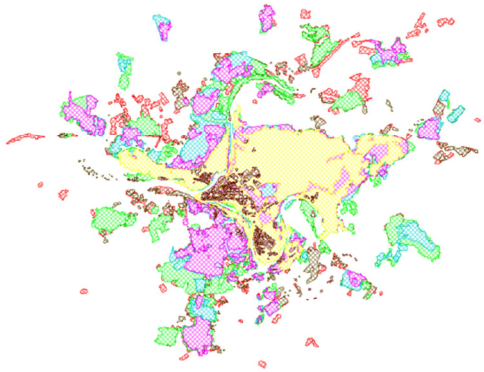
Urbanisation 1975–1989
Jaune (1975) – violet (1979)
bleu (1989)



Urbanisation 1992–2007
(vert : couverture urbaine en 1992)
(rouge : couverture urbaine en 2007)

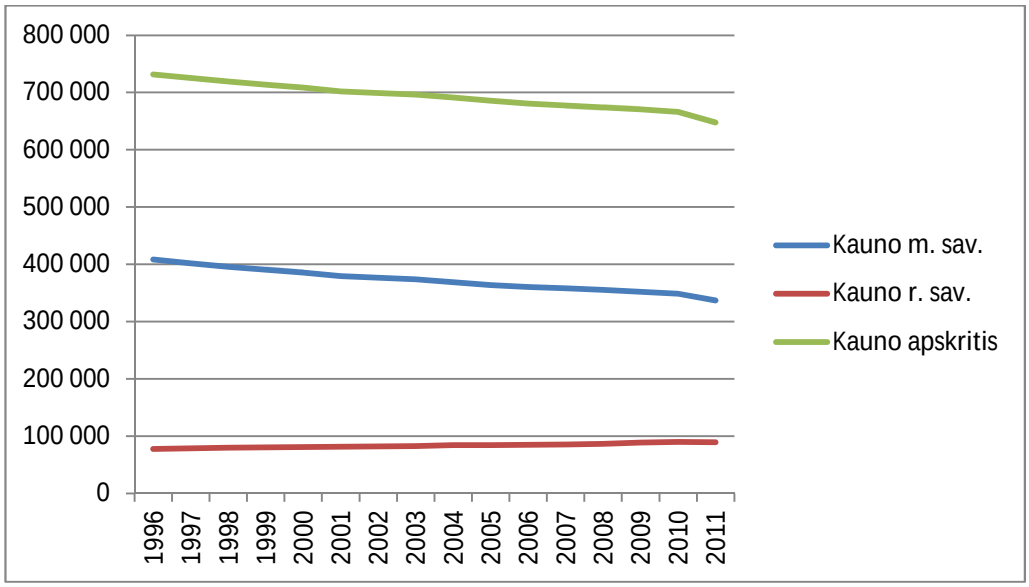


Structures urbaines en 2007



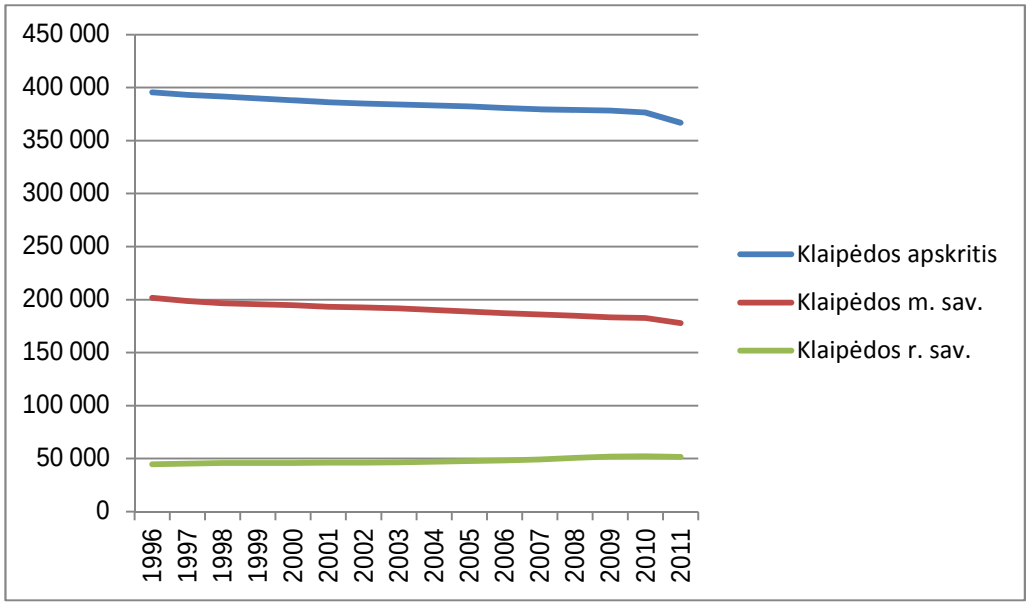
La constitution d'un territoire métropolisé sur des villes soviétiques fortement polarisées est visible sur les données statistiques (courbe rouge, périurbanisation de la région de Kaunas, bleu, baisse de la population urbaine de Kaunas), cela malgré le faible nombre d'habitants et une tendance généralisée de baisse de la population (courbe verte). Tendance que l'on retrouve entre 1996 et 2011 sur l'ensemble du territoire lituanien, à l'exception de Vilnius, qui par son statut de capitale a su, durant les années 2000, maintenir un nombre croissant d'habitants.

Figure 100 : évolution démographique de Kaunas.



Légende : (bleu) municipalité de la ville de Kaunas, (rouge) municipalité de la région de Kaunas, (vert) comté de Kaunas.

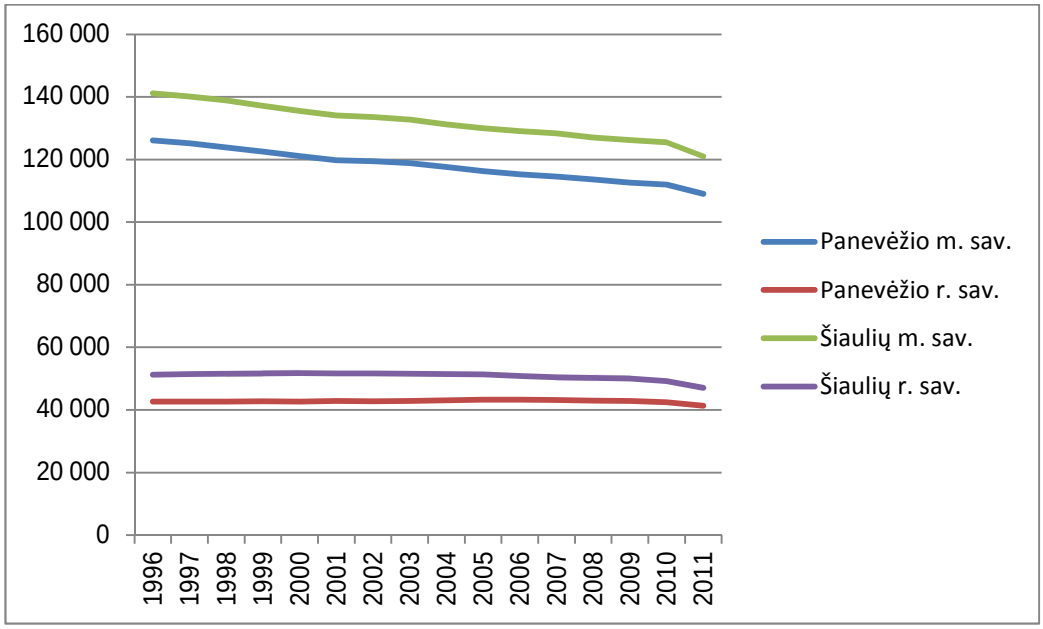
Figure 101 : évolution démographique de Klaïpeda.



Légende : (bleu) comté de Klaïpeda, (rouge) municipalité de la ville de Klaïpeda, (vert) municipalité de la région de Klaïpeda.

Dans une moindre mesure, l'axe de conurbation Panevezys–Siauliai identifié en 1991 se caractérise comme pour l'ensemble du territoire lituanien, à l'exception de Vilnius, par un maintien de la population urbaine, rurale et périurbaine dans un contexte général de baisse de la population. C'est ce qui fait la spécificité de la métropolisation en Lituanie. Dans le cadre d'une baisse de la population, les territoires régionaux ceinturant les agglomérations comme Vilnius, Kaunas, Klaïpeda, Siauliai, « contiennent » leur démographie par la périurbanisation et la diffusion de l'habitat dispersé dans les campagnes.

Figure 102 : évolution démographique de l'axe Panevezys–Siauliai.



Légende : (bleu) municipalité de la ville de Panevėžys, (vert) municipalité de la ville de Šiauliai, (rouge) municipalité de la région de Panevėžys, (violet) municipalité de la région de Šiauliai.

3.2.3. IMPACT DE L'EMERGENCE DES FRONTIERES

EXEMPLE DE LA PRUSSE ORIENTALE (OBLAST DE KALININGRAD, PETITE LITUANIE)

Entre 1989 et 2007, avec le changement de régime politique, social et économique consécutif à la fin de l'URSS et l'introduction du système libéral dans les différentes entités politiques, constituant les anciens territoires prussiens orientaux de la zone côtière de la Baltique, la structure territoriale soviétique des deux régions a connu des transformations importantes : la densification des villes par la construction de bâtiments, la dispersion spatiale de l'habitat et la périurbanisation. Ces modifications territoriales et géographiques tendent à transformer les organisations territoriales et les structures spatiales de la région côtière Gdansk–Kaliningrad–Klaïpeda. Elles ont cependant eu des évolutions différentes en raison des modèles d'aménagement territoriaux distincts.

La structure territoriale de la petite Lituanie et de la région de Klaïpeda a subi, durant la période soviétique, une transformation radicale intégrant les centres urbains de la petite Lituanie dans le système urbain national avec son réseau de centres urbains et de villages urbains ruraux.

La structure territoriale de l'oblast de Kaliningrad a peu varié depuis la seconde guerre mondiale, reprenant l'organisation spatiale de la Prusse orientale. La structure urbaine de l'enclave est concentrée autour de Kaliningrad et les villes moyennes de la période prussienne situées principalement sur la partie ouest et la zone côtière.

L'évolution de la structure de la région côtière se caractérise par un processus important géographique commun : la croissance des centres urbains et la périurbanisation. La dynamique géographique de périurbanisation en cours est similaire à celle observée en Europe occidentale entre 1970 et 1990. Le processus de périurbanisation prend différentes formes : la dispersion spatiale sur le foncier rural, croissance des villages existants, des petites villes ou l'émergence de nouveaux quartiers de banlieue à la distance de 10 à 40 Km de grandes villes comme Kaliningrad ou Klaïpeda.

Nous observons sur les cartes urbaines de 2001 et 2007 (cf. partie précédente) une urbanisation côtière importante surtout dans la partie nord de la péninsule - Primor'ye, Svetlogorsk, Pionerskij dans le sud autour de la lagune et dans Yantarnyy - Baltijsk côte ouest. La structure urbaine dans l'oblast de Kaliningrad est d'abord concentrée autour de Kaliningrad (système radioconcentrique autour de Kaliningrad) et, d'autre part, suivant deux axes Ouest–Est et Nord–Sud le long des réseaux routiers (autoroutes E77 européenne et E28). Entre la période 2001-2007, la dynamique d'urbanisation de Kaliningrad touche la quasi–totalité de l'enclave en s'appuyant sur les petites villes comme Sovetsk, Cernjahovsk, Gusev, etc.

Dans l'oblast russe, l'influence et le poids de Kaliningrad déterminent la forme et la structure de la périurbanisation. La structure territoriale urbaine s'organise autour d'un système radial autour de Kaliningrad et le long des axes autoroutiers Ouest–Est « Kaliningrad–Cernjahovsk–Gusev » et Nord–Sud « Sovetsk–Talpaki/Sovetsk–Cernjahovsk–Krylovo ». La structure du réseau de transport du territoire de Kaliningrad est proche de la densité de la structure de communication en Lituanie. Les villages urbains lituaniens et les petites villes sont interconnectés avec plusieurs autres villages urbains et les petites villes. Dans les deux cas, le réseau routier de haute densité de transport constitue un fort potentiel de mobilité. Il est un élément central des territoires métropolisés.

Ces deux territoires de l'ancienne Prusse orientale, Kaliningrad et la région de Klaïpeda, sont entrés dans une dynamique de métropolisation, phénomène qui est consécutif à un système politique et économique libéral (bien que la Lituanie apparaissait comme une structure territoriale soviétique proche d'un modèle de territoire métropolisé) mais surtout à une transformation des modes de vie et des comportements socio–spatiaux que la hausse du niveau de vie permet. C'est en ce sens, par la hausse du niveau des populations, que l'économie libérale est un des « inputs » conduisant à l'émergence de territoires métropolisés.

Nous sommes devant un phénomène géographique de « convergence » spatiale et de « rattrapage » avec la fin du communisme et l'intégration des territoires de l'ancienne Prusse orientale dans l'économie de marché.

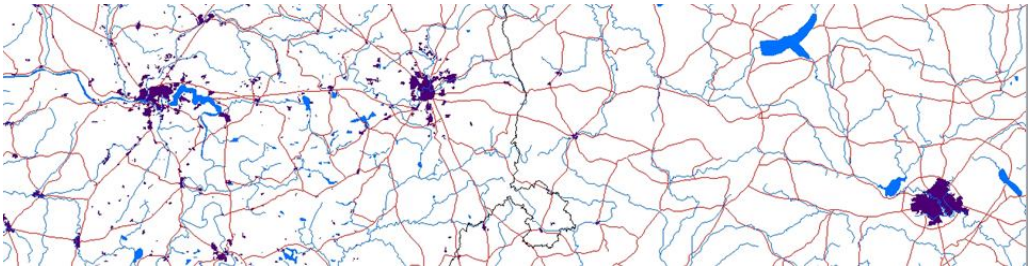
EXEMPLE DE LA PARTIE DU CORRIDOR (HINTERLAND KLAÏPEDA–MOSCOU) KAUNAS–VILNIUS–MINSK

La fin de l'URSS a segmenté le corridor de l'hinterland Klaïpeda–Moscou entre différents pays : La Lituanie, la Biélorussie, l'Ukraine et la Fédération de Russie. Ce corridor d'échange économique et de transport reste l'artère de développement central de la Lituanie, 40% de ses échanges commerciaux se faisant avec la Russie. La Biélorussie, partie majeure de l'ancien Grand–Duché de Lituanie annexé en 1759 par la Russie, est considérée comme l'espace économique et d'investissement et d'échange prioritaire du pays. C'est le seul vrai débouché commercial du pays. La Lituanie, malgré l'intensité des échanges le long de la via Baltica (Varsovie–Kaunas–Riga), les projets supportés par l'Union européenne (TGV Berlin–Varsovie–Kaunas–Riga), autoroute, n'a pas réussi en 2011 à réorienter ses réseaux économiques et d'échanges datant de la période soviétique.

Figure 103 : évolution de la portion de corridor Kaunas–Vilnius–Minsk (1986-2007) (extrait du modèle de simulation).

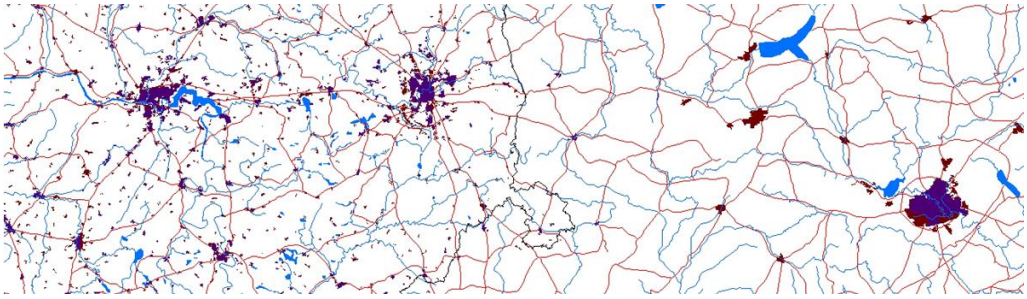
1986

Vilnius et Kaunas, contrairement à Minsk sont caractérisés par l'existence de territoires périurbains rayonnant autour des deux dipôles. Ils correspondent aux centres urbains liés à la présence de conglomérats et de kolkhozes. (Absence de données satellites et aéroportées sur la partie Vilnius–Minsk).



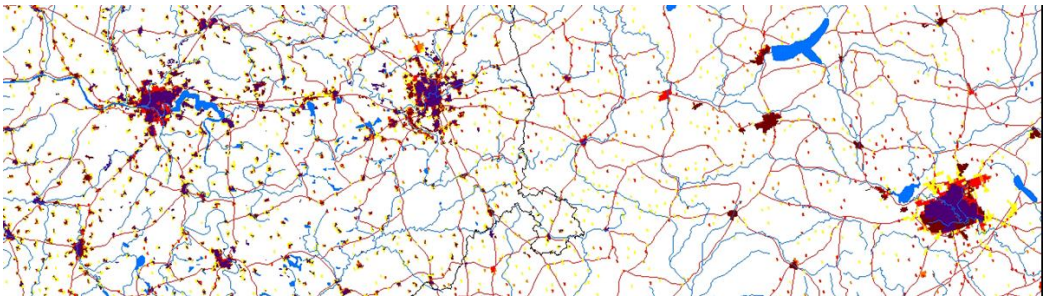
2001

Dix ans après la fin de l'URSS, les trois agglomérations connaissent une croissance urbaine importante. Vilnius et Kaunas se caractérisent par une urbanisation diffuse et dense, la région de Minsk par une croissance urbaine des centres urbains secondaires, faiblement développés en 1986 (absence de données satellites et aéroportées).



2007

Seize ans après la fin du régime soviétique, le dipôle Kaunas–Vilnius est marqué par les processus d'urbanisation, densifiant, « rurbanisant » plus encore la campagne. La région de Minsk connaît un processus de dispersion de l'habitat similaire, bien que moins dense, qui s'appuie également sur les anciens habitats (fermes) dispersés paysans lituano–polonais. Minsk connaît une croissance urbaine importante qui dépasse le périphérique autoroutier ceinturant la capitale biélorusse.

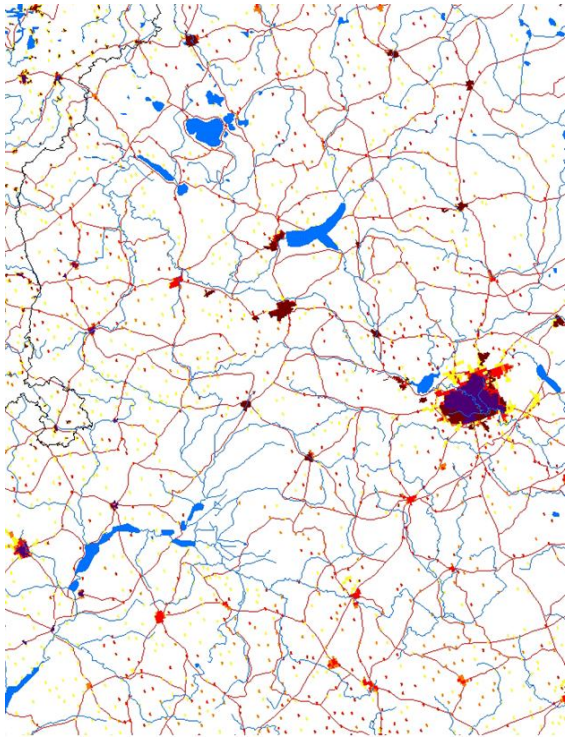


En 2007, seize ans après la fin de l'URSS, la dichotomie territoriale entre la partie ouest de la Lituanie et la partie Est de la Biélorussie, territoire ayant gardé une structure territoriale commune jusqu'en 1945 (peuplements lituaniens et polonais) est marquée. On observe cependant un processus d'urbanisation convergent en milieu rural avec la diffusion de l'habitat sur les anciens parcellaires d'implantation des fermes lituaniennes ou lituano–polonaises. Nous sommes, comme en Lituanie, en présence d'un processus d'urbanisation guidé, défini, structuré par la prégnance antropo–culturelle des populations baltes. Nous sommes face à un modèle culturel d'urbanisation préchrétien païen datant d'avant le Moyen–âge. Ce modèle de territorialisation et de territorialité constitue un élément structurant fondamental de la culture balto–lituanienne sur lequel se fonde une partie de l'identité balte. Modèle de territorialisation et forme de territorialité que l'on retrouve encore sur la partie ouest de la Biélorussie

(partie du Grand–Duché de Lituanie, puis de la République des deux nations), la Prusse ayant disparue et la Lettonie étant traversée par une quintuple influence à dominante Balte (jusqu'au nord de Riga), Finnoise, Russe, Suédoise et Allemande.

L'essentiel de la croissance urbaine est porté par Minsk et bien qu'important, dans une moindre mesure, par les centres urbains secondaires.

Figure 104 : croissance urbaine de l'agglomération de Minsk entre 1989 et 2007.



TRANSFORMATION DE LA STRUCTURE PAYSAGERE (FRONTIERE LITUANIE–FEDERATION DE RUSSIE–REGION DE KALININGRAD)

INTEGRATION TERRITORIALE, FRONTIERES ET PARTITION SPATIALE

Le rétablissement des frontières au sein de l'ex–URSS, notamment entre l'oblast de Kaliningrad et la République lituanienne, a en l'espace de quinze ans, transformé la structure de l'espace géographique et des paysages. Transformation qui est due au changement de régime et aux évènements sociétaux postindépendance dans les années 1990 qui ont eu un impact direct sur la structure spatiale et géographique dont les paysages sont les constituants géographiques « matériels » détectables et identifiables par télédétection.

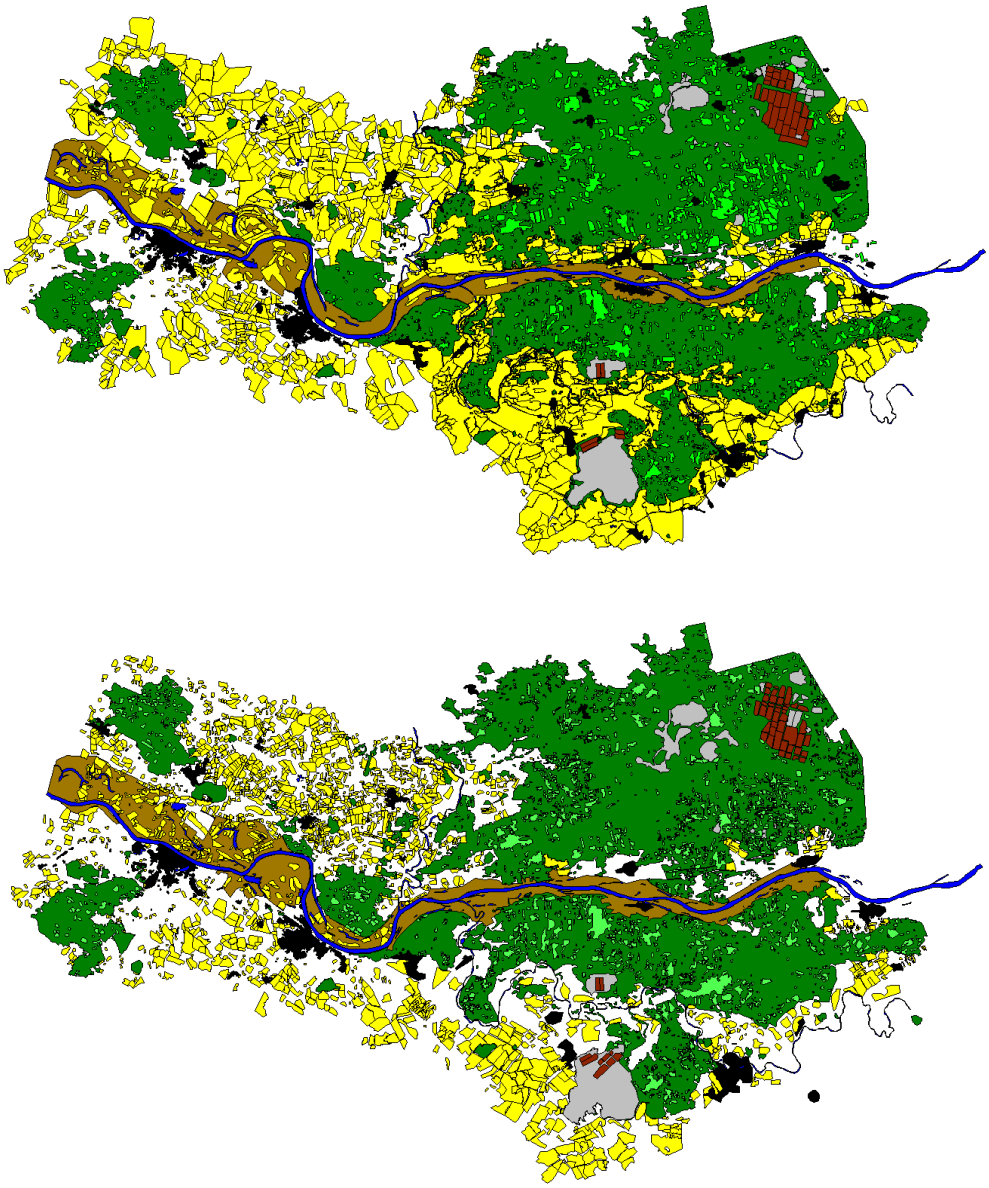
L'analyse des transformations territoriales sur la frontière Sud de l'enclave de Kaliningrad présente une toute autre situation. Les mutations de l'espace géographique détectées par l'analyse temporelle des séries d'images Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ montrent des dynamiques spatiales totalement différentes, voire opposées à celles en cours en Lituanie sur la partie Nord de la frontière de l'oblast. Situation totalement différente entre la frontière avec la Lituanie et celle avec la Pologne qui tient au fait que la Lituanie et Kaliningrad étaient deux composantes de l'URSS avec des politiques économiques similaires. La Pologne et l'URSS étaient séparées par la frontière au Sud de la région de Kaliningrad, frontière qui existe toujours et celle entre la République socialiste soviétique de Lituanie (RSSL) qui a disparu depuis l'intégration des deux pays dans l'Union européenne.

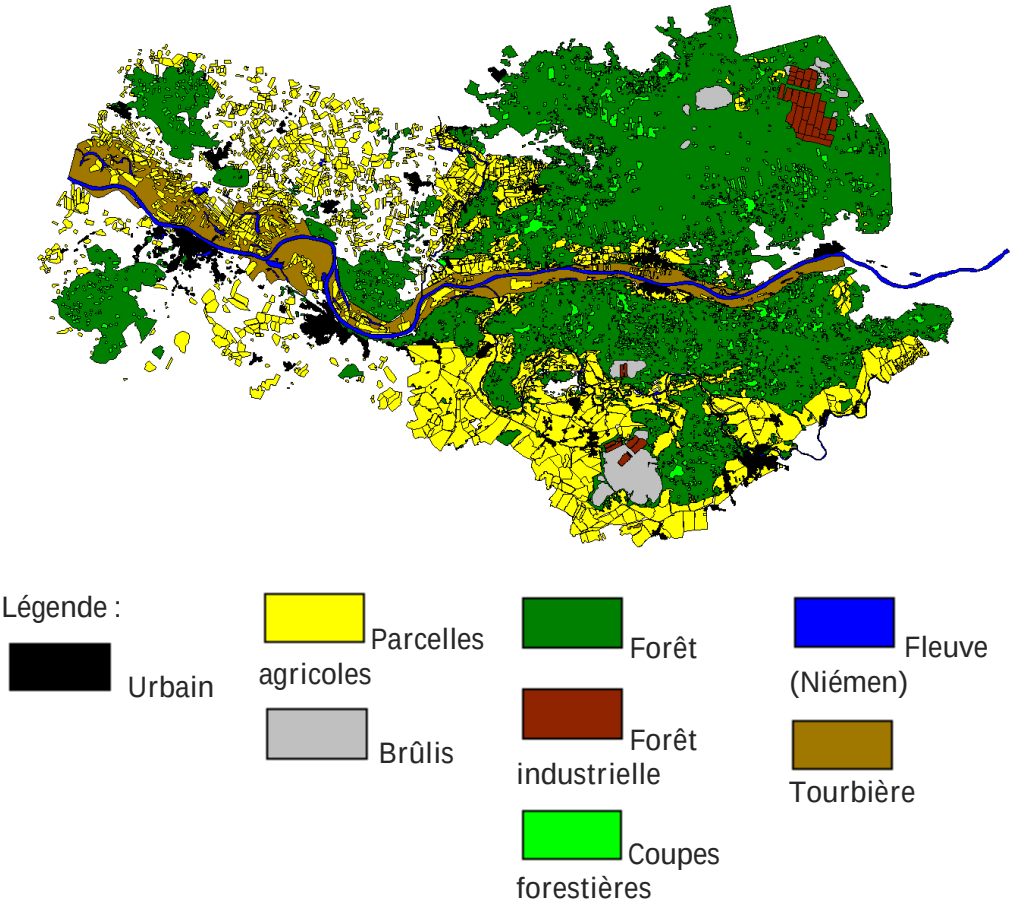
L'analyse de l'évolution de l'ancienne Prusse orientale depuis la fin de la « guerre froide » permet avec le maintien de la région de Kaliningrad dans la Fédération de Russie, suite au refus de la Lituanie indépendante de l'intégrer dans son espace territorial (pour ne pas déséquilibrer le ratio ethnique au profit des « russes » qui composeraient alors 25% de la population), d'observer l'impact du rétablissement des frontières. Egalement de mesurer l'impact et de leur permanence temporelle depuis 1945 avec la frontière entre la Polono–soviétique, puis Polono–Russe et la frontière Lituano–Russe depuis 1991 sur l'évolution de la structure des territoires.

EVOLUTION DE L'ESPACE TRANSFRONTALIER LITUANO–RUSSE

Avec le rétablissement des frontières en 1991 issu de l'éclatement de l'URSS, l'observation de l'évolution de l'espace transfrontalier lituano–russe permet de mesurer l'impact de l'instauration des limites politiques sur un territoire relativement homogène spatialement (territoires de l'ancienne Prusse orientale, puis soviétiques à compter de 1945) et soumis à une politique d'aménagement similaire (théoriquement identique) durant quarante-six ans.

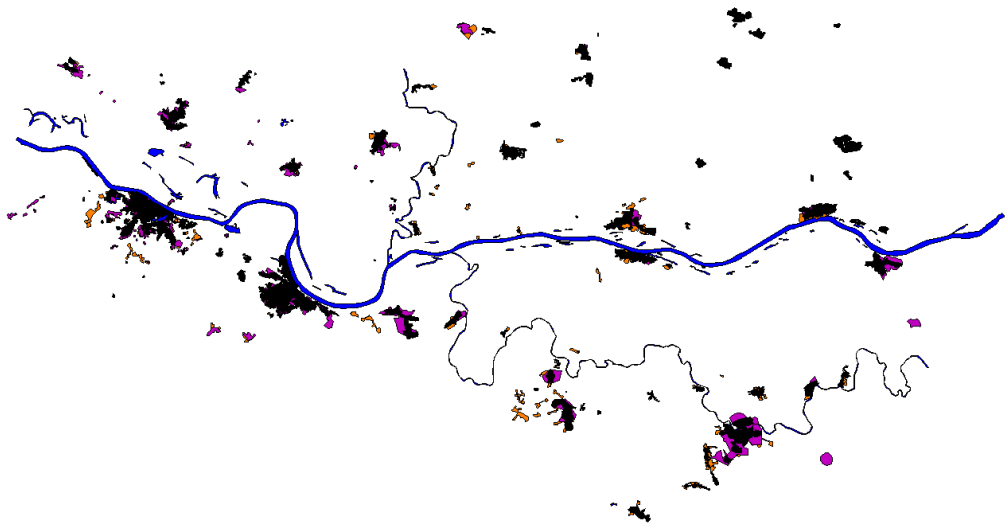
Figure 105 : transformations de la structure paysagère de la région de Sovetsk–Tilsit (1988-2000-2006).





Sur l'ensemble de la zone étudiée on observe une croissance de l'urbanisation et de la périurbanisation à l'instar de Sovetsk.

Figure 106 : exemple de croissance de l'urbanisation 1998 (noir) – 2000 (violet) – 2006 (orange) (Sovetsk–Tilsit).

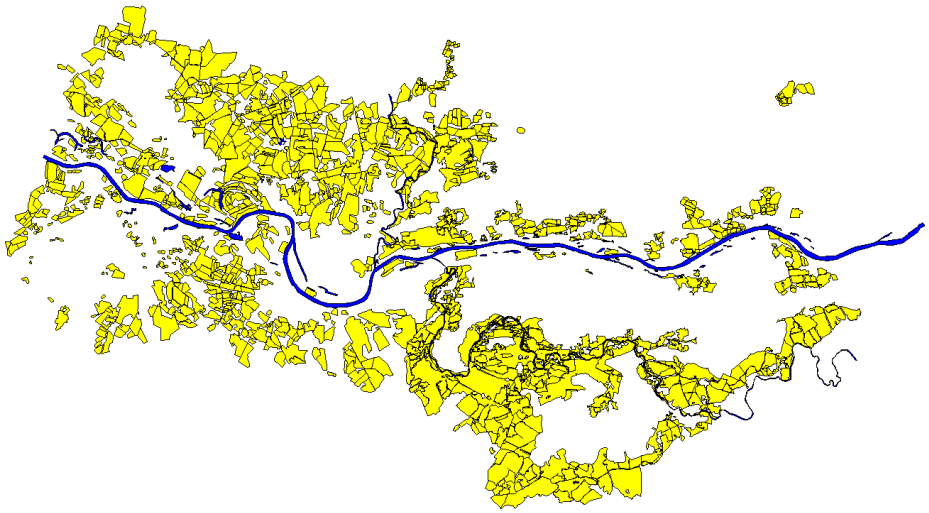


Légende : surface urbanisée 1988 (noir), surface urbanisée 2000 (violet), surface urbanisée 2006 (orange).

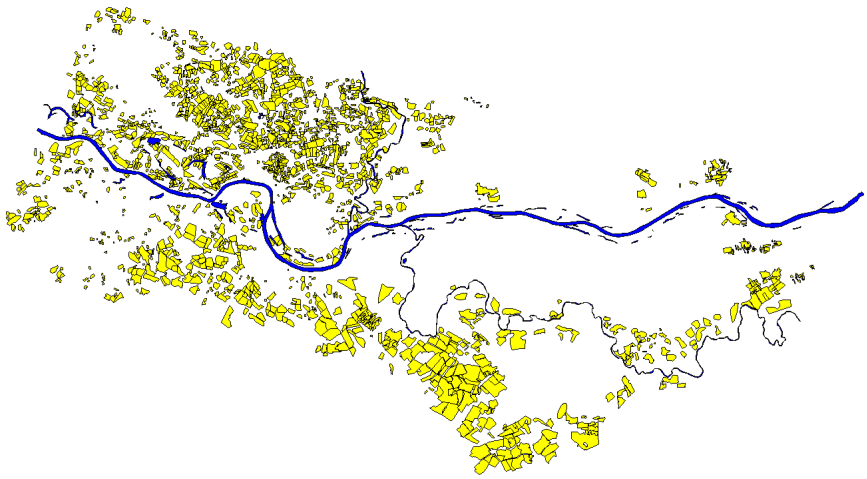
La fin de la période soviétique est caractérisée par un processus de différenciation spatiale, essentiellement de nature géométrique, touchant l'espace agricole. Processus de différenciation spatiale qui va se traduire par l'émergence de territoires agricoles fragmentés et de petite taille en Lituanie, notamment sur la frontière Est.

Figure 107 : fragmentation du parcellaire agricole en Lituanie (Sovetsk–Tilsit).

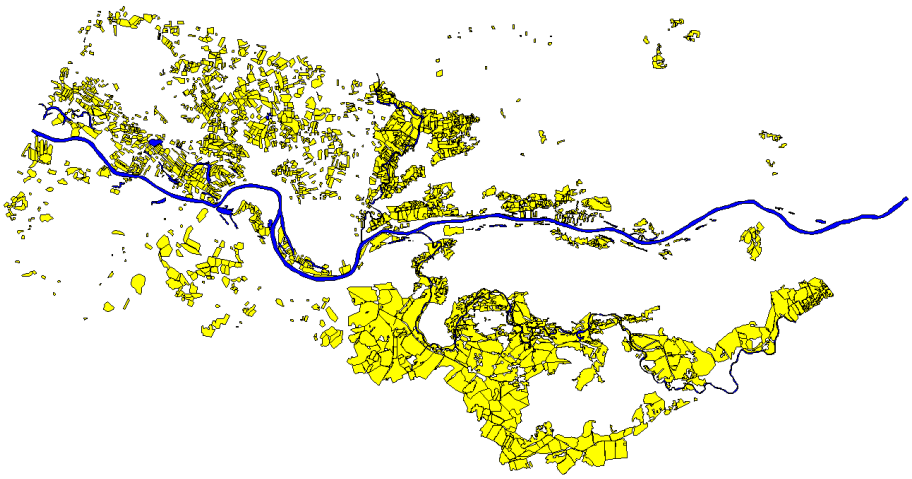
1988



2000



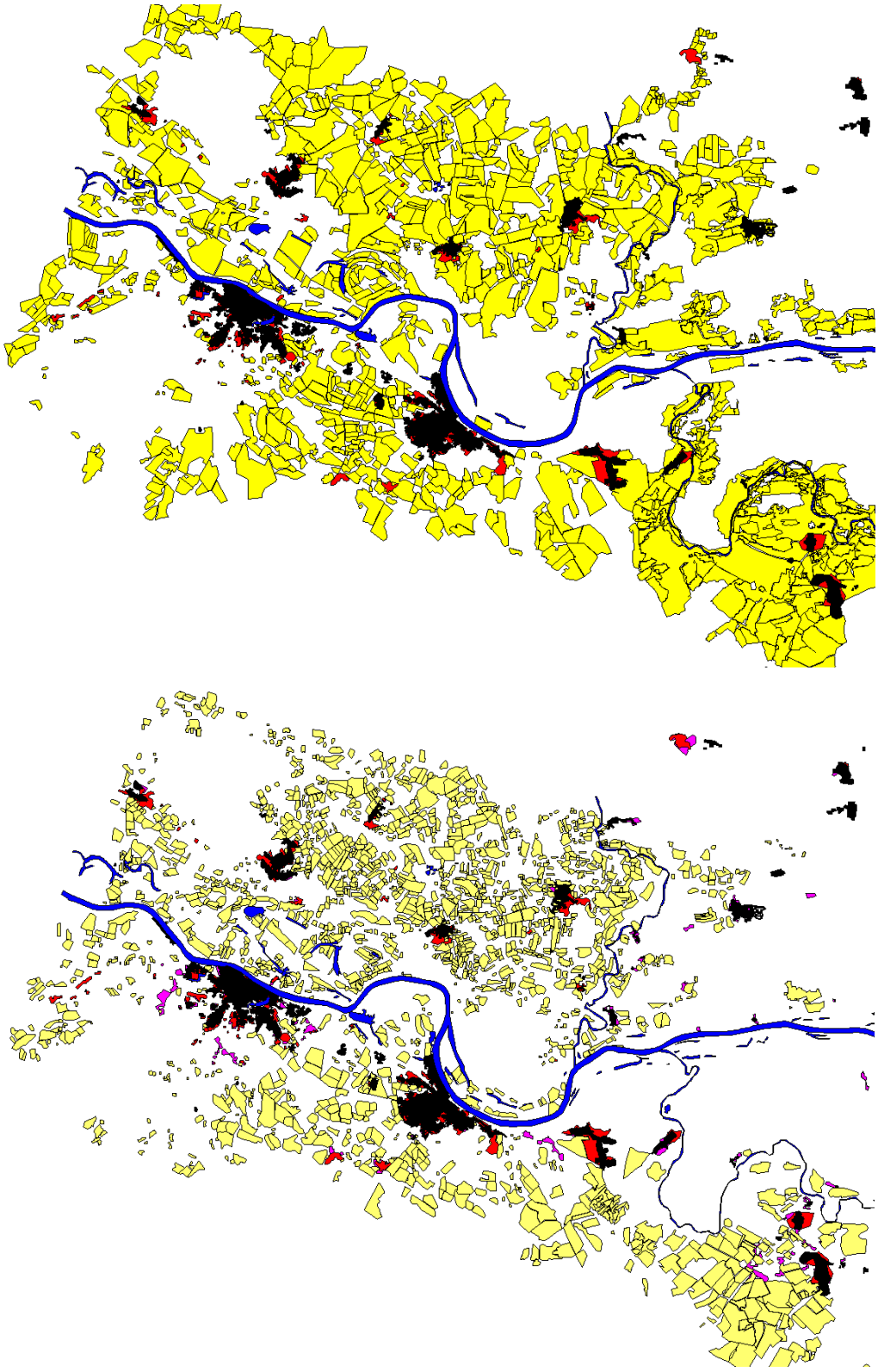
2006



En 1988, la taille moyenne des parcelles est proche, 0,28 km² en Lituanie et 0,32 km² à Kaliningrad. Neuf ans après l'indépendance, l'échec de la réforme agricole soviétique et le démembrement des kolkhozes ont fait que le parcellaire agricole a augmenté sensiblement en Lituanie alors que leur taille a fortement diminué (0,28 km² à 0,08 km²). Sur dix–huit ans (1988–2006), les surfaces cultivées ont diminué de 42%. La disparition des kolkhozes a été marquée par un morcellement du parcellaire agricole au profit des ouvriers y travaillant sur des critères arbitraires et subjectifs lorsqu'il n'était pas possible de restituer les terres collectivisées aux propriétaires ou aux descendants directs vivant en Lituanie.

Sur la zone frontière de Kaliningrad, la diminution de la taille du parcellaire agricole a été moindre qu'en Lituanie où a émergé un micro–parcellaire agricole. On assiste même, comme dans le sud de l'oblast, à un processus d'agrégation du parcellaire agricole, constituant de fait des surfaces cultivables équivalentes ou supérieures à celles de la période soviétique. Le parcellaire agricole à proximité de villes comme Sovetsk a tendance à disparaître avec la pression de l'urbanisation.

Figure 108 : croissance urbaine et fragmentation du parcellaire agricole (1988–2006).



Légende : Urbain 1988 : noir, Urbain 2000 : rouge, Urbain 2006 : violet, Parcelles agricoles : jaune (1988), jaune clair (2000), Fleuve (Niémen) : bleu.

L'extension urbaine de Sovetsk entre 1988 et 2000 s'est faite sur le parcellaire agricole connexe à la ville de la période soviétique, tout comme la croissance urbaine entre 2000 et 2006 sur le parcellaire agricole de l'année 2000.

Tableau 18 : évolution du parcellaire agricole.

Année	Surface totale des parcelles (en km²)		Nombre de parcelles		Surface moyenne des parcelles (en km²)	
	Lituanie	**Kaliningrad**	**Lituanie**	**Kaliningrad**	**Lituanie**	**Kaliningrad**
1988	223,91	257,28	797	815	0,28	0,32
2000	109,41	128,92	1398	715	0,08	0,18
2006	129,89	190,36	1654	690	0,08	0,28

Figure 109 : transformation du paysage agricole et de la structure spatiale lituanienne / permanence de la structure spatiale agricole russe (1988–2006).

1988

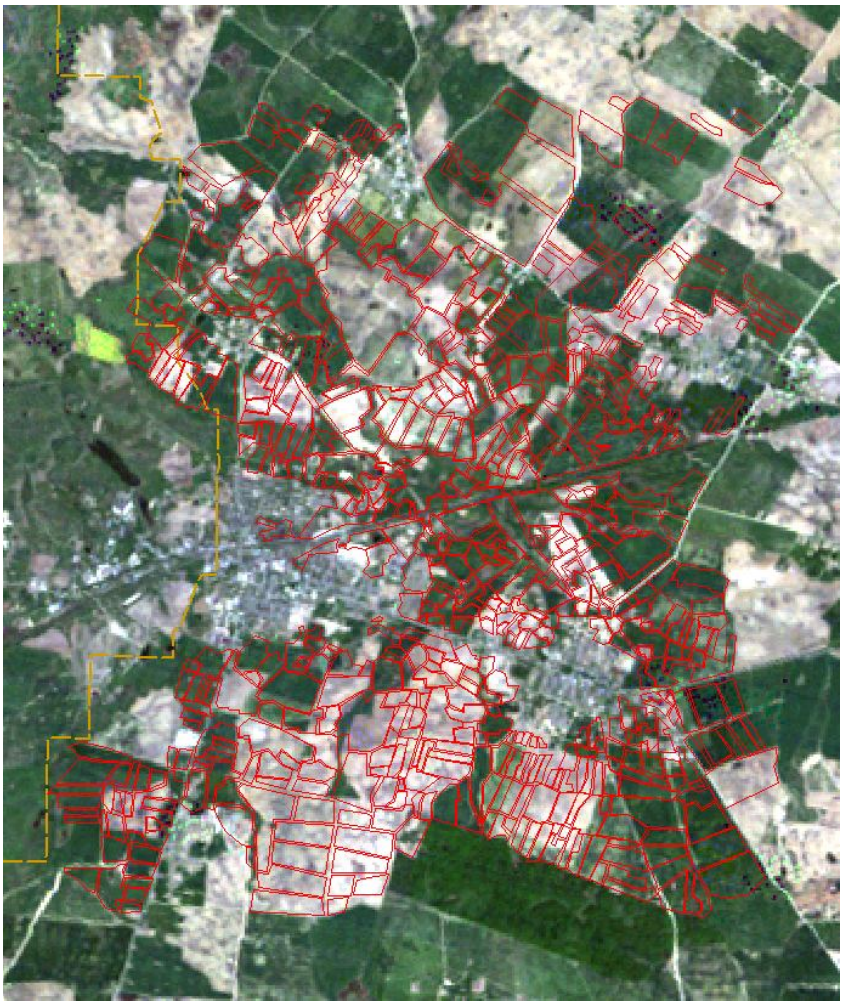
2006

La région de Kaliningrad, à l'instar de la Lituanie, a connu une diminution de la surface agricole (-26%) sans pour autant que la surface des parcelles diminue (-0,04 km²), le territoire n'ayant pas connu de phénomène massif de fragmentation

des terres agricoles en sus de l'absence de propriétaires prussiens, allemands ou prusso–lituaniens pouvant se manifester.

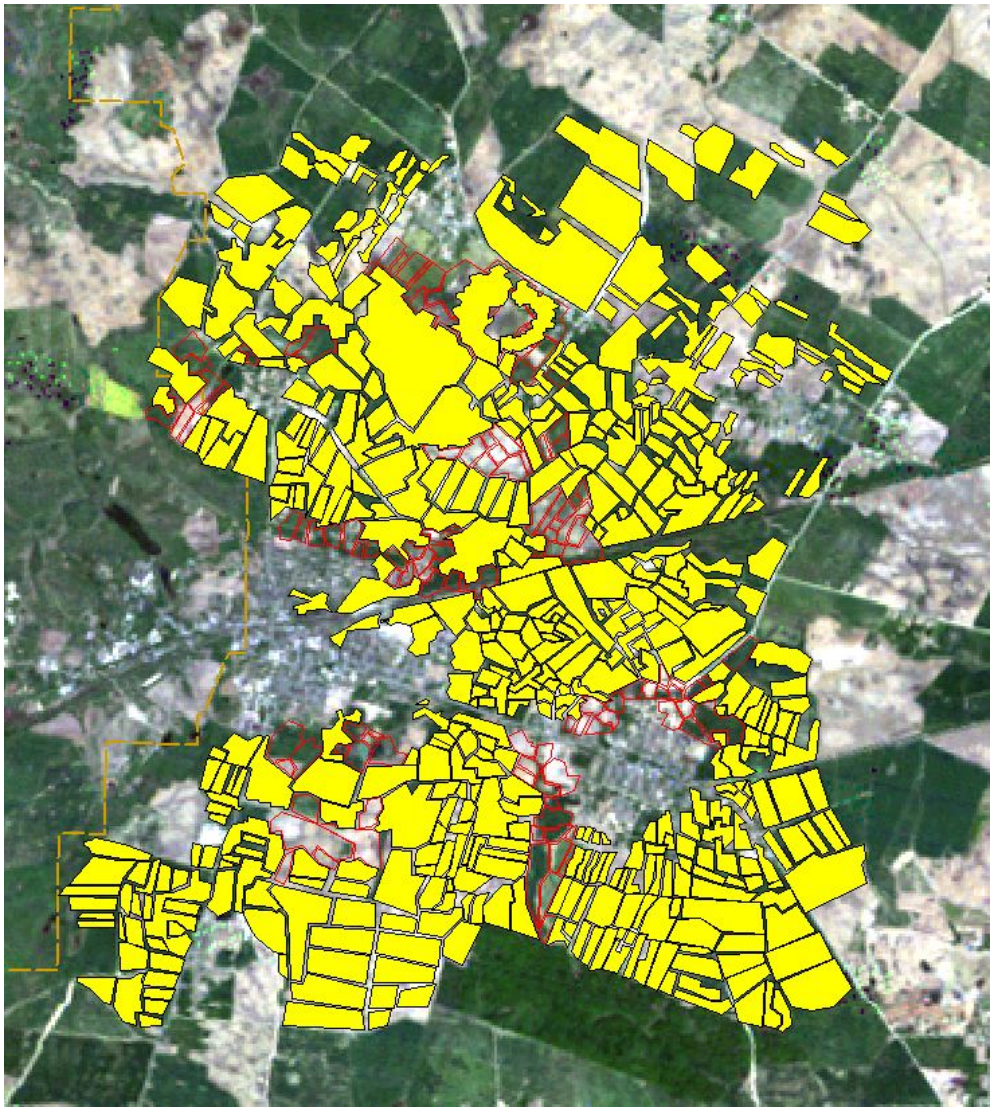
Le démembrement des kolkhozes a conduit à l'émergence de micro–parcellaires issue du partage des terres entre les ouvriers, ingénieurs, habitants, la restitution des terres non spoliées aux résidents lituaniens. Micro–parcellaire vivrier, sans valeur économique, qui a mené l'une des deux agricultures les plus performantes de l'URSS (avec l'Ukraine) à sa disparition.

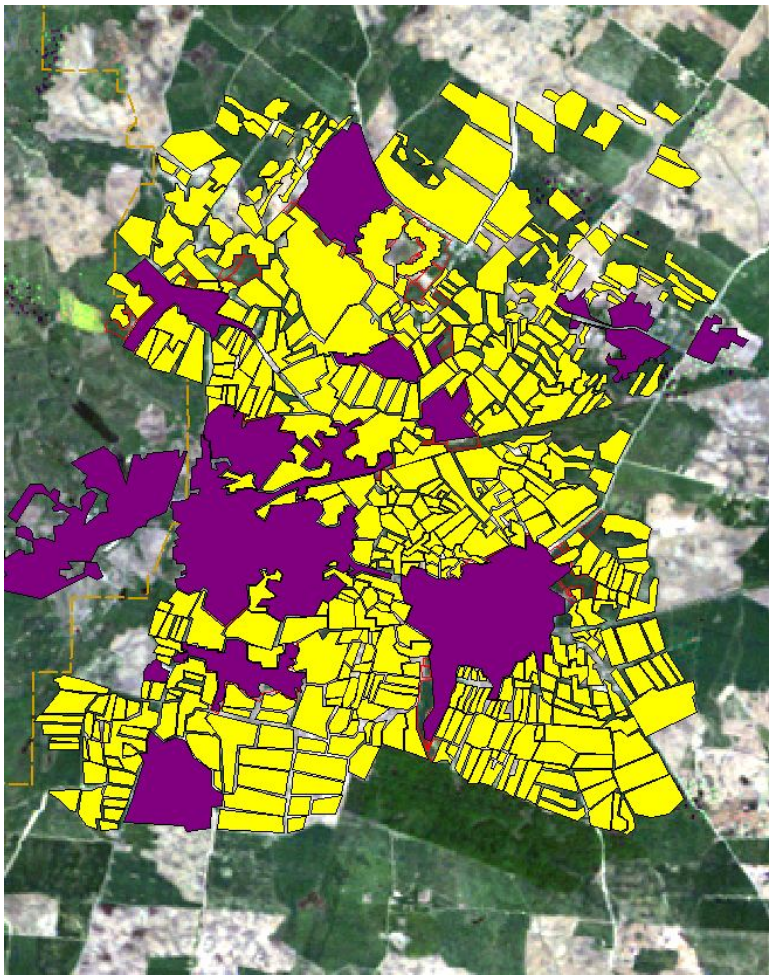
Figure 110 : structure parcellaire agricole de 2000 obtenue par reconnaissance morpho–métrique superposée sur une composition colorée Landsat-5 TM de 1988 représentant le parcellaire soviétique (exemple de la ville frontière de Kybartai).



Entre 2000 et 2006, une partie du parcellaire agricole est abandonnée au profit de l'urbanisation (violet) ou de la mise en friche.

Figure 111 : structures parcellaires agricoles de 2000 (rouge transparent) et de 2006 (jaune) obtenues par reconnaissance morpho–métrique superposées sur une composition colorée Landsat-5 TM de 1988 représentant le parcellaire soviétique.





La restitution des terres collectivisées aura pour conséquence le morcellement du parcellaire agricole soviétique. Elle intervient quelques mois après le référendum proclamant l'indépendance de la Lituanie dans le cadre de deux lois votées les 16 et 25 juillet 1991. La première sur les conditions de restitution des terres et des biens collectivisés, la seconde sur la réforme foncière.

Les biens fonciers terriens et urbains nationalisés entre 1940 et 1945 devaient, aux termes de la loi, être restitués aux anciens propriétaires ou à leurs aïeuls. Le processus de restitution qui a débuté en 1993 concernait en 1997 50% des terres agricoles et 19% des parcelles forestières (Lazdinis et al. 2009). La politique de collectivisation s'est opérée entre 1949 et 1951 ouvrant de fait la voie à un processus de captation des biens et des terres de nombreux anciens propriétaires lituaniens, qui, selon leur niveau hiérarchique dans l'ancien appareil soviétique, ont pu faire valoir ou non certaines compensations (échanges de terres, de biens, de parcelles forestières, etc.).

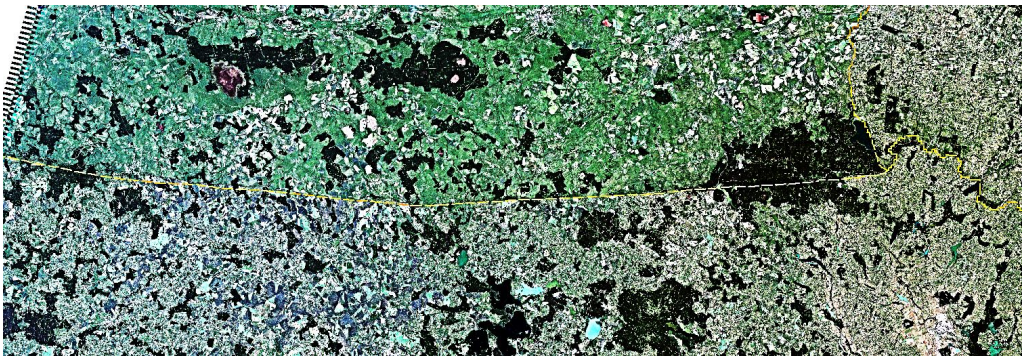
A titre d'exemple, une famille de Rumsiskes (village urbain) a été spoliée de plus de 25 % de ses terres sans que la moindre compensation ait été faite au moment de la restitution des terres collectivisées, le village urbain agricole ayant été construit dessus. Les spoliations liées à la seconde guerre mondiale, à l'expulsion des populations non lituaniennes entre 1946 et 1949, puis durant la période

post–indépendance sont telles qu'elles ont conduit à une politique restrictive sur la propriété et la nationalité : seules les personnes de nationalité lituanienne, vivant en Lituanie, peuvent être propriétaires. La double nationalité est interdite pour éviter tout retour et demande de restitution des biens et des terres aux populations lituaniennes, prussiennes, allemandes et polonaises ayant fui le pays entre 1942 et 1946 ou durant la période soviétique. Seuls les lituaniens de confession juive, vivant en Lituanie, viennent d'être indemnisés, en 2011, à la hauteur de 150 millions d'euros.

EVOLUTION DE L'ESPACE TRANSFRONTALIER POLONO–RUSSE

La frontière polono–russe résulte du remembrement des territoires prussiens orientaux entre la Pologne et l'URSS en 1945. Elle marque à partir de 1945 la séparation entre la Pologne communiste et l'URSS, puis en 1991, la frontière polonaise avec la région de Kaliningrad (Fédération de Russie) et depuis son intégration en 2004 dans l'espace économique et politique « européen » celle de l'Union européenne. La permanence de la frontière depuis 1945 permet de mesurer l'état des transformations spatiales sur la zone frontière depuis la fin des régimes communistes polonais et soviétiques.

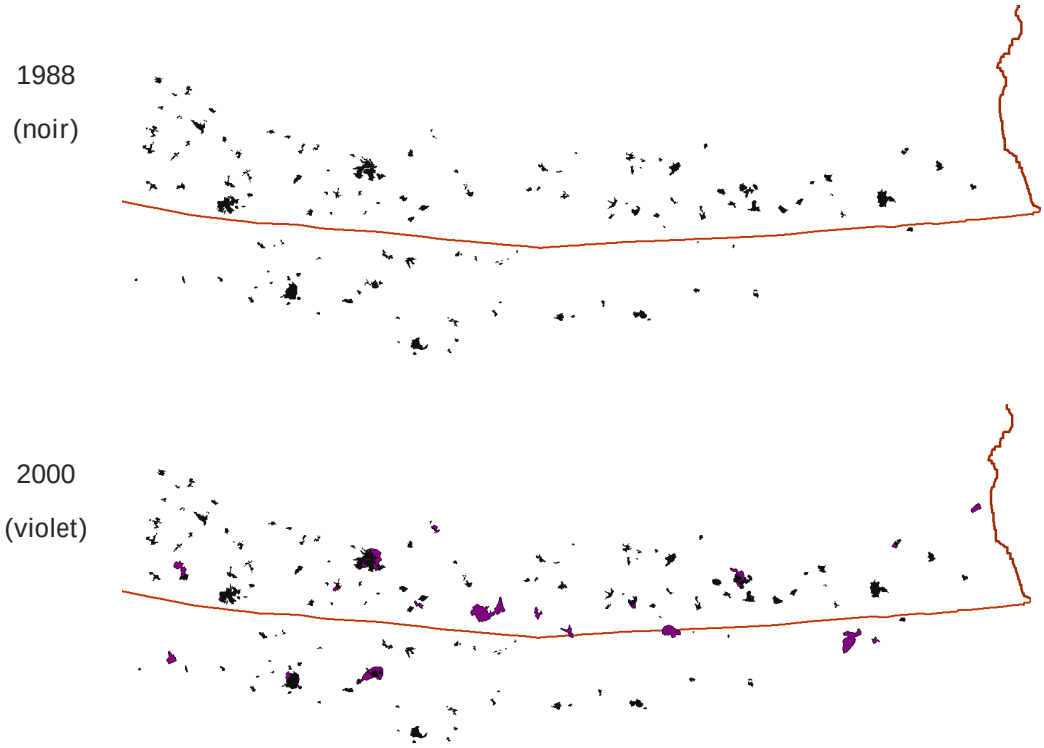
Figure 112 : transformation du paysage agricole et de la structure spatiale polonaise / permanence de la structure spatiale agricole russe (1988–2006).



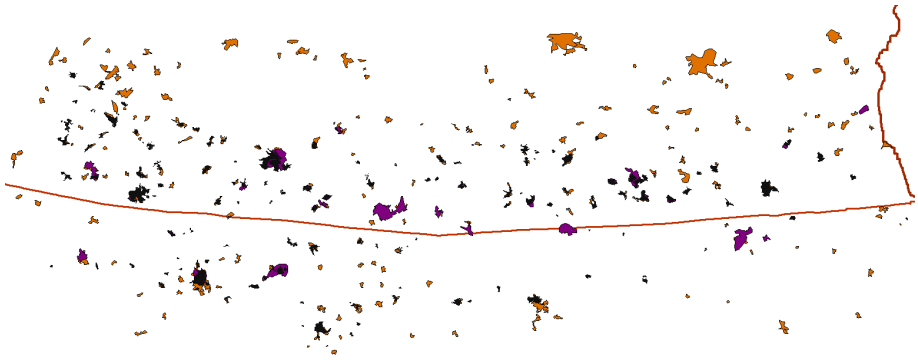
L'analyse tri–chronique par télédétection multi–spectrale moyenne résolution met en évidence une série de changements spatiaux, qui, s'ils ne remettent pas en cause la structure territoriale de la zone transfrontalière polono–russe, s'inscrivent dans un processus général qui touche aussi bien la Lituanie que la Pologne ou la région de Kaliningrad, à savoir la croissance urbaine, la densification des réseaux de mobilité et d'extension des espaces forestiers.

Croissance urbaine des années 1990 touchant trois villages russes et polonais, qui va connaître une importante accélération entre 2001 et 2006 de part et d'autre de la frontière à l'instar du centre urbain d'Oziorsk ou des villages de Karamyshevo et de Krosnolese (Kaliningrad) et de Miedumiszki Mate, Goldap, Niedrzwio, Dubeninki en Pologne.

Figure 113 : croissance urbaine 1988–2000–2006.



2006
(orange)



Le réseau routier peu développé durant la période communiste va fortement se densifier sur la zone frontière des deux pays après 1991 pour, à partir des années 2000, accompagner le développement urbain et l'intensification des échanges économiques entre les deux entités politiques.

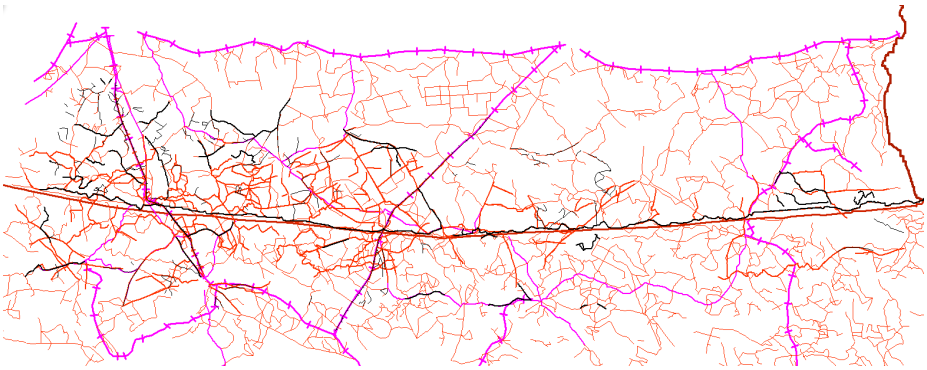
Figure 114 : densification du réseau routier 1988–2006 (reconnu uniquement par télédétection spatiale moyenne résolution Landsat).

Le taux de reconnaissance partiel des portions de routes est important en raison de la résolution spatiale 900 m² et d'une sensibilité spectrale insuffisante pour détecter sur leur totalité les routes qui, durant la période communiste, n'étaient pas goudronnées.

1988
(noir)

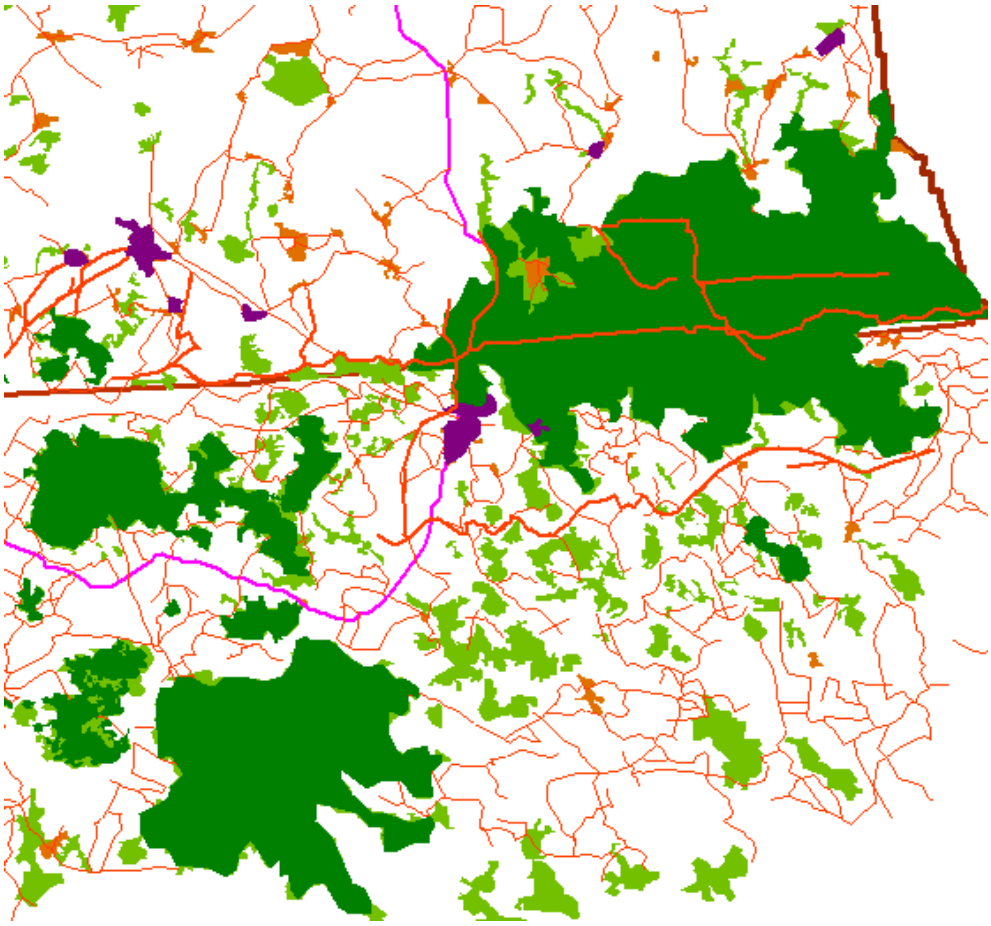
2000
(violet)

2006
(orange)



Croissance de l'urbanisation qui, dans les années 2000, va systémiquement aller de pair avec la croissance des espaces forestiers en raison de l'abandon des terres agricoles. Ce phénomène touche également et indistinctement les espaces frontaliers russes et polonais. La croissance urbaine, comme en Lituanie, va de pair avec la croissance forestière. Ce sont deux phénomènes géographiques parallèles qui résultent des transformations socio–économiques et territoriales en cours.

Figure 115 : croissance urbaine et croissance du couvert forestier (2000–2006).



Légende :

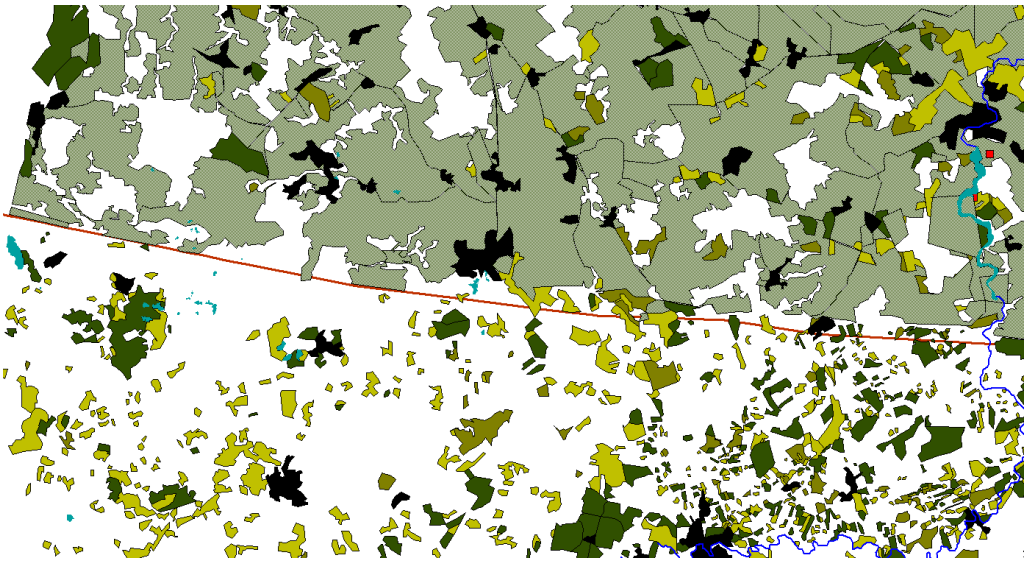
- Surface forestière en 2000
- Extension de la forêt en 2006
- Surface bâtie (villages) et routes en 2000
- Surface bâtie (villages) et routes apparues entre 2001 et 2006
- Frontières

Nous sommes devant, que ce soit pour l'urbain, pour les infrastructures routières, les forêts ou les espaces agricoles, un processus géographique et spatial similaire pour lequel la frontière, si elle limite les déplacements des biens et des personnes n'a qu'un impact limité sur les transformations territoriales en cours aux niveaux local et méso–régional. Elles sont identiques. Ce qui pourrait conduire à formuler l'hypothèse que les processus d'urbanisation en cours sur la région transfrontalière sont indépendants du système politique et culturel. Ils

sont liés à la hausse symétrique du niveau de vie des populations « russes » et polonaises qui se traduit spatialement par une aspiration à des modes de vie et à des formes de territorialité similaire.
Contrairement à la situation en Lituanie où l'on a assisté à un effondrement de la surface agricole, l'espace transfrontalier polonais est marqué par une croissance de son parcellaire agricole le long des rivières, le parcellaire agricole du côté russe ne variant pas.

Figure 116 : transformation des pratiques agricoles (1988–2006).

1988 : Durant la période communiste, la frontière entre les deux Etats marque également celle des pratiques agricoles et des modes d'utilisation des sols. La région de Kaliningrad se caractérise par une pratique de l'agriculture sur de vastes parcelles agricoles, caractéristiques des kolkhozes et quelques micro–parcellaires donnés aux ouvriers des conglomérats agricoles.
L'agriculture frontalière polonaise se caractérise par une agriculture de subsistance importante (micro–parcellaires) et quelques champs propres de grande taille à l'agriculture mécanisée.



2006 : quinze ans après la fin du communisme, la frontière séparant les deux Etats depuis 1945 est toujours aussi marquée, tant sur la structure des paysages que sur les modes d'utilisation agricole des sols. L'agriculture de subsistance caractérisée par le micro–parcellaire agricole tend à être moins prégnante sur la partie polonaise. Elle a augmenté considérablement en Russie en même temps que le parcellaire agricole des anciens kolkhozes en nombre et superficie.

Légende

- Champs de grande taille (céréales)
- Champs de taille moyenne (céréales)
- Agriculture intensive (maraîchers)
- Ensembles de micro–parcellaires (maraîchers vivriers) 2006
- Ensembles de micro–parcellaires (maraîchers vivriers) 1998
- Petits parcellaires vivriers
- Centres urbains (villages)
- Frontières

Parcellaire agricole qui marque et façonne les paysages, met en évidence les différents modes d'utilisation des sols. Les processus d'urbanisation sont identiques de part et d'autre de la frontière. Ce sont les modes d'utilisation de

l'espace agricole qui mettent en évidence les changements de structures socio–territoriales et économiques.

3.2.4. LA FORET : UN INDICATEUR ENVIRONNEMENTAL DE TRANSFORMATION DES TERRITOIRES

UN INDICATEUR DE CHANGEMENT SOCIETAL

L'évolution du couvert forestier est concomitante aux transformations sociétales, c'est-à-dire de l'usage et de l'utilisation de l'espace géographique. Elle est de façon systémique un indicateur géographique des transformations sociétales, économiques, politiques et environnementales. Les changements de régime politique, de système économique, social, ont un impact direct sur les mutations du couvert forestier. L'inertie temporelle (pas de temps des changements) du couvert forestier fait que généralement, seules les ruptures sociétales majeures ont un impact direct sur l'évolution des forêts. Les processus de métropolisation en cours et la fin du communisme en Lituanie ont et ont eu, d'une manière systémique, un impact direct, ces vingt dernières années sur la forêt.

Les forêts sont un indicateur spatial, géographique des changements de l'espace géographique : croissance, exploitation, déforestation, etc. montrent de façon plus ou moins directe les dynamiques sociales, spatiales et territoriales en cours. Les transformations du couvert forestier mettent en évidence les changements spatiaux et temporels de l'utilisation des sols, du système économique, des modes de vie des populations et de leur niveau de développement.

C'est également un indicateur des changements climatiques et des impacts de l'anthropisation sur la nature et l'environnement.

TRANSFORMATION POLITIQUE ET SOCIETALE MAJEURE : LA FIN DE L'UNION SOVIETIQUE

Avec la proclamation de l'indépendance de la Lituanie et le changement radical de système politique et économique, la portion d'espace géographique formant le territoire de la Lituanie post–soviétique va connaître d'importantes mutations. Transformations qui vont directement affecter l'évolution du couvert forestier du pays. La période soviétique a été caractérisée par une politique de gestion, d'implantation forestière qui avait trois fonctions :

- ✓ L'exploitation industrielle.
- ✓ La protection de l'environnement et la gestion du territoire (stabilisation des dunes sur la côte baltique).

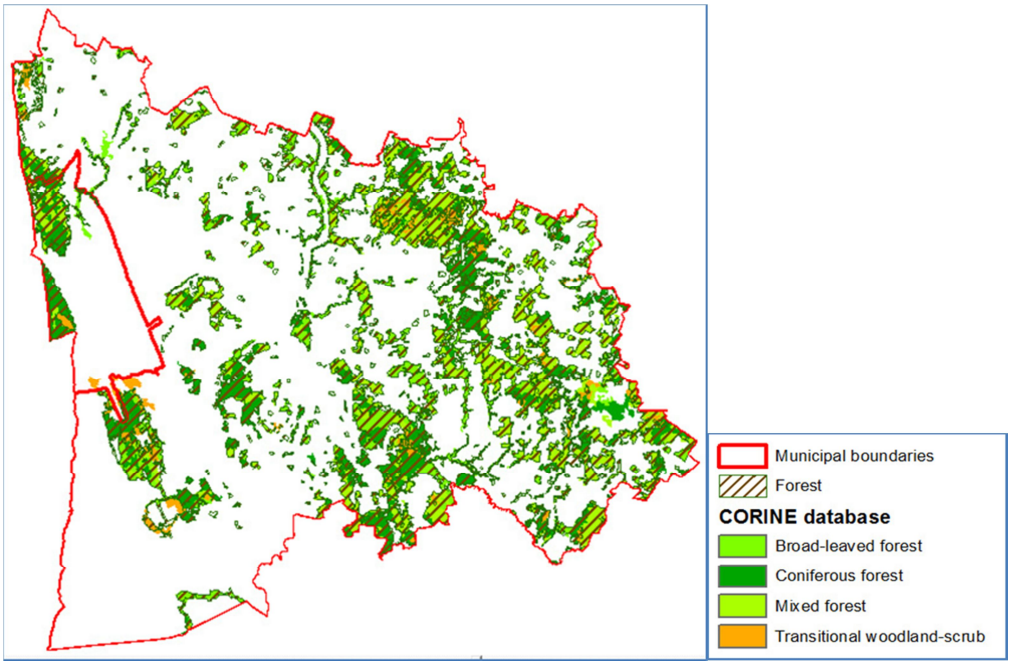
- ✓ Un système de défense avec l'implantation de forêts visant à interdire l'accès (canaliser) à la côte et aux principales agglomérations.

L'accession à l'indépendance du pays va être durant cinq ans, entre 1991 et 1997, des années de chaos économique, social et politique avec notamment l'embargo de la Fédération de Russie. L'économie lituanienne était dépendante dans sa quasi–totalité de la Fédération de Russie. Chaos qui va se traduire par des changements sociaux et territoriaux importants : fermeture des conglomérats, des activités de haute technologie, notamment dans les technologies de l'information, exploitation sauvage des ressources industrielles et environnementales, disparition des kolkhozes, mise en friche de l'agriculture, etc.

Entre 1997 et 2005, le nombre de fermes a baissé de 13%, entraînant une croissance de la forêt sur les parcelles agricoles non entretenues. Exode rural qui est lié à la fermeture des kolkhozes dans les années 1990 mais aussi à une transformation des modes de vie engendrant de nouvelles formes de territorialisations (changement de répartition spatiale des populations, croissance de l'habitat dispersé sur le parcellaire des fermes baltes pré–soviétiques).

Figure 117 : modélisation de la croissance forestière.

Zones de croissance forestière sur le parcellaire agricole (région de Klaïpeda)



Transformations géographiques, économiques et sociales qui vont se manifester spatialement par une croissance du couvert forestier avec l'abandon des terres agricoles, l'exode rural vers les centres urbains majeurs comme Vilnius, Kaunas, Klaïpeda et l'émigration vers la Scandinavie, les Etats-Unis et les pays anglo–saxons. Croissance du couvert forestier qui va aller de pair avec une intense exploitation des ressources forestières aux profits des entreprises danoises et

suédoises. Au retour à l'indépendance de la Lituanie, certaines personnes ont racheté, pour des sommes dérisoires, les parcelles forestières avant de procéder à une exploitation intensive jusqu'à la fin des années 1990. Si le couvert forestier s'est spatialement accru de par l'abandon des terres agricoles, il a été durant les années après l'indépendance surexploité.

Figure 118 : exploitation du parcellaire forestier.

Couvert forestier en 1986 (région de Šiauliai)

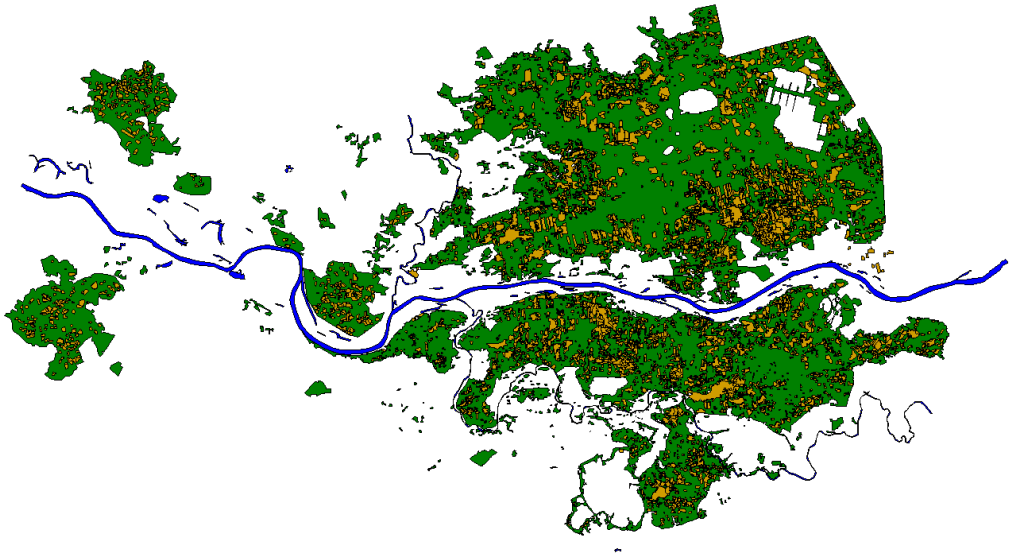
Couvert forestier en 2000 (région de Šiauliai)

Les résultats sont issus de travaux effectués sur l'évolution du couvert forestier entre 1974 et 2005 par télédétection spatiale (Landsat-1 MSS, Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, orthophographies centimétriques), SIG (modélisation spatiale, production de statistiques spatialisées, comparaison des résultats avec les bases de données comme Corine Land cover ou les bases de données de l'Institut forestier lituanien) (Gadal, Lekaviciute, 2009) (Lekaviciute, Gadal, 2011).

EXEMPLE DE L'ESPACE TRANSFRONTALIER LITUANO–RUSSE

L'analyse comparée de l'évolution du couvert forestier sur la zone frontière lituano–russe au nord–est entre 1988 et 2006 met également bien en avant ce phénomène qui touche également l'enclave de Kaliningrad.

Figure 119 : ensemble des coupes (marron) faites sur les parcelles forestières (vert) entre 1988 et 2006 (région de Binténai–Keleriskiai).

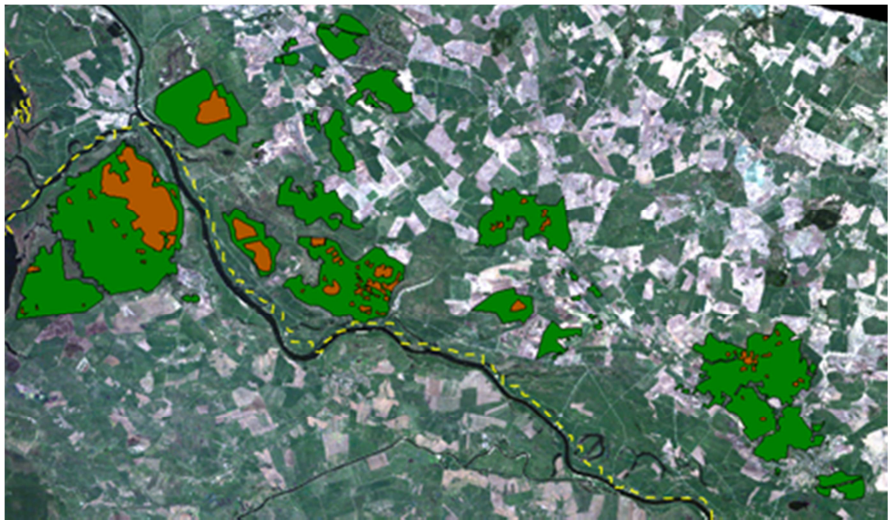


Le fleuve Niémen marque la frontière entre la République lituanienne et l'enclave de Kaliningrad.

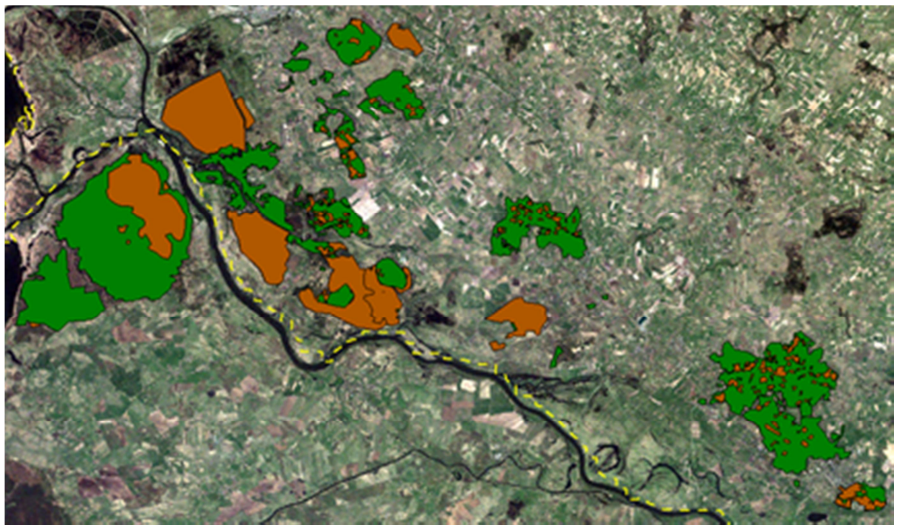
Que ce soit en Lituanie ou dans l'enclave de Kaliningrad, une croissance de la forêt est observée qui est pour l'essentiel liée à la déprise agricole. Croissance spatiale du couvert forestier qui est associée à une hausse des coupes : la surface totale des forêts de l'ensemble de la zone d'étude augmente sensiblement après 2000 par effet d'inertie : diminution de l'agriculture (1988–2000 augmentation de 17,1 Km² de la surface forestière, entre 2000 et 2006, on observe une augmentation de 25,7 Km²).

Figure 120 : exemple d'évolution du couvert forestier (vert) et de la surface des coupes (kaki).

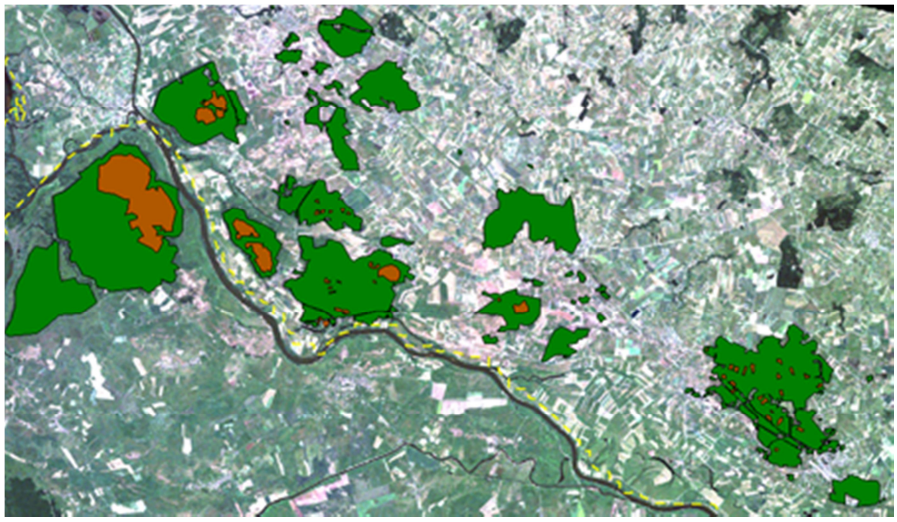
1988



2000



2006



La majeure partie des coupes a lieu entre 1991 et 2000. Elle résulte d'une intense exploitation des ressources forestières au profit du marché scandinave qui est liée à la privatisation d'une partie du parcellaire agricole par le biais de la politique de restitution des biens et des terres qui a débuté en 1993. Un certain nombre de nouveaux propriétaires forestiers, pour des raisons de subsistance, ont vendu le bois des coupes de leurs parcelles, d'autres, ont mis en place une véritable industrie d'exploitation des ressources forestières en rachetant pour des sommes modiques les parcelles forestières restituées aux propriétaires pour les exploiter rapidement.

Parallèlement, la surface totale des coupes augmente entre 1988 et 2000 (+6,87 Km²), puis diminue entre 2000 et 2006 (-14,01 Km²). Le nombre de coupes augmente mais leur taille moyenne diminue. Pas moins de 619 coupes sont identifiées en Lituanie en 1998, 591 sur la région de Kaliningrad, 1107 en 2000 en Lituanie.

Tableau 19 : évolution des surfaces forestières.

Année	Surface de la forêt (en Km²)		Surface totale des coupes (en Km²)	
	Lituanie	**Kaliningrad**	**Lituanie**	**Kaliningrad**
1988	319,6	204,2	51,43	27,14
2000	333,8	207,1	49,14	36,3
2006	345,2	221,4	40,47	30,96

Année	Nombre de coupes		Surface moyenne des coupes (en km²)	
	Lituanie	**Kaliningrad**	**Lituanie**	**Kaliningrad**
1988	619	591	0,083	0,046
2000	1107	508	0,044	0,071
2006	970	1062	0,042	0,029

Sur les deux territoires, le nombre de coupes a augmenté en même temps que la surface moyenne des parcelles exploitées diminuait. La surface des parcelles forestières exploitées a moins augmenté en Lituanie que sur la région de Kaliningrad (+351 km² contre +471 km²).

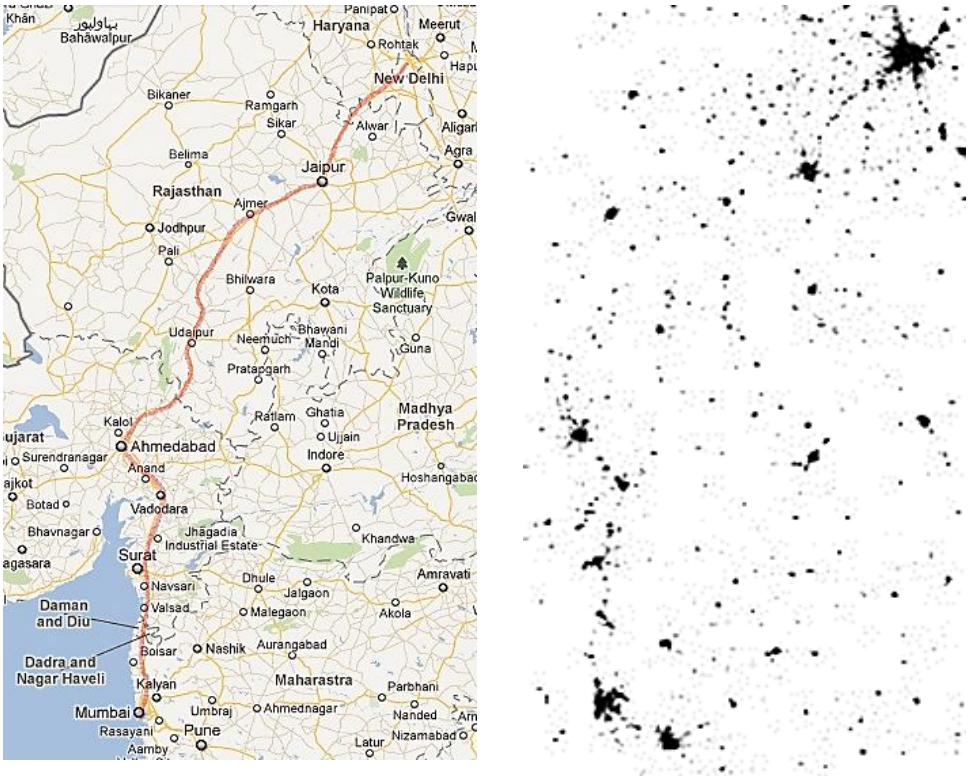
3.3. CORRIDOR DE METROPOLISATIONS : L'AXE DELHI–MUMBAI (INDE)

3.3.1. UN TERRITOIRE MULTI–POLARISE

EMERGENCE D'UN CORRIDOR DE DEVELOPPEMENT URBAIN

Depuis plus de vingt ans, dans le sillon de la libération de l'économie, de l'émergence d'une classe moyenne aujourd'hui estimée à 250–300 millions de personnes, se constitue un territoire en métropolisation : le corridor Delhi–Ahmedabad–Bombay (Mumbaï). Ce corridor de développement économique et urbain de 1500 km de long concentre environ 500 millions d'habitants. Il s'appuie sur un ensemble de villes millionnaires comme Delhi, Mumbai, Ahmedabad, Jaipur, Udaipur, Surat, etc. formant un ensemble territorial interconnecté, multi–polarisé et multi–centralisé, spatialement discontinu.

Figure 121 : corridor de transport (hinterland) Delhi–Ahmedabad–Bombay.



Source : (à gauche) GoogleMap, 21 août 2011. En rouge, le corridor de développement Mumbai–Ahmedabad–Delhi. (A droite) la structure urbaine du corridor en 2009.

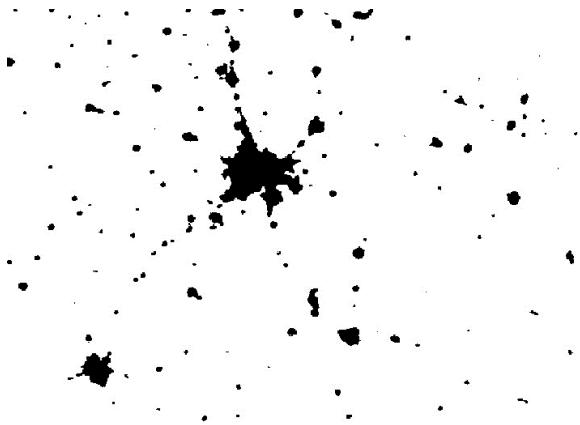
Ce corridor urbain et territorial en formation se compose aux deux extrémités Sud et Nord de deux régions urbaines multimillionnaires, économiquement

mondialisées, dépassant les vingt millions d'habitants, centrées autour de deux agglomérations : Mumbai et New Delhi. Mumbai, avec un système aéroportuaire mondialisé marque le début de l'hinterland menant à la fois aux centres économiques et urbains du Nord de l'Inde et de l'Ouest Sud–Ouest (Pune–Sholāpur–Hyderabad). La région de New Delhi marque l'extrémité nord du corridor.

La région de Mumbai, avec vingt–deux à vingt–trois millions d'habitants, joue le rôle de capitale économique de l'Inde. Elle accueille 70% des sièges des entreprises, son port est l'un des hubs majeur par où se concentrent les échanges entre les hinterlands et le Monde. L'agglomération génère environ 5% du produit intérieur brut du pays, 25 % de la production industrielle, 40 % du commerce maritime et 70 % des transactions de capitaux. C'est le lieu économique mondialisé et l'interface spatiale majeure de l'Inde au Monde.

Le second nœud du réseau territorial en construction est la capitale de l'Etat fédéral : Delhi (New Delhi). Depuis trente ans l'agglomération n'a cessé de croître pour donner naissance à une région urbaine, en phase de métropolisation, qui s'appuie sur un ensemble de villes qui forment un arc radioconcentrique autour de la capitale. Urbanisation alimentée durant plusieurs décennie de l'après indépendance par les populations indiennes déplacées du Panjab pakistanais et de son statut de capitale. La région urbaine de Delhi connaît depuis les années 2000 un important développement, aussi bien urbain qu'industriel, qui est alimenté à la fois par la venue d'entreprises étrangères que par le dynamisme économique et scientifique des Etats voisins de l'Haryana et de l'Uttar Pradeh, véritables moteurs du développement économique, spatial et territorial de la région métropolitaine en émergence. Etats, qui sur la frontière administrative de New Delhi, supportent l'implantation de clusters scientifiques et universitaires, publics, privés et internationaux (CEA, Ecole Polytechnique) à vocation nationale et internationale.

Figure 122 : structure spatiale de la région urbaine de Delhi en 2009.



Le troisième nœud de l'hinterland de développement urbain et économique marquant la jonction entre un espace côtier en phase de littoralisation porté par le dynamisme économique de Mumbai et l'hinterland menant au nord du pays (Delhi), le dipôle Ahmedabad–Gāndhīnagar est devenu, outre ses activités économiques dans la pharmacie, les technologies de l'information et la chimie, un important centre scientifique et universitaire avec des établissements comme *l'Indian Space Research Organisation* (ISRO).

Ces villes, à l'instar des agglomérations du corridor ex–soviétique Klaïpeda–Moscou / Klaïpeda–Minsk–Kiev, forment des centres urbains relais. Ce sont des carrefours, des hubs, interfaçant les territoires locaux et région@@@@@@@@@ aux avec le réseau de transport qui les traverse, démultipliant, ramifiant l'espace en des séries d'hinterlands régionaux et locaux. L'interfaçage territorial permet de lier ces territoires aux territoires mondialisés et métropolisés comme Delhi ou Mumbaï, induisant un réseau nodal, multi–niveaux, hiérarchisé et interconnecté et générant une hiérarchisation de la structure urbaine et territoriale en développement.

MODELISATION 2D/3D DYNAMIQUE PAR SGIMT

La mise en évidence des structures d'organisation territoriale et de leur transformation depuis les années 1990 sur la totalité du corridor de développement et les années 1970 sur certaines agglomérations comme Jaipur ou Udaipur, s'est fait partir du SGIMT. Elle s'appuie sur l'ensemble des séries d'images satellites VNIR et MIR provenant de Landsat-1 à 7 (MSS, TM, ETM+), Spot-1 à 5 (panchromatiques et multi–spectrales), les images Kompsat-2 (panchromatiques et multi–spectrales) et DMSP F-10 à F-16 (OLS) sur les modèles numériques de terrain SRTM 2 fournis par la NASA et la NGA, les cartes topographiques scannées et les enquêtes de terrain (2007, 2008, 2009, et 2010).

Le fait de disposer des images satellites grand–champ couvrant la totalité du sous–continent indien, des données moyenne résolution couvrant la totalité des 1500 km de long sur 400 km de large de l'axe Mumbai–Ahmedabad–Delhi et haute résolution spatiale a permis de développer une analyse temporelle multi–niveaux et multi–échelles sur une période de vingt à quarante ans selon les lieux.

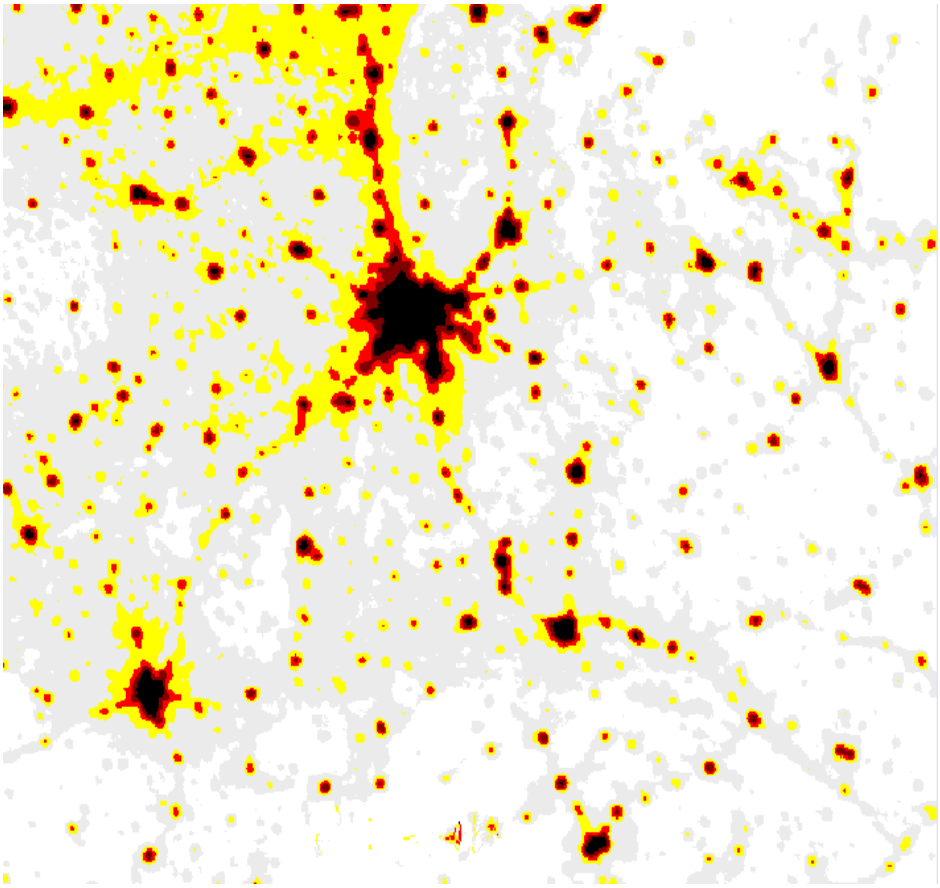
Les résolutions spatiales des images Landsat, Spot et des MNT de type SRTM 2 permettent de bien modéliser les dynamiques urbaines aux échelles régionales. Les images DMSP, elles, donnent une représentation globale des mutations de l'espace géographique sur la totalité des 1500 kilomètres du corridor de développement Delhi–Mumbai et des centres urbains de plus d'un million d'habitants. En revanche, seules les images métriques à haute résolution spatiale (comme Kompsat-2 ou Ikonos 1A) permettent d'analyser les processus d'urbanisation et de changement d'occupation des sols au niveau du bâtiment et de la parcelle. Ces images satellites peuvent être utilisées, par exemple, pour

analyser des fonctions socio–économiques des bâtiments ou pour identifier des zones de conflits d'usage du sol générés par l'urbanisation (Gadal, 2009).

L'intégration de la dimension multi–scalaire, multi–niveaux, permet de visualiser, modéliser et analyser dans le même temps les processus d'urbanisation du niveau local au niveau global et d'appréhender les différentes temporalités. Chaque niveau géographique a ses propres temporalités. La dynamique d'évolution des objets urbains, que ce soit le bâti à l'échelle locale, l'urbain à l'échelle méso–urbaine ou régionale ou les territoires urbanisés (agglomérations, villes, villages) à l'échelle indienne, est modélisée.

La modélisation et l'analyse des transformations spatiales s'appuient sur les modèles de simulation empirique créés à partir du traitement des images satellites, de leur fusion et normalisation en SGIMT et couplés aux modèles de géo–visualisation dynamique 2D/3D. Ils permettent de prendre en compte à différentes échelles géographiques et temporelles les dynamiques spatiales transformant l'espace géographique en des corridors urbains intégrés et discontinus de développement. Les SGIMT créés permettent de modéliser et d'analyser les processus d'urbanisation et de métropolisation dans l'espace et dans le temps, sous une forme 2D ou 3D dynamique. La géo–visualisation des simulations empiriques en 3D dynamique de la croissance urbaine permet de représenter l'intensité, la portée spatiale et les impacts des phénomènes d'urbanisation sur le territoire. Ils permettent de mesurer, caractériser et modéliser les transformations de l'espace géographique en prenant en compte à la fois la globalité et les particularités locales du processus d'urbanisation à différentes échelles géographiques et temporelles, d'identifier certaines conséquences sociales voire les impacts environnementaux ou encore d'anticiper de possibles évolutions territoriales.

Figure 123 : modélisation et simulation empirique de la croissance urbaine de la région de Delhi.



Le modèle de simulation spatiale produit à partir des séries d'images DMSP OLS entre 1992 et 2009 (l'US Air Force via la NASA fournit les images DMSP dégradées trois ans après leur acquisition) montre les possibles futures zones d'extension de l'urbanisation de la région de Delhi (en gris clair, figure ci-dessous). Mais également les phases « marquantes » (seuils de croissance spatiaux et temporels) de l'extension urbaine de la région de Delhi (en noir : situation en 1992, en rouge situation en 2009, en jaune les zones d'extension de l'urbanisation en cours).

L'intégration de la dimension dynamique dans la modélisation des processus d'urbanisation et de métropolisation vise à présenter le caractère « non statistique » des transformations territoriales en cours. L'intégration des différents temps de l'urbain sous une forme dynamique donne une représentation continue des transformations territoriales actuelles et passées. La géo–visualisation dynamique de l'urbanisation, en 2D comme en 3D, permet de mieux appréhender visuellement la réalité des processus géographiques urbains qui sont, par essence, complexes de par le nombre d'objets géographiques en mouvement et en interaction.

Les SGIMT 3D dynamiques résultent de la combinaison, puis de la fusion de trois éléments dans le SIG : le temps, la dynamique et la représentation 3D, auxquels il faut y ajouter la dimension géographique multi–scalaire (échelles de figurations cartographiques et images).

Avec la modélisation par simulation empirique de l'espace géographique urbain, le temps se confond avec la notion de mouvement, de transformation. La mise en mouvement temporelle et visuelle de la territorialisation, le temps s'amalgame avec la notion de dynamique. La dynamique n'est pas le temps, mais elle se définit comme la succession de cartes et d'images de l'urbanisation élaborées à différents pas de temps.

La géo–visualisation 3D dynamique générée en SIG offre la capacité de modéliser et penser la croissance urbaine dans son contexte physique, environnemental, territorial et son continuum géographique. L'association entre modèle numérique de terrain, modélisation spatiale et représentation 3D dynamique précise la description et l'analyse des processus de transformation territoriale et urbaine et permet une meilleure compréhension géographique des phénomènes.

La quantité de données à intégrer, traiter, harmoniser et modéliser, le temps et la puissance de calcul nécessaire restant importants, ces systèmes sont encore peu répandus. Cependant, en rendant accessible et intelligible la représentation de phénomènes géographiques complexes (Malinverni et al., 2002), la géo–visualisation rend des services inégalables et son potentiel de développement est considérable. La gestion et le traitement de larges bases de données géographiques, les coûts et les temps de production sont actuellement les facteurs limitant l'application de la géo–visualisation 3D en urbanisme.

Le modèle de simulation et de visualisation 2D/3D dynamique de l'axe Delhi–Mumbai en Inde illustre comment il est aujourd'hui possible d'intégrer les dimensions temporelles, spatiales, dynamiques et géographiques d'un processus de transformation territoriale. Les méthodes de suivi temporel de l'urbanisation sont fondamentales pour l'anticipation des besoins, la gestion et la planification territoriale aux niveaux national, régional ou de l'agglomération. Elles permettent, par exemple, de mettre en évidence les zones de conflits qui peuvent découler de l'urbanisation des terres agricoles ou assurer le suivi de l'environnement et des populations.

Les limites de la modélisation 2D/3D et de sa visualisation dynamique ne sont ni conceptuelles, ni méthodologiques. Elles consistent en :

- ✓ La taille des bases de données géographiques et les problèmes de gestion qu'elles entraînent.
- ✓ La qualité des données et des bases de données qui détermine la précision des représentations.
- ✓ Le potentiel de production de connaissances géographiques.

Structures urbaines et métropolisées

En vingt ans, sur un espace d'environ 1500 km de long, s'est constituée une conurbation concentrant environ 550 millions de personnes. Conurbation qui a une structure spatiale, territoriale et urbaine discontinue, multi–centralisée autour de villes millionnaires comme Udaipur, Jaipur, Surat, etc. Les dix dernières années ont été marquées par un processus d'intégration territoriale par la mise en réseau des différents lieux–urbains gravitant le long de l'axe de communication Delhi–Ahmedabad–Mumbai.

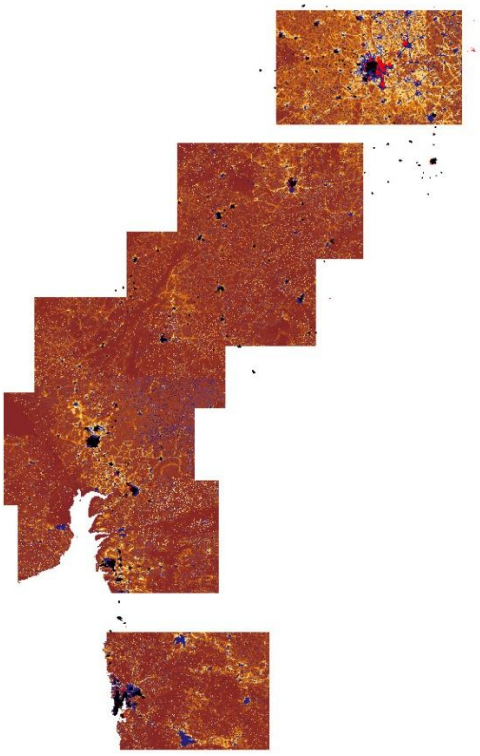
L'ensemble du territoire métropolisé en développement connaît une croissance urbaine annuelle d'environ 2% à 5% par an. Ce territoire en formation se caractérise par la diversité de ses structures spatiales et territoriales. Certaines parties de ce territoire sont métropolisées à l'instar de Mumbai, Delhi ou Jaipur, d'autres sont dans des processus d'intégration territoriale, en métropolisation. Toutes connaissent une importante croissance de l'urbanisation qui est soutenue à la fois par la démographie, la métropolisation et le développement économique.

Figure 124 : évolution du corridor de développement Delhi–Ahmedabad–Mumbai (1990–2007).

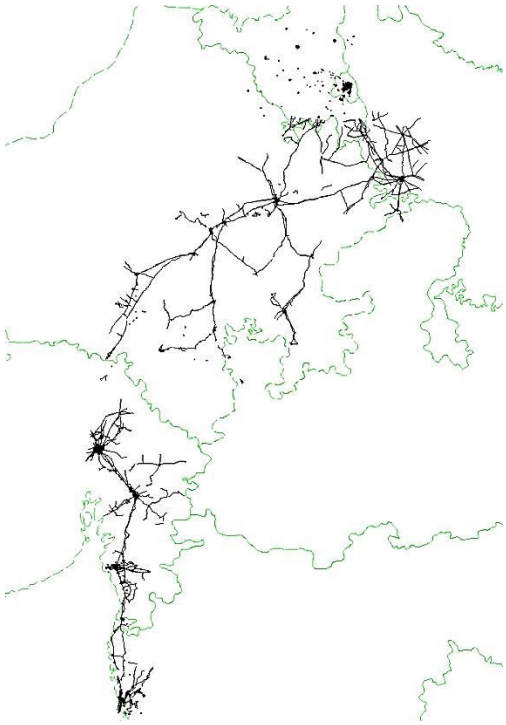
1990 (images Landsat-5 TM)

1990–2001 (images Landsat-5 TM / Landsat-7 ETM+)

1990–2007(images Landsat-5 TM / Landsat-7 ETM+) / DMSP OLS F-15

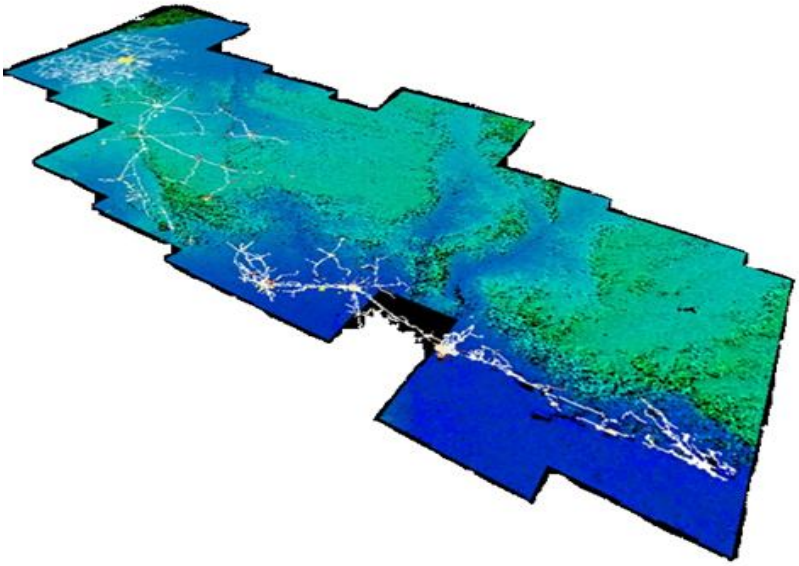


Infrastructure routière détectée à partir des images Landsat.



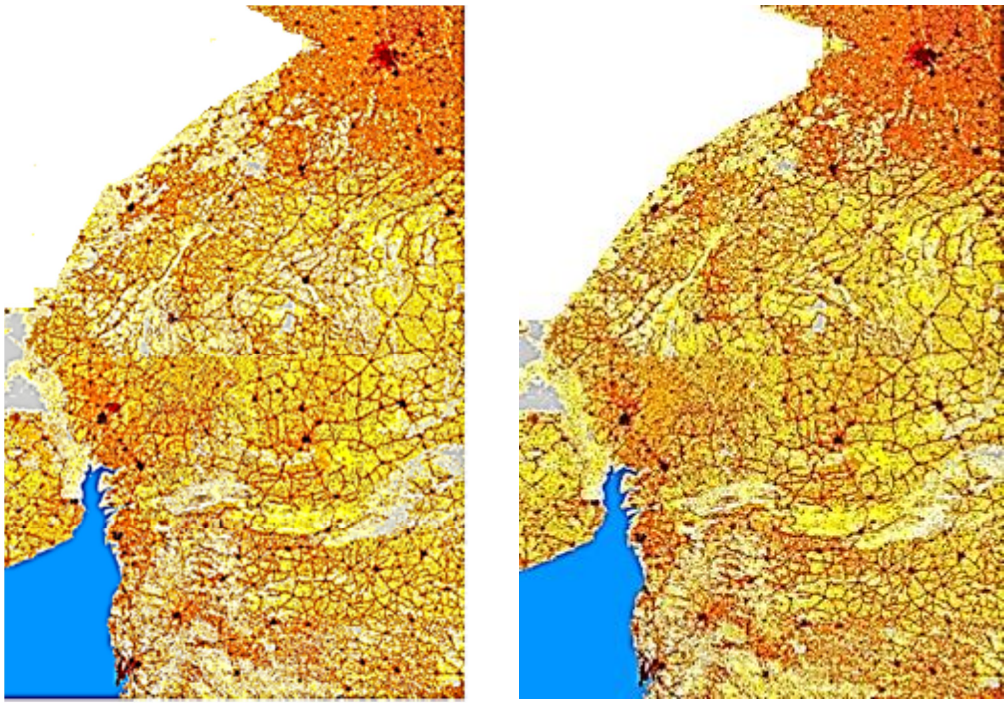
Légende : noir (urbanisation en 1990), rouge (urbanisation 1990–2000), bleu (urbanisation 2000–2007), vert (frontières des Etats indiens). Le niveau de reconnaissance des axes routiers est relativement médiocre, en sus de données manquantes ente Ahmedabad et Udaipur. La sensibilité spectrale des images DMSP OLS, malgré une résolution kilométrique, permet une reconnaissance et une extraction du réseau routier.

Figure 125 : géo–visualisation 2D/3D du corridor Delhi–Ahmedabad–Mumbai (2000), vue Est–Nord–Est.



La structure territoriale n'a pas ou peu évolué entre 1990 et 2001 à l'échelle subcontinentale. Elle est caractérisée par un processus d'extension urbaine continu aux villes qui est essentiellement alimenté par la croissance démographique.

Figure 126 : simulation empirique de l'évolution de la structure territoriale (2002–2007).



Les transformations territoriales à l'échelle subcontinentale sont essentiellement marquées par la croissance urbaine aux niveaux local et méso–urbain, mais également par la surface et l'intensité du phénomène par l'émergence de deux régions métropolitaines en sus de Mumbai : Delhi et Ahmedabad. La décennie 2000 est marquée par une accélération de la croissance urbaine sur l'ensemble du corridor de développement. Croissance urbaine qui va de pair avec une transformation de la structure territoriale des régions de certaines agglomérations comme Delhi ou Ahmedabad.

La structure territoriale du corridor Delhi–Ahmedabad–Mumbai se caractérise spatialement par la juxtaposition de diverses formes d'organisation et de structuration des territoires urbains :

- ✓ Des réseaux interconnectés de petites villes.
- ✓ Des territoires métropolisés de plusieurs millions de personnes.
- ✓ Des territoires urbains polarisés millionnaires, etc.
- ✓ Un hinterland partant d'Ahmedabad à Delhi qui tend à s'étendre en direction de Chandigarh et des contreforts de l'Himalaya.
- ✓ Un espace littoral multi–polarisé autour de villes en phase d'urbanisation (littoralisation) et des formes radiales et interconnectées de villes.

Ces formes de structuration de l'espace géographique renvoient à des morphotypes spatiaux qui sont l'expression d'un certain niveau de développement territorial.

MODELE RADIAL EN ETOILE OU POLYGONE MULTI–POLES

Le modèle d'organisation de l'espace de la région de Delhi (réseau en étoile ou polygonal rayonnant autour d'une ville centre se réplique sur plusieurs portions du méta–pôle « Delhi–Ahmedabad–Mumbai » : Ahmedabad, Udaipur, Surat. Ce modèle s'apparente ici à des régions urbaines en développement qui sont en bonne partie métropolisées et qui connaissent une phase rapide de croissance socioéconomique et démographique. Elle se traduit par une extension urbaine donnant naissance à des régions urbaines en phase de métropolisation, de plusieurs dizaines de kilomètres.

Figure 127 : extension du bâti en 2002 (extrait du bâti d'une scène multi–spectrale Spot-4 drapé sur un SRTM 2 – vue en direction du Nord).

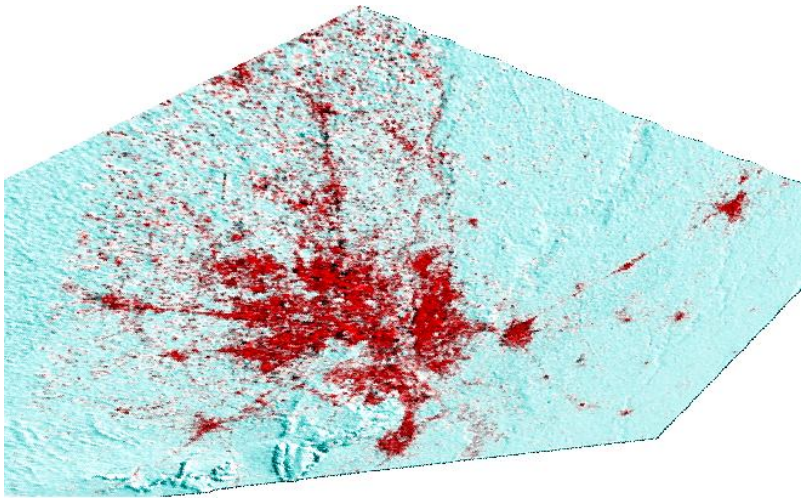
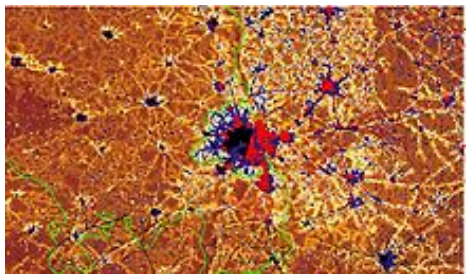
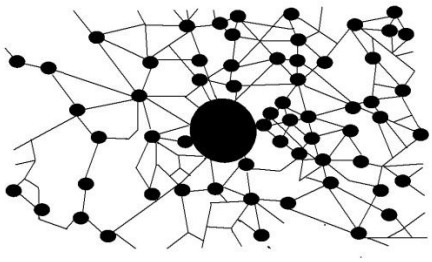


Figure 128 : évolution de l'urbanisation 1990–2007 (diachronie faite à partir de scènes Landsat-5 TM de 1990, Landsat-7 ETM + de 2001 et DMSP OLS F-15 de 2007.

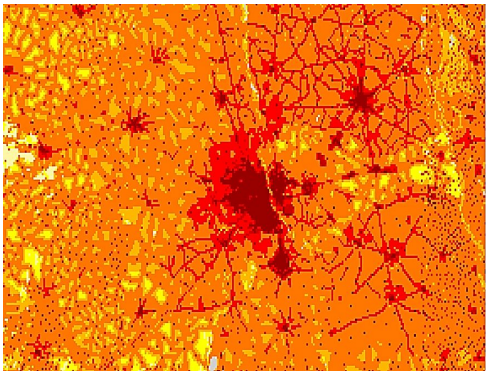




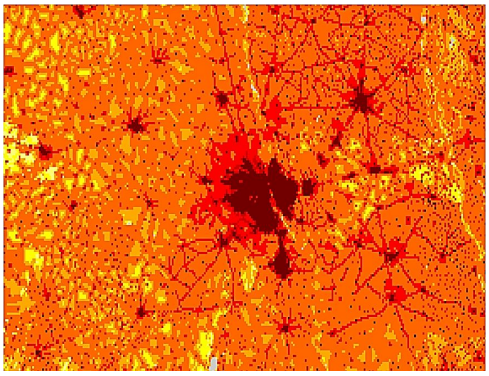
Légende : urbanisation : (noir : 1990), (rouge : 2001), (bleu : 2007). Frontière : (vert).

Figure 129 : évolution de la région de Delhi (simulation).

Simulation (temps initial : 2002)



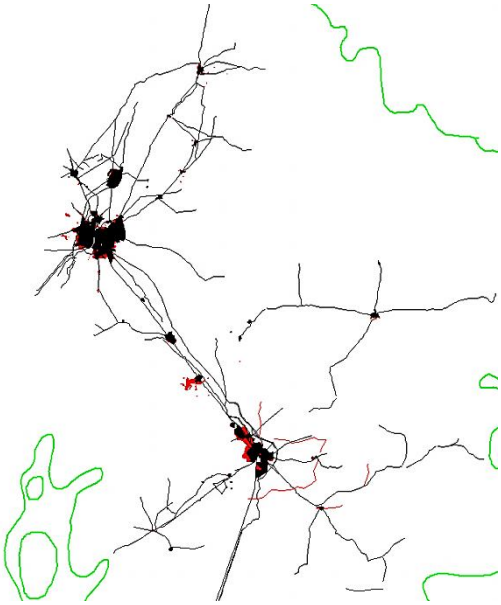
Résultat de la simulation empirique (2007)



Les centres urbains rayonnant autour d'Ahmedabad forment une structure spatiale polygonale, l'urbanisation suivant l'axe de communication Nord–Sud partant de Chandisar à Karjan et Est–Ouest (Himatnagar–Ahmedabad). Ce territoire urbain, métropolisé, est également marqué par une croissance urbaine importante depuis le début des années 2000. Il se structure tel un tri–pôle entre Gāndhīnagar, la capitale de l'Etat du Gujarat, Ahmedabad, centre industriel (chimie, pharmacie, technologies de l'information), scientifique et universitaire et Vadodara au Sud, ville universitaire et industrielle (pharmacie, pétrochimie, technologies) avec l'implantation de nombreux sièges internationaux. Ils forment un tri–pôle territorial mondialisé et métropolisé qui fait office de carrefour entre l'espace littoral situé entre l'axe côtier « Mumbai–Surat–Vadodara » et l'hinterland « Gāndhīnagar–Ajmer–Udaipur–Jaipur–Delhi ».

Figure 130 : région urbaine métropolisée d'Ahmedabad.

Croissance urbaine 1990–2000



Croissance urbaine 1990–2007

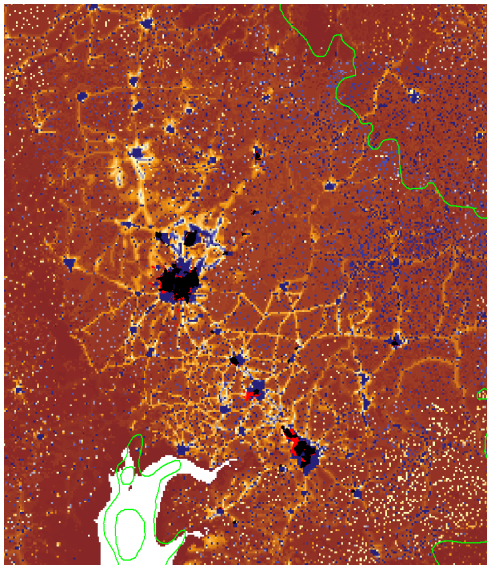
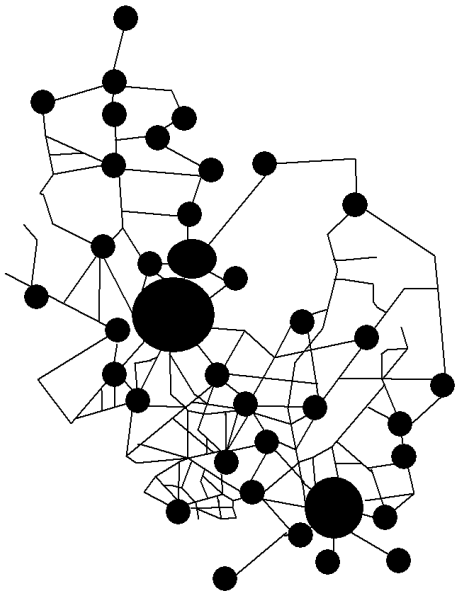


Schéma de l'armature urbaine en 2007



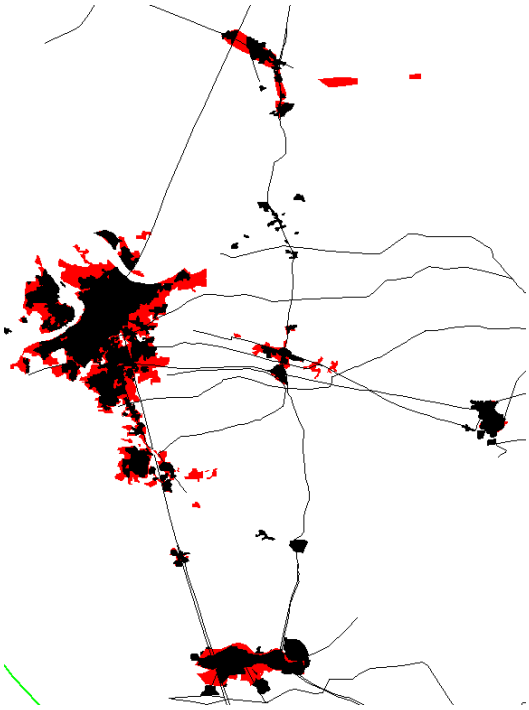
Légende : Urbanisation : (noir : 1990), (rouge : 2001), (bleu : 2007). Frontière : (vert).

MODELE URBAIN LITTORAL

Le processus de littoralisation entre les deux territoires métropolisées Mumbai et le tri–pôle «Gāndhīnagar–Ahmedabad–Vadodara » rassemblant chacun plusieurs millions d'habitants (environ vingt millions d'habitants à Mumbai) est marqué par la prédominance de la capitale économique de l'Inde. L'urbanisation littorale est soutenue depuis les années 1990. Elle se concentre sur les centres urbains de petite et moyenne taille qui connaissent une extension urbaine contiguë le long de l'axe routier reliant les deux territoires métropolisés. L'urbanisation littorale est marquée durant les années 1990 par l'apparition de centres urbains le long des routes qui sont localisés à quelques kilomètres de villes comme Surat ou de petites localités comme Vapi (centre industriel de petites unités chimiques), l'une des localités urbaines les plus polluées du Monde.

A titre d'exemple, la capitale commerciale du Gujarat (textile et diamants), Surat (appelée également Suryapur), a vu sa population doubler entre 1990 et 2000 avec notamment la construction de nombreuses zones périurbaines.

Figure 131 : croissance de Surat entre 1990 et 2000 (reconnaissance, extraction et vectorisation des objets urbains sur des scènes multi–spectrales Landsat-5 TM et Landsat-7 ETM+.

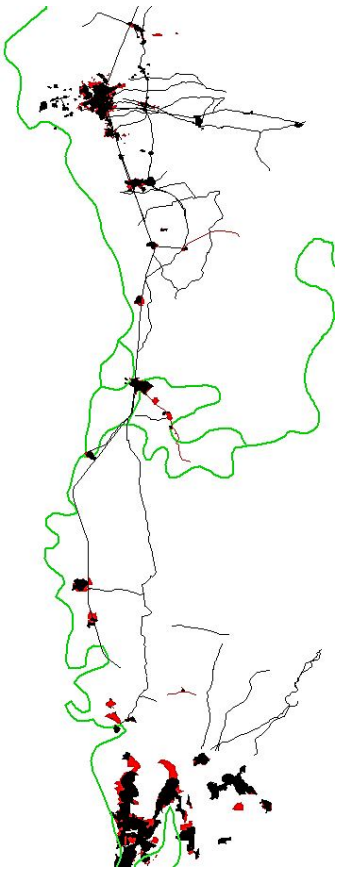


A l'instar de Mumbai (en direction de Pune–Hyderabad et de Nashik), dans une plus faible mesure Surat se caractérise par un hinterland de développement économique et urbain Ouest–Est « Surat–Songah–Dhule » en direction de Nagpur.

Ce modèle d'organisation territorial de l'espace littoral est relativement classique. Un axe de développement littoral Nord–Sud avec des transversales de développement Est–Ouest (à l'exception de la mer Méditerranée et de la mer Noire, deux paléo–mers fermées qui ont une configuration « Est–Ouest » et « Nord–Sud ») marqué par une interface aéroportuaire globalisée liée à des hinterlands qui peuvent être distants de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres. Hinterlands qui sont au nombre de trois pour Mumbai : « Pune–Hyderabad », Nashik et « Ahmedabad–Delhi ».

Figure 132 : croissance urbaine littorale.

Croissance urbaine littorale 1990–2000



Croissance urbaine littorale 1990–2007

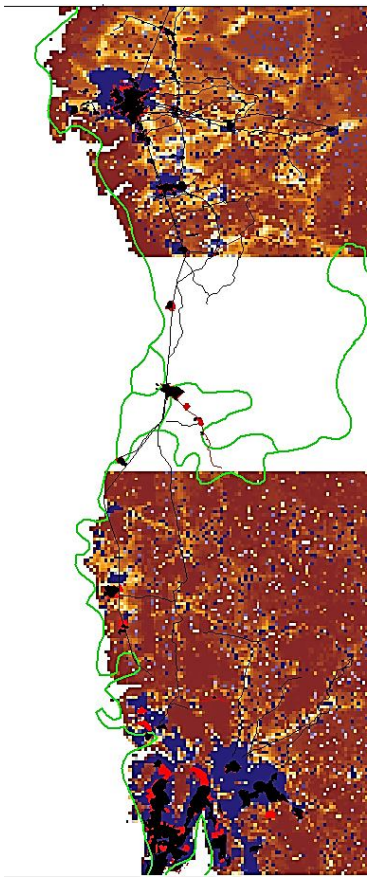
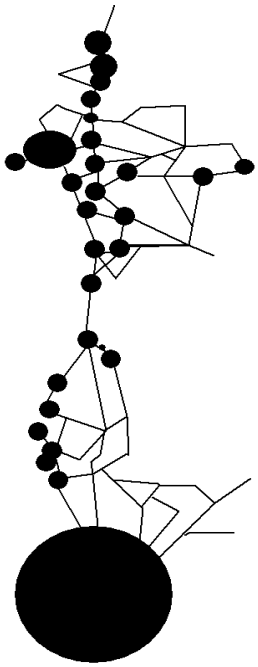


Schéma de l'armature urbaine en 2007



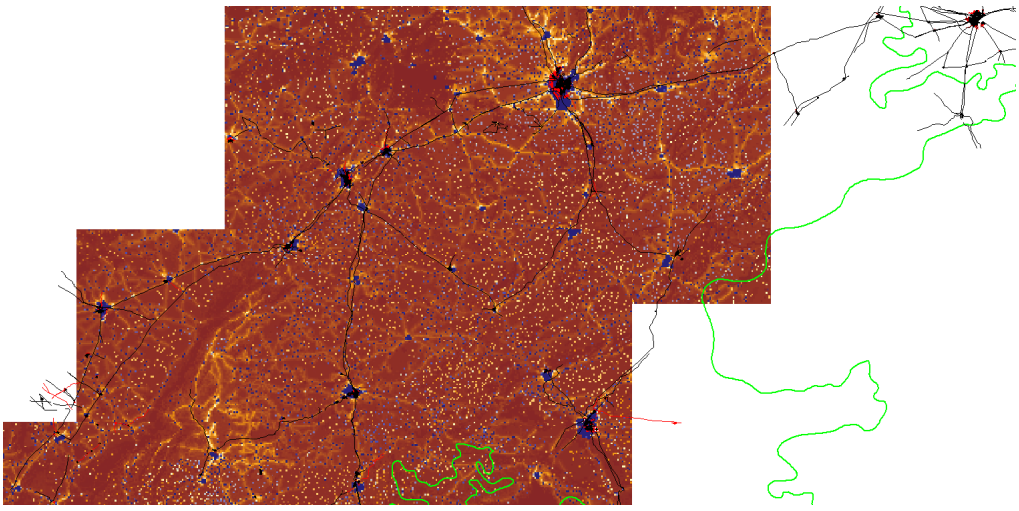
UN RESEAU PEU DENSE DE VILLES SECONDAIRES (RAJASTHAN)

Tout comme pour les territoires urbains et métropolisés du méta–pôle métropolisé et urbain « Delhi–Ahmedabad–Mumbai », les années 1990 et 2000 sont caractérisées par une intense croissance démographique des villes qui se matérialise par une extension spatiale contiguë des centres urbains (phénomène similaire dans les Pays baltes) et l'apparition de territoires multipolaires formant de véritables régions urbaines. Ces réseaux de petites villes moyennes sont, comme la périurbanisation pavillonnaire, des processus géographiques endogènes propres à la métropolisation.

Urbanisation qui est marquée sur la zone littorale, comme à Surat, par des phénomènes de périurbanisation pavillonnaire à l'instar de la plupart des processus émergeants de métropolisation en Europe et aux Etats-Unis. La périurbanisation pavillonnaire est l'un des moteurs géographiques et spatiaux de du développement des territoires métropolisés. Périurbanisation qui se caractérise démographiquement par une relocalisation d'une partie de la population urbaine des centres villes vers la périphérie – baisse de la densité de la population urbaine / augmentation de la densité de la population périurbaine.

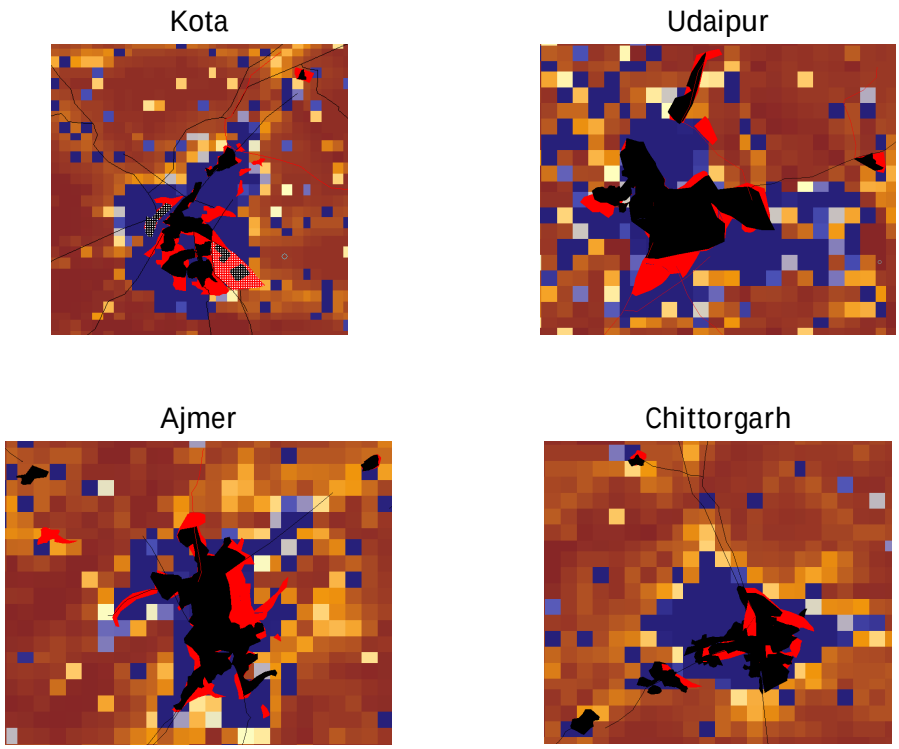
Le processus de croissance urbaine contiguë, comme dans les Pays baltes ou en Afrique de l'ouest, se double d'un processus de densification urbaine (cf. simulation empirique sur Delhi).

Figure 133 : urbanisation 1990–2007.



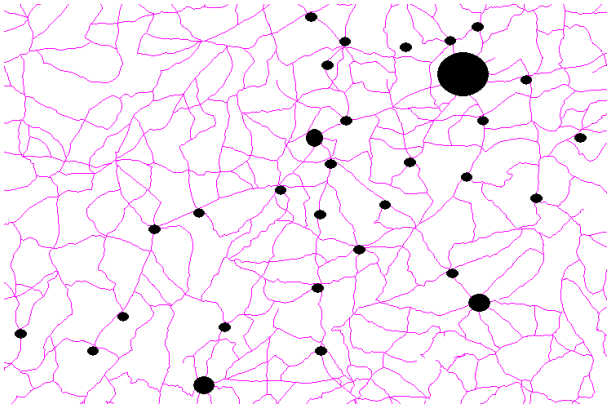
Les dynamiques d'urbanisation sur la majeure partie de l'Etat du Rajasthan sont centrées sur les centres urbains existants, générant des processus de polarisation marquée. Ils se doublent dans la plupart des villes par l'apparition de zones périurbaines dans les années 1990 comme à Ajmer, Kota, Udaipur, Chittorgarh.

Figure 134 : une croissance urbaine soutenue et polarisée (1990–2007).



Ces centres urbains qui accueillent entre trois cents mille et cinq cents mille personnes et qui peuvent comme à Jaipur, capitale du Rajasthan, voir leur population multipliée par quatre depuis les années 1970 et atteindre 3,7 millions d'habitants. Ils sont reliés par un réseau relativement dense de routes, conférant au territoire un aspect interconnecté.

Figure 135 : schéma de la structure urbaine 2007 fusionnée avec la base de données « routes » de la NGA.



3.3.2. EXEMPLE DE JAIPUR

JAIPUR : EMERGENCE D'UNE VILLE SECONDAIRE MONDIALISEE ET METROPOLISEE

Capitale de l'Etat du Rajasthan depuis 1949, avec 291000 habitants en 1951, la ville de Jaipur est devenue au fil des années une agglomération qui s'est, à partir de 1970, progressivement internationalisée grâce au tourisme, au textile et au commerce de pierres semi–précieuses. Les réformes menées au début des années 1990 avec l'ouverture de l'économie au Monde et à une politique libérale qui s'est mise en place et accentuée au début des années 2000, ont fait rentrer l'agglomération de Jaipur dans la mondialisation des échanges économiques.

L'agglomération de Jaipur, en l'espace de quarante ans, est passée de 500 000 à plus de 3,7 millions habitants. Entre 1990 et 2001 la croissance de la ville a été de l'ordre de 24% selon le *Jaipur Development Authorities* (JDA), extension spatiale qui est estimée par télédétection spatiale à 28,3% (Carton, Gadal, 2007).

Ce processus de croissance de la population urbaine n'est pas propre à la capitale du Rajasthan. Il touche l'ensemble des villes et des centres urbains du Rajasthan depuis le début des années 1990 et s'est accentué durant les années 2000.

Située à environ 350 km de New Delhi, la ville de Jaipur fut fondée en 1727 avec l'établissement des ports coloniaux britanniques et portugais de Mumbai, Madras, Calcutta ou en encore Goa. Elle tient sa puissance économique des activités traditionnelles dans le textile et surtout les pierres semi–précieuses qui font de Jaipur une capitale mondiale du négoce des pierres précieuses.

Depuis le années 1970, la ville connaît une croissance du tourisme qui tient à la beauté de l'architecture de son centre historique et à la proximité d'Amber. L'implantation de zones économiques spéciales en périphérie de la ville, le long des axes de communication, dans les domaines des services informatiques et des technologies de l'information, n'a fait que renforcer le caractère international de l'agglomération.

DONNEES, IMAGES SATELLITES ET IDENTIFICATION DES FUTURES ZONES D'EXTENSION URBAINE

L'analyse des processus de croissance urbaine de l'agglomération de Jaipur s'est faite à partir de séries d'images satellites multi–spectrales Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, Spot 3 XS, et Kompsat-2, de bases de données géographiques vecteurs, des MNT SRTM 2 et d'enquêtes de terrain (2007, 2008, 2009). Les images satellites donnent une vue systématisée des transformations spatiales et

territoriales. Elles permettent de localiser et d'identifier les lieux possibles de conflits d'usage des sols et de prédire les futures zones d'extension urbaine.

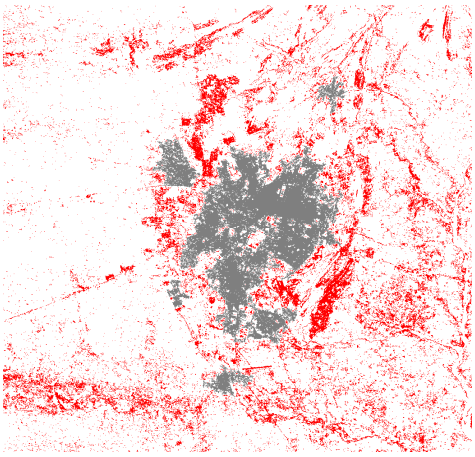
Les méthodes d'analyse sont basées sur la reconnaissance et l'extraction des objets urbains comme le bâti, leur analyse et leur fusion dans le contexte géographique : présence de routes, espaces agricoles, etc. Pour rappel, les méthodes de traitement des images multi–spectrales se divisent en quatre phases de calcul :

- ✓ L'accentuation de la différence radiométrique entre les objets urbains et leur environnement géographique par l'utilisation de méthodes statistiques locales.
- ✓ La fusion des différents résultats issus des filtrages statistiques locaux.
- ✓ La classification automatique pour la reconnaissance, l'identification et l'extraction des objets urbains.
- ✓ L'extraction des objets urbains par segmentation structurale.

Résultats des traitements qui sont comparés à la réalité terrain lors des phases d'enquêtes.

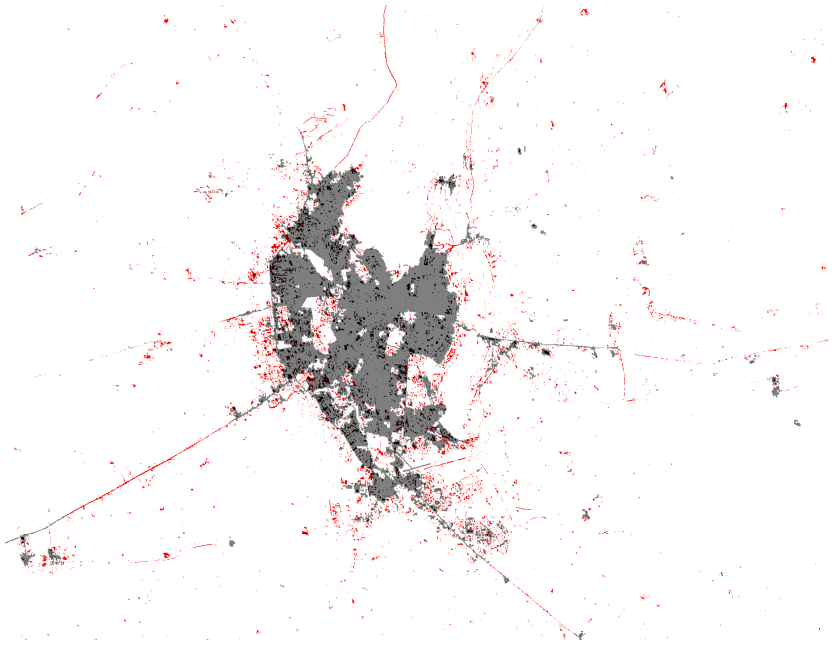
Figure 136 : résultat de la reconnaissance et de l'extraction des objets bâtis.

Bâti 1990 (Landsat-5 TM)
Bâti détecté : gris



Bâti 2001 (Landsat-7 ETM+)

Bâti 2008 (Spot 3 XS)



L'intérêt des analyses temporelles et de l'utilisation de données multi–spectrales sur les images mono–spectrales qui ont été utilisées en doctorat (panchromatique, infrarouge thermique) puis les études postdoctorales (panchromatique, VNIR, moyen infrarouge, bande X) vient de par leur capacité à mesurer différentes caractéristiques spectrales d'un même objet, à les associer (transformées ensemblistes, classifications multidimensionnelles), voire une représentation biophysique plus fine et complète de la surface des objets.

Les démarches mono–spectrales ont plusieurs intérêts, notamment dans un environnement urbain :

- ✓ Elles permettent, avec les images panchromatiques, une meilleure reconnaissance morpho–métrique des objets par une résolution spatiale plus fine et la mesure d'un champ spectral plus large.
- ✓ De mieux discriminer les objets géographiques.
- ✓ Elles permettent d'identifier des caractéristiques biophysiques et des objets géographiques spécifiques, une fois connue et calibrée la fenêtre spectrale de référence (courbe, pic de réflectance ou d'absorption). L'identification des fenêtres spectrales de référence (reconnaissance et identification d'objets géographiques, caractérisation d'états de surface, etc.) peut se faire en utilisant l'imagerie hyper–spectrale. Le but est d'identifier parmi les dizaines ou les centaines de bandes spectrales couvrant de fins intervalles spectraux (jusqu'à 0,01 µm), la ou les bandes

spectrales qui vont caractériser un objet et une part spécifique de son état biophysique.

Comme pour la reconnaissance et l'identification d'objets spécifiques qui « annoncent » et géo–localisent les lieux des prochaines phases d'extension de l'urbain (cf. partie 1.1.3.) comme le tracé de routes, de réseaux viaires, le mitage pavillonnaire, etc., l'idée est d'identifier des états ou des changements spécifiques d'occupation des sols comme, par exemple, des friches qui vont être analysés dans leur contexte géographique à la fois local, méso–urbain et régional.

Figure 137 : identification d'indicateur prédictif de l'urbanisation.

Composition colorée, Landsat-5 TM, 1989 (après application de filtres linéaires locaux et fusion par transformée ensembliste)

Composition colorée, Landsat-7 ETM+, (après application de filtres linéaires locaux et fusion par transformée ensembliste)

L'ellipse en trait noir montre les terrains nus (en couleur sable) qui préfigurent les futures zones d'extension de Jaipur.

UNE EXTENSION URBAINE POLARISEE

Depuis la fin des années 1970, la population de Jaipur a été multipliée par six. Elle est passée de 500000 habitants à une population de plus de 3,7 millions de personnes. La croissance démographique s'exprime spatialement par une importante croissance urbaine contiguë et continue avec la création de nouveaux quartiers d'habitation (pavillonnaires, immeubles), industriels et d'enseignement (localisés à la périphérie de l'agglomération) au Sud et à l'Ouest en suivant les axes routiers, seules infrastructures de communication disponibles. Les routes, à l'instar de la route « n°12 » conduisant à l'aéroport de Sanganer en direction de Tonk et de Kota ou de la route « n°11 » en direction de Dausa, structurent et orientent l'urbanisation depuis les années 2000.

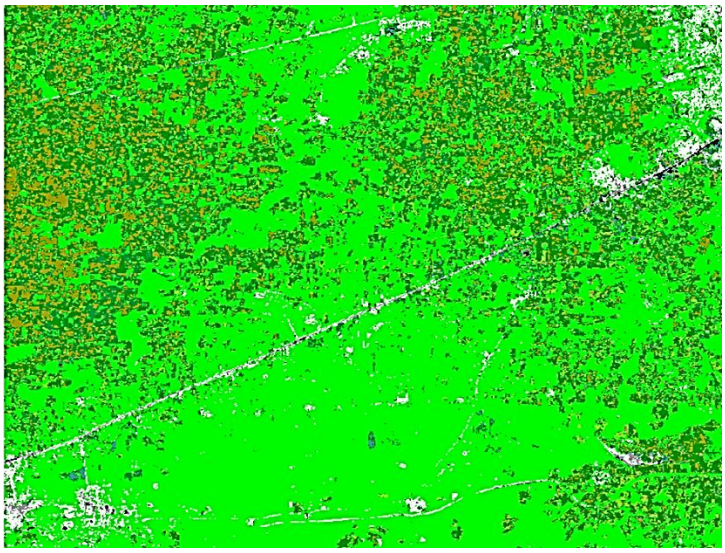
Figure 138 : urbanisation routière.

Reconnaissance du bâti (filtres linéaires locaux associés par transformée ensembliste) à partir d'une scène multi–spectrale Kompsat-2 de 2007.

Route « n°11 »

Reconnaissance du bâti à partir d'une scène multi–spectrale Spot 3 XS (classification automatique par K–means) de 2008.

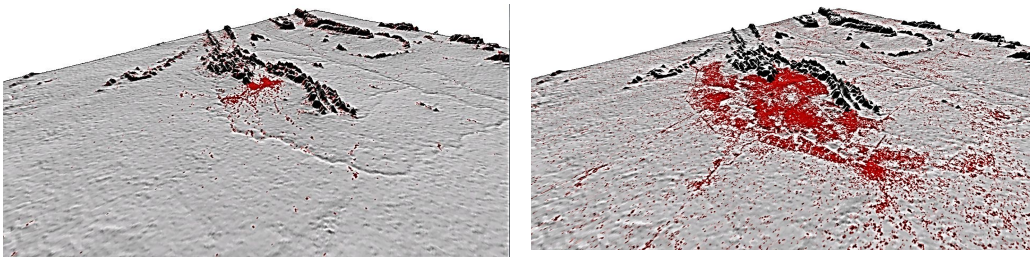
Route « n°12 »



L'urbanisation a franchi, probablement dès la fin des années 1990, la barrière montagneuse via les gorges pour s'étaler le long des axes routiers, densifier Amber au Nord et commencer à miter l'espace agricole. Les premières urbanisations le long de la route « n°11 » sont identifiées sur les résultats issus du traitement des images multi–spectrales Landsat-7 ETM+ de 2001.

Figure 139 : géo–visualisation 3D dynamique de la simulation de la croissance urbaine de Jaipur.

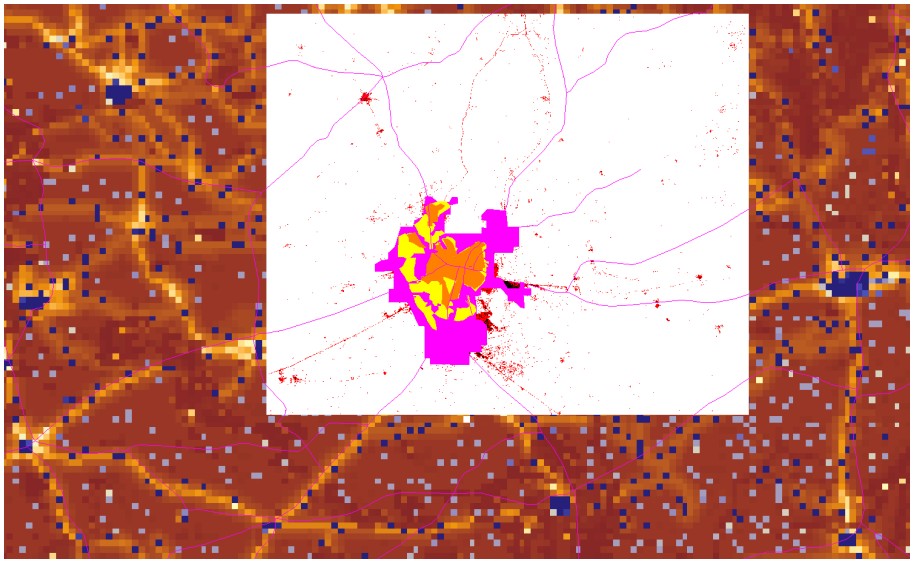
Temps initial : 1975 Urbanisation simulée en 2008



Jusqu'à la fin des années 1990, la localisation géographique de la ville a limité son développement vers l'Est en raison du chaînon montagneux bloquant l'urbanisation. La ville s'est étalée en direction de l'ouest, du nord et du sud en suivant les axes routiers et en mitant progressivement le parcellaire agricole. Le processus de croissance horizontal de la ville est doublé par une verticalisation et une densification de l'espace urbain dans les quartiers de Banipark, Tilak Nagar, et Bapu Nagar. Pour les autorités locales en charge de l'urbanisme l'objectif est de limiter autant que possible l'extension spatiale de l'agglomération par l'étagement des constructions. Dans les quartiers pauvres, la verticalisation prend la forme d'une superposition d'étagements générant des effondrements de bâtiments en raison de l'absence de normes de sécurité et de l'utilisation de matériaux de mauvaise qualité.

Figure 140 : croissance urbaine de la région de Jaipur (1975–2008).

Extrait du SGIMT sur Jaipur



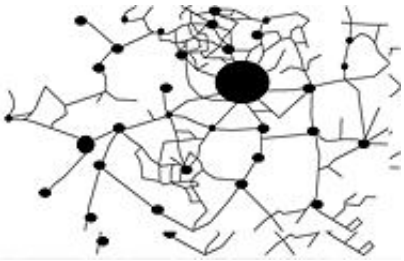
Répartition du bâti (rouge) (Spot 3 XS) 2008.
Reconnaissance des centres urbains (bleu) (DMSP F-15) 2007.
Urbanisation en 1975 (orange), urbanisation en 1989 (jaune), urbanisation en 2007 (violet).

Pour les autorités locales, la densification des espaces intersticiels et la verticalisation de l'habitat sont parmi les meilleures solutions pour répondre au besoin croissant de logements et limiter l'extension de Jaipur, tout en délocalisant les lieux de croissance urbaine. En 2011, la population de Jaipur est de 3,7 millions de personnes. L'apparition d'une classe moyenne suffisamment importante a engendré, en périphérie de la ville de Jaipur, la construction de complexes de loisirs intégrés (cinémas, parcs) et de centres commerciaux (moles).

La politique de densification de l'agglomération tient au fait que les plans d'aménagement et d'urbanisme ont été conçus pour accueillir tout au plus 3,5 millions d'habitants et de relocaliser environ 716000 personnes dans les centres urbains localisés entre dix et quarante kilomètres de Jaipur comme Bagru, Bassi, Chomu, Achrol and Jamwaramgarth, Sawar, Kookas, Kanotra, et Balawala. Cette politique planifiée de délocalisation/décentration de la population est en train d'engendrer une région urbaine centrée sur Jaipur à partir d'une structure territoriale préexistante. L'intérêt pour le JDA est de pouvoir amortir et répartir la croissance démographique et urbaine générée par le développement de Jaipur.

Figure 141 : schéma de la structure spatiale de la région urbaine de Jaipur.

Schéma produit à partir de la reconnaissance des axes routiers par télédétection.



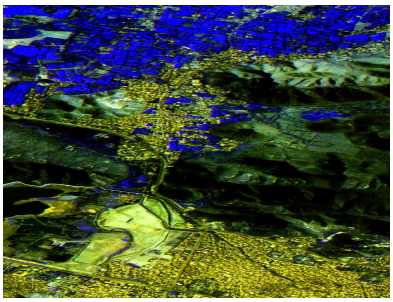
Ce processus de déportation de la croissance urbaine sur les centres périphériques génère l'apparition d'une région urbaine en métropolisation qui est induite par les processus de déconcentration et de délocalisation des populations, le renforcement des relations pendulaires de mobilité entre les différents pôles urbains et Jaipur. Il produit de la multi–polarisation urbaine, de l'intégration territoriale et de la métropolisation à l'échelle infra–régionale.

FRONT D'URBANISATION ET CONFLITS D'USAGE DES SOLS

La croissance urbaine de la capitale du Rajasthan est caractéristique des processus d'urbanisation en cours dans cet Etat : une croissance urbaine contiguë, continue, polarisée, qui empiète directement sur les terres agricoles, générant des « fronts d'urbanisation » et des conflits d'usage des sols qui peuvent être violents. Ce processus de croissance urbaine continue se double depuis les années 1970–1980 d'un processus de périurbanisation le long des axes routiers (road urbanisation) et d'industrialisation de l'espace rural (Gadal, 2009).

Figure 142 : géo–visualisation 3D d'un front d'urbanisation à l'Est de Jaipur (généré à partir d'une scène multi–spectrale Kompsat-2 de 2007 et d'un MNT SRTM 2.

Géo–visualisation 3D de la gorge de la route « n°8 » et du front d'urbanisation	Géo–visualisation 3D de deux passages (routes « n°8 » et « n°12 ») et du plateau agricole en phase d'urbanisation



L'importance de la croissance urbaine provoque des conflits d'usage du sol, plus spécialement sur le plateau agricole situé à la sortie de la gorge de la route « n°8 ». La croissance urbaine le long des axes routiers est associée à du mitage pavillonnaire sur les espaces agricoles localisés à l'ouest et à l'est de Jaipur. Les réseaux routiers sont devenus les éléments structurants clés de la croissance urbaine, de l'intégration territoriale et de la métropolisation, que ce soit à proximité de Jaipur ou à plusieurs dizaines de kilomètres.

Depuis les années 2000, le fort développement de Jaipur entraîne une pression foncière directe sur l'espace agricole. Cette urbanisation se caractérise par une « *road urbanisation* », un mitage urbain et industriel qui peut s'étendre sur une profondeur de soixante kilomètres depuis Jaipur.

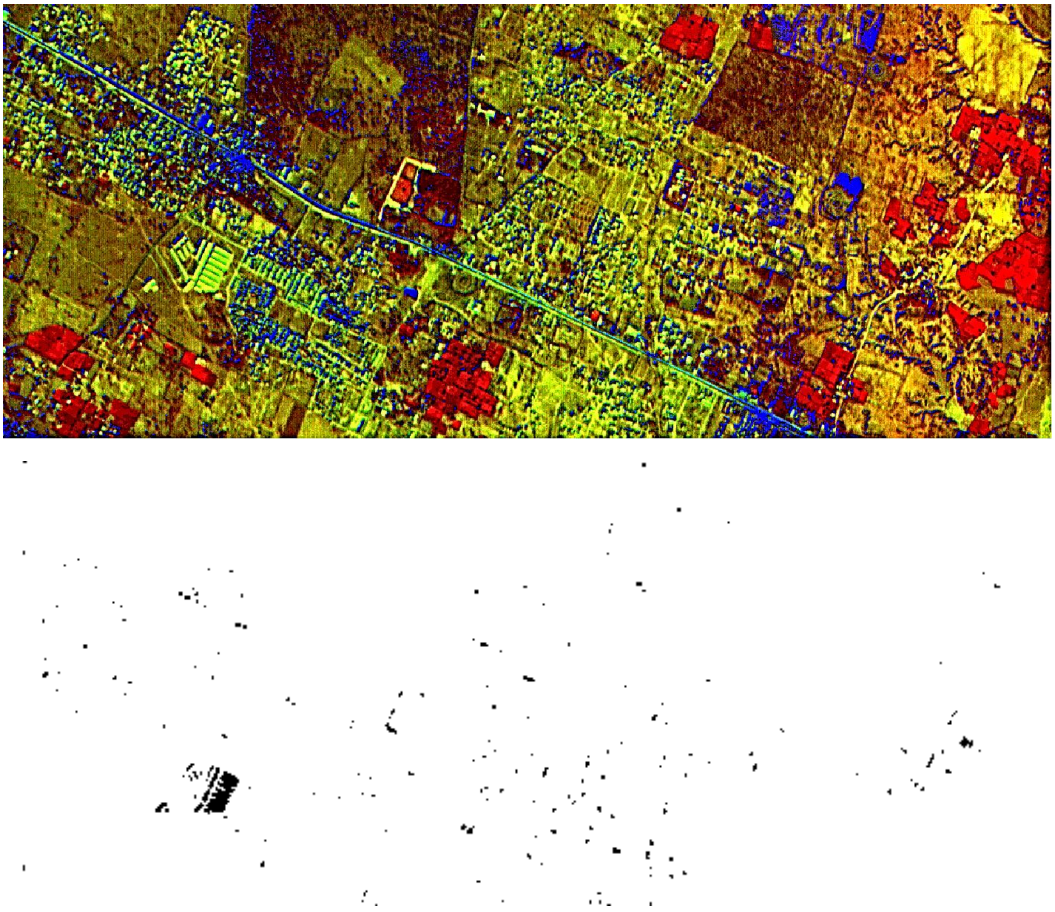
UNE URBANISATION ET UNE INDUSTRIALISATION RURALES

L'analyse des processus d'urbanisation de la région de Jaipur et leur suivi spatio–temporel par télédétection mettent en évidence l'apparition d'un processus d'urbanisation et d'industrialisation de l'espace agricole situé sur le plateau à l'Est de Jaipur sur une distance d'environ trente kilomètres qui peut s'étendre jusqu'à une distance de soixante kilomètres (Dausa). Ce processus d'urbanisation de l'espace rural est lié à la dynamique de « déversement » de la pression urbaine de Jaipur sur son environnement géographique immédiat.

Figure 143 : croissance urbaine en zone rurale (Est de Jaipur) (résultat de l'axe 1 de la transformée de Karhunen–Loeve, Spot 3 XS, 2008).

Au même titre que les centres urbains localisés entre dix et trente kilomètres, les territoires agricoles deviennent des espaces d'urbanisation diffuse. Le processus de « *rural urbanisation* » (Gadal, 2009) s'accompagne de l'implantation d'usines, en raison de leur interdiction au sein de l'agglomération de Jaipur, faisant de l'industrialisation un processus de développement rural et « métropolisant ».

Figure 144 : identification des bâtiments industriels par télédétection à partir d'une scène multi–spectrale Kompsat-2 (haut : transformée ensembliste), (bas : extraction par segmentation structurale). On notera que les bâtiments en couleur bleue sont des bidonvilles.



L'analyse de l'urbanisation par la transformation interne de l'espace rural développée sur Jaipur et en Lituanie se démarque de la plupart des approches qui se fondent sur une dichotomie urbain/rural, disparition des terres agricoles/croissance urbaine qui, en télédétection, se fonde sur le concept de frange urbaine. L'analyse de l'urbanisation à travers le concept d'urbanisation rurale (*rural urbanisation*) ou « rurabanisation » en télédétection est relativement récent (Agrawal, 2009).

La plupart des études portant sur la croissance urbaine et ses impacts sur l'espace rural font référence à ce concept (Bansal, 2007) (Kumar, 1998) (Ramesh, Krishnan, 1991) tout en développant une analyse sur les questions de développement territorial et d'aménagement (Joshi, Suthar, 2002) (Rahman, 2007) (Singh, 1987).

3.3.3. EMERGENCE D'UNE NOUVELLE FORME D'ORGANISATION TERRITORIALE ? LA META–POLE METROPOLISEE ET URBAINE

Quel nom donner à l'interconnexion et à l'intégration de territoires métropolisés, en métropolisation, urbanisés et mégapolisés ? Ce sont des territoires urbains et post–urbains hétérogènes, pour certains mondialisés, qui sont entrain de former un même ensemble territorial. Un ensemble territorial qui a la singularité d'être spatialement discontinu et hétérogène.

L'axe Delhi–Ahmedabad–Mumbai préfigure, comme du temps de l'Union soviétique avec le corridor Klaïpeda–Kaunas–Vilnius–Minsk–Kiev/Moscou, l'émergence de méta–pôles métropolisées et urbaines. Elles constituent probablement un nouveau stade d'évolution des territoires qui intègre aussi bien des territoires en métropolisation, métropolisés, urbanisés, mégapolisés. Ce type d'ensemble territorial génère de l'intégration spatiale tout autant qu'il en est une résultante grâce à l'interconnexion des territoires.

Il est difficile de parler de modèle post–urbain ou post–métropolisé dans le sens où ce sont des processus de développement territoriaux qui sont toujours en cours et qu'une méta–pôle intègre des territoires qui ont des stades de développement urbain et métropolitain qui, en 2001, diffèrent. L'intégration territoriale est mue par l'accroissement des interconnexions des mobilités (routes, trains, avions) et des télécommunications (mobiles, Internet, etc.).

L'impact des frontières est essentiellement lié au modèle de développement de part et d'autre de celles-ci, qu'il soit de nature économique (Gadal, Maletto, 2007) ou géoéconomique (organisation territoriale de la Lituanie soviétique par exemple). Le rétablissement des frontières a un impact temporel et spatial quasi immédiat qui peut être sensible sur l'évolution de la structure des territoires sur le court terme à condition que leur rétablissement soit concomitant à l'établissement de systèmes politiques sensiblement différents. Le tronçonnage du corridor de développement Klaïpeda–Kaunas–Vilnius–Minsk–Kiev/Moscou, vingt ans après, n'a pas sensiblement modifié la direction et la teneur des flux d'échanges. Ils tendent même à s'intensifier alors même que les structures politiques intégratrices ont été totalement modifiées. La permanence et l'inertie temporelle des structures géographiques et territoriales sont fortes.

Les frontières agissent comme des freins temporels administratifs aux flux de marchandises quel que soit le corridor d'échange et de développement. Il en est exactement de même pour le corridor Delhi–Ahmedabad–Mumbai. Les camions sont bloqués aux péages d'entrée de chaque Etat de l'Union indienne (perception des taxes). Le modèle économique et territorial de développement est fondamental dans la construction territoriale de méta–pôles métropolisées et urbaines. Elles apparaissent (s'insèrent) dans des cadres géopolitiques et géoéconomiques identiques.

La politique économique de chaque Etat de l'Union indienne est chapeautée par une politique macro–économique unique. Dans les anciennes républiques soviétiques de la Baltique, le modèle économique qui s'est imposé est sensiblement le même : ultra–libéralisme et permanence du système de corruption soviétique, ceux-ci prenant des formes plus aigües avec l'émergence d'un capitalisme sans règles dans les régimes post–communistes à « démocratie limitée ».

GEOMATIQUE, TOURISME ET VALORISATION DU PATRIMOINE

TOURISME ET GEO–INFORMATION

Absence d'informations géo–localisées

Le secteur du tourisme représente l'une des dynamiques géographiques les plus importantes à l'échelle mondiale avec 903 millions d'arrivées de touristes internationaux en 2007. En Inde, la croissance du tourisme est exponentielle et a atteint en 2007 plus de 5 millions de visiteurs internationaux avec une augmentation de 12% par rapport à l'année 2006. Le Rajasthan figure parmi les Etats les plus touristiques de l'Inde grâce à son patrimoine culturel et architectural. La capitale, Jaipur, accueille un flux croissant de touristes qui se concentrent autour de quelques principaux monuments du centre historique. La polarisation de ces flux touristiques autour de quelques monuments se fait au détriment d'une richesse architecturale, historique et culturelle peu ou pas valorisée de son quartier historique.

En Inde, et particulièrement au Rajasthan, pourtant l'une des destinations les plus prisées du pays, les cartes sont de mauvaise qualité et leur distribution auprès du public et des touristes est limitée. Les cartes touristiques sont plutôt des cartes publicitaires faisant la promotion de boutiques ou d'hôtels qui ont sponsorisé leur édition, voire investi en tant qu'annonceurs. L'information géographique et cartographique reste rudimentaire, bien souvent approximative et négligée.

L'absence d'informations géographiques et cartographiques constitue un problème pour Jaipur et la valorisation de son patrimoine urbain : à savoir son absence de valorisation. Ce problème n'est pas propre au Rajasthan ou à l'Inde. Il est plus général malgré le fait que le tourisme représente la quatrième source d'exportation dans l'activité économique mondiale. Les professionnels du tourisme se reportent continuellement à la cartographie, à la géographie, aux territoires pour développer et gérer leurs activités. Les touristes localisent leurs futures destinations sur des cartes et les territoires assurent leur promotion en

mettant à la disposition du public des cartes touristiques et des bases de données géographiques. Le suivi du développement touristique par l'analyse typologique des activités touristiques pratiquées sur un territoire, la répartition des hébergements par type, des prestataires de service, les itinéraires, les divers flux sont autant d'éléments pour lesquels le système d'information géographique constitue l'élément central de gestion et d'analyse.

Le potentiel de développement de l'information géographique au sein du secteur touristique est pourtant considérable : en tant qu'outil d'aide à la décision pour le développement touristique local, comme base d'information touristique géo–localisée. Les professionnels du tourisme pourraient diversifier et enrichir leur offre en ayant accès à une information plus exacte, précise et pratique grâce à la géo–localisation, au développement de SIG mobiles, aux représentations virtuelles du paysage, à la géo–visualisation.

L'intégration des technologies de l'information et de la communication dans les SIG, ainsi que le processus d'individualisation induit par les supports mobiles comme les Smartphones et des itinéraires touristiques, tendent à transformer le rapport entre le processus de valorisation territoriale et l'utilisation qui en est faite par les touristes.

Industrialisation et mondialisation des SIG touristiques

Deux stratégies commerciales diamétralement différentes s'opposent : celle de *Google Earth* et celle de *Virtual Earth*. Tous deux développent des services liés à la promotion des lieux touristiques. *Google Earth* sous la forme d'un accès ouvert direct sur son SIG, *Virtual Earth* par l'intégration des informations géographiques dans des plates–formes de vente dédiées aux professionnels du tourisme. Elles passent par une mise en scène de l'espace géographique et la promotion, à travers le modèle touristique mis en avant, d'une image géo–politisée censée véhiculer et représenter les valeurs éco–environnementales du territoire.

Le SIG est un outil structurant les démarches spatiales en géographie du tourisme et de protection du patrimoine urbain qui s'intègre dans une approche pluridisciplinaire faisant interagir des données socioéconomiques, politiques, environnementales, en provenance de la société ou d'acteurs privés. Démarche et outil multidimensionnel, il s'avère être une ressource pour la gestion du patrimoine touristique mais également un instrument de valorisation, de promotion et de communication sur des supports interactifs.

En ce sens, le SIG répond aux exigences du tourisme, secteur en perpétuelle évolution qui nécessite une adaptation rapide des informations touristiques géo–spatialisées à développer ou mettre à jour. Le SIG du patrimoine du centre historique de Jaipur démontre cette aptitude à fournir des informations géo–référencées et géo–spatialisées aux acteurs publics impliqués dans la gestion du

patrimoine historique et culturel, ainsi qu'aux acteurs privés travaillant dans le tourisme.

GEOMATIQUE, VALORISATION TERRITORIALE ET DEVELOPPEMENT

L'utilisation de la géomatique, télédétection et SIG pour les applications liées au tourisme et à la valorisation du patrimoine urbain répond à un triple enjeu : informer et guider les touristes, mettre en scène le territoire dans lequel le patrimoine culturel et environnemental est à la fois une ressource et un objet markéting, exploiter les données géographiques, patrimoniales et sociales pour aider et promouvoir le développement économique par le tourisme.

Les SIG dédiés à l'inventaire et à la valorisation touristique du patrimoine culturel et social visent dans des villes comme Jaipur, capitale de l'Etat du Rajasthan en Inde, à pallier l'absence d'informations, de plans et d'itinéraires. La géomatique contribue à la valorisation de l'espace socioculturel par la création de cartographies et de bases de données géo–localisées du patrimoine historique, architectural et culturel comme à Jaipur. Le SIG a la capacité d'associer des données et informations géo–référencées et spatiales, ponctuelles et surfaciques, architecturales et sociales, urbaines et environnementales, en représentant l'empreinte géographique de l'homme et de la société sur le territoire.

La politique de réhabilitation du centre historique de Jaipur s'inscrit dans la dynamique mondialisée de mise en valeur des richesses culturelles et sociales locales qui agissent comme une vitrine politique de l'Etat symbole de son insertion dans les réseaux des villes globalisées, un modèle de la géo–territorialisation économique de la mondialisation qui se caractérise par l'attractivité touristique, culturelle et évènementielle, la gentrification, celle de l'insertion de l'agglomération dans les territoires de la métropolisation.

Le SIG constitue un support informationnel au développement du tourisme culturel et par ce biais une des ressources techno–informelles d'aide au développement local économique et culturel. C'est un vecteur du processus de réappropriation culturel, social et identitaire par la mise en valeur du patrimoine urbain. La construction de SIG sur le patrimoine culturel participe dans le même temps à une prise de conscience de la richesse historique, sociale et architecturale locale par sa mise en valeur dans l'espace techno–informationnel global. L'utilisation de la géomatique comme démarche d'inventaire, de valorisation et d'identité du local pour le local et du local pour le global, c'est un objet techno–informationnel bidimensionnel, local et global, « mondialisant » les territoires qu'il mesure, normalise, modélise, analyse et représente. Mondialisation des territoires qui est rendue possible par la mise sur le réseau Internet des territoires numérisés par la géomatique en s'appuyant, pour l'essentiel, sur la télédétection, les SIG et les *WebGIS*.

La mondialisation numérique et virtuelle de l'espace géographique façonne une certaine forme d'attractivité territoriale. Elle reste cependant difficile à appréhender. Par son double positionnement scalaire, local et global, le local étant un composant de l'espace mondialisé, le territoire « géomatisé » est un inducteur de développement. C'est également une démarche de nature géographique et spatiale qui induit du développement territorial par le biais d'un processus géo–spatialisé de réappropriation culturel, identitaire, environnemental et social l'espace urbain.

SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE DU PATRIMOINE : UN SUPPORT GEO–INFORMATIONNEL AU DEVELOPPEMENT TOURISTIQUE

SIG et patrimoine urbain

Le SIG du patrimoine de Jaipur a été construit pour répondre, à la fois, à la demande croissante en informations géographiques numériques et interactives pour les touristes (Gadal, Matthis, 2006), aménageurs et personnels en charge de la réhabilitation du centre historique. L'utilisation du système d'information géographique patrimoine répond à plusieurs usages qui se basent sur l'inventaire, la représentation et la cartographie du patrimoine socioculturel et architectural du centre–ville de Jaipur.

Le SIG participe de fait à la promotion de la richesse territoriale et touristique par une représentation spatialisée des richesses socioculturelles du centre–ville et leur mise en valeur touristique à travers la mise en place d'itinéraires de visites à pied.

La valorisation du patrimoine urbain est fondamentale pour une ville marquée par une activité touristique croissante comme Jaipur. Les études faites en Jordanie montrent que la mise en valeur du patrimoine historique, culturel et architectural s'appuyant sur la construction de SIG patrimoniaux urbains est génératrice pour 12% des ressources financières issues du tourisme (Al-Kheder, Khrisat, 2007).

L'analyse des flux touristiques et leur évolution permet de mieux planifier le développement touristique local, de canaliser et rediriger les flux. Cela nécessite néanmoins un suivi géostatistique fiable et stable. Les palais de Jaipur attirent des milliers de touristes mais les petites ruelles de la vieille ville n'ont pas cette capacité d'absorption. Elle est prise en compte dans la planification en SIG des parcours.

Trois fonctions de base du SIG patrimoine ont été développées :

- ✓ L'inventaire de l'héritage architectural, historique et culturel urbain (inventaire géo–spatial).

- ✓ La visualisation de ces espaces pour la gestion urbaine (Riu, 2008) (visualisation des données spatialisées, cartographiques, géo–référencées, des données complexes et croisées).
- ✓ Auxquels s'ajoute la valorisation touristique du patrimoine (modélisation, de gestion et d'analyse).

Construction du SIG

La construction du SIG du patrimoine socioculturel urbain de Jaipur s'appuie sur l'intégration de la télédétection spatiale très haute résolution spatiale avec une panchromatique Kompsat-2 et de données et informations qualitatives issues des enquêtes de terrain.

Le développement du SIG à partir de données de télédétections haute résolution n'est pas quelque chose de nouveau. Le développement de ces systèmes d'informations géographiques se fonde essentiellement sur les photographies aériennes, les ortho–photographies et les images de télédétection spatiale très haute résolution (Chias et al. 2007).

La construction du SIG du patrimoine du centre historique de Jaipur s'appuie sur deux ensembles d'informations géographiques, morphologiques (le bâti) et sociétales (fonctions). Ils ont été générés à partir d'une image métrique panchromatique Kompsat-2 (Carton, Gadal, 2007) et par deux séries d'enquêtes de terrain effectuées durant trois et six mois.

Les informations morphologiques ont été produites par numérisation automatique à partir de l'image panchromatique rehaussée avec un filtre laplacien pour accentuer la différenciation entre bâti et non bâti.

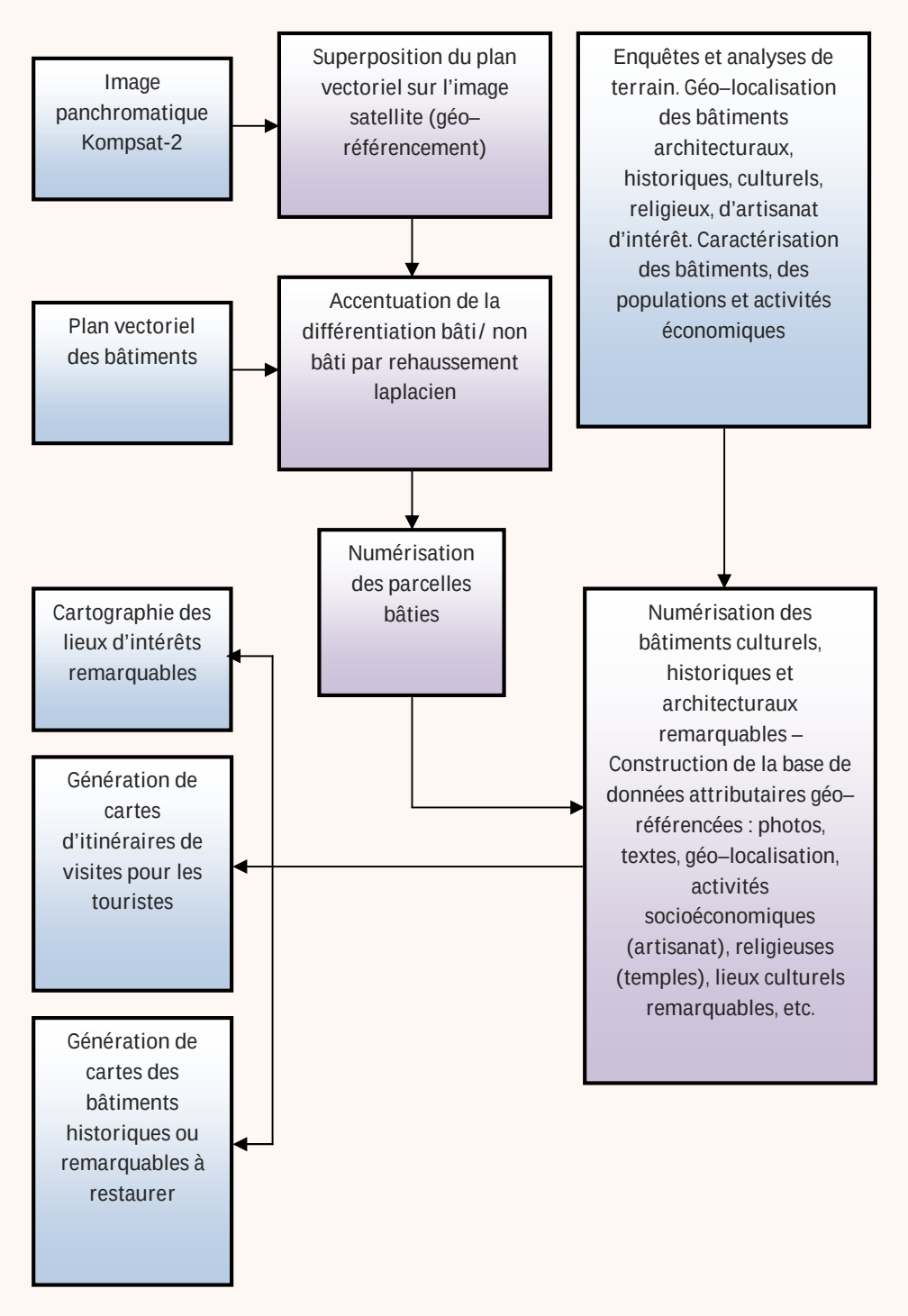
Leur caractérisation et leur géo–localisation se sont faites à partir d'enquêtes de terrain : type d'architecture, niveau de dégradation, photographies, hypertextes renseignant sur les fonctions sociales, l'historique, etc.

Après identification, les éléments composant le patrimoine historique de Jaipur ont été implémentés dans le SIG : les temples, les « haveli » (maisons de famille), les palais, les commerces et l'artisanat. Chaque élément bâti recensé est géo–référencé, figuré sur le SIG et renseigné dans la base de données géographiques attributaires objet les décrivant.

On notera que le plan vectoriel des bâtiments fourni, une fois géo–référencé sur l'image, n'a été que peu utile. Il se présentait comme une base de données « dessin » dans laquelle les objets géographiques « bâtiments » n'étaient pas individualisés. Il n'était pas possible d'individualiser graphiquement et sémiologiquement les bâtiments, ni de développer une base de données attributaires associée à chacun. Le géocodage, le renseignement et l'association des données attributaires (photographies, type d'habitat, fonctions, intérêt,

histoire, etc.) pour chaque édifice se sont faits à partir de la base de données du bâti générée à partir de l'image panchromatique Kompsat-2.

Figure 145 : organigramme méthodologique de construction du SIG patrimoine.



La création des parcours de visites à pied s'est faite en combinant par analyse spatiale :

- ✓ L'implantation des bâtiments remarquables.
- ✓ Leurs fonctions et intérêts en utilisant la logique booléenne.
- ✓ Les données qualitatives issues du travail d'expertise de terrain.

Ces parcours ont été validés par un contrôle de terrain, affinés et modifiés en conséquence. On notera que des approches assez similaires basées sur l'utilisation de la logique floue ont été utilisées pour délimiter les espaces urbains historiques et culturels à protéger en fonction de la répartition des bâtiments remarquables protégés dans le district de Jing Shan en Chine (Shi, Liu, 2007).

Cinq parcours de visites à pied ont été générés. Ils associent des visites d'havelis, de palais, de temples et de rues commerçantes spécifiques et d'artisans spécialisés.

Figure 146 : le système d'information géographique du patrimoine culturel, historique et architectural du centre de Jaipur.

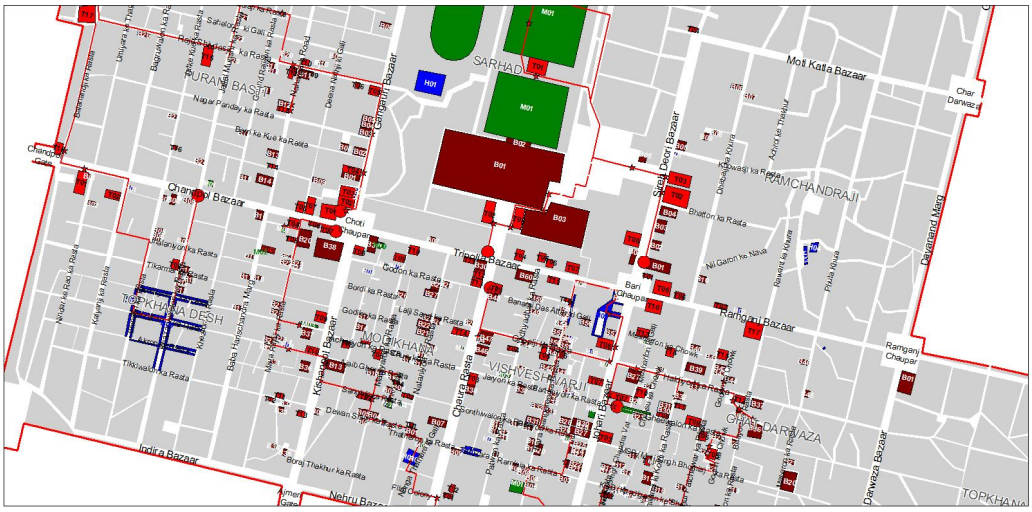
Outil de gestion du patrimoine historique et social

Objet techno–informationnel de gestion géographique multifonctionnelle de l'espace urbain dont la gestion du patrimoine architectural et historique fait partie intégrante, il constitue une des pierres angulaires de l'observatoire du

patrimoine socioculturel, architectural et humain de la vieille ville et de son évolution. Il constitue, à ce titre, un instrument privilégié de gestion et de valorisation du patrimoine culturel et humain. Il fournit des éléments cartographiques et de géo–visualisation pour les inventaires des bâtiments historiques, culturels, menacés de disparition ou ignorés. Il permet de gérer les priorités d'intervention pour la préservation du patrimoine en mettant en valeur les espaces vulnérables à différentes échelles superposables.

Le SIG mis en place sert comme système d'observation des transformations du centre historique, mais également comme outil partagé pour une gestion commune et cohérente du patrimoine urbain. Sa triple vocation, l'inventaire du patrimoine urbain dans ses multiples dimensions, qu'elle soit de nature architecturale, sociale, culturelle, historique, la gestion du processus de réhabilitation du centre historique et sa valorisation auprès de la population locale et des touristes en font un outil structurant à la fois les démarches intégrées d'analyse et de gestion de l'espace patrimonial urbain et de valorisation géographique du tourisme.

Figure 147 : extrait de couches au format vectoriel du patrimoine culturel, historique et architectural du centre de Jaipur.



L'analyse spatio–temporelle fait ressortir les évolutions du bâti et les niveaux de dégradation du patrimoine architectural et culturel. La classification de la vitesse et du degré de dégradation du patrimoine permet de planifier les actions préventives ou correctives prioritaires à mettre en place : protection, réhabilitation, valorisation.

Le recensement des bâtiments historiques effectué en 2009 a été comparé aux données précédentes : plusieurs bâtiments historiques ont été détruits pour laisser place à des constructions neuves.

La comparaison avec les cartes produites par le SIG révèle que certains corps de métiers ont pratiquement et même totalement disparu, entraînant un remodelage social, religieux et culturel des zones de la vieille ville puisque celle-ci était, au départ, conçue dans une logique pragmatique de quartiers spécialisés.

Les artisans de la vieille ville de Jaipur étaient, au départ, organisés par quartiers d'activité, ce qui reste plus ou moins vrai. Certaines activités ont totalement disparu, d'autres ont changé de localisation. Elles ne sont donc plus toujours liées au découpage socioreligieux originel. Il est relativement facile d'observer les activités artisanales et de les modéliser sur le SIG. L'acquisition, le traitement et la modélisation des données socioreligieuses sont plus complexes à traiter.

SIG DU PATRIMOINE ET DEVELOPPEMENT DU TOURISME SOCIOCULTUREL

UNE CARTOGRAPHIE D'ITINERAIRES

La valorisation de la base de données géographiques du patrimoine urbain s'est faite par la création de cartes touristiques associées à des informations textuelles et photographiques issues du SIG.

La création d'une cartographie d'itinéraires au format papier s'est révélée indispensable pour diffuser les parcours des visites du centre historique créés à partir de la base de données géographiques produites et structurées dans le SIG en raison de l'absence d'un usage généralisé des tablettes. Elle s'accompagne de textes et de photographies provenant des données attributaires associées à chaque édifice remarquable (Gadal, Carton, Vignarath, 2010). Le patrimoine caché des petites ruelles où personne n'ose aller par crainte de s'y perdre a permis d'attirer des visiteurs passionnés d'histoire ou d'architecture.

Une partie du développement des SIG est liée aux supports de géo–visualisation (mobiles) et au réseau des télécommunications. Il est depuis l'avènement de la téléphonie mobile une des composantes clé de l'architecture réseau permettant le fonctionnement des télécommunications.

Figure 148 : génération d'itinéraires.

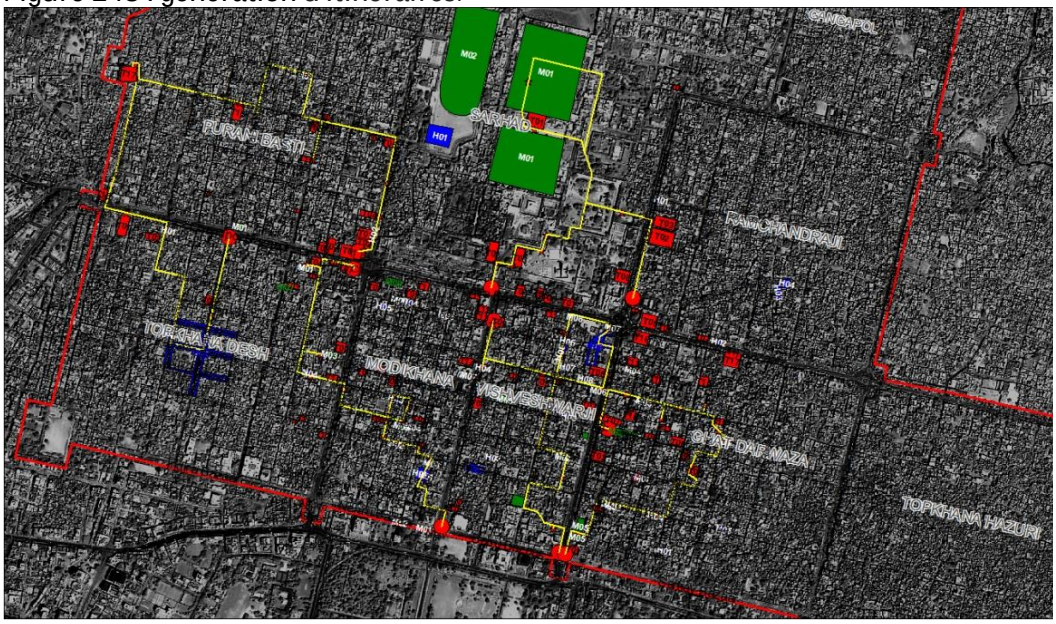
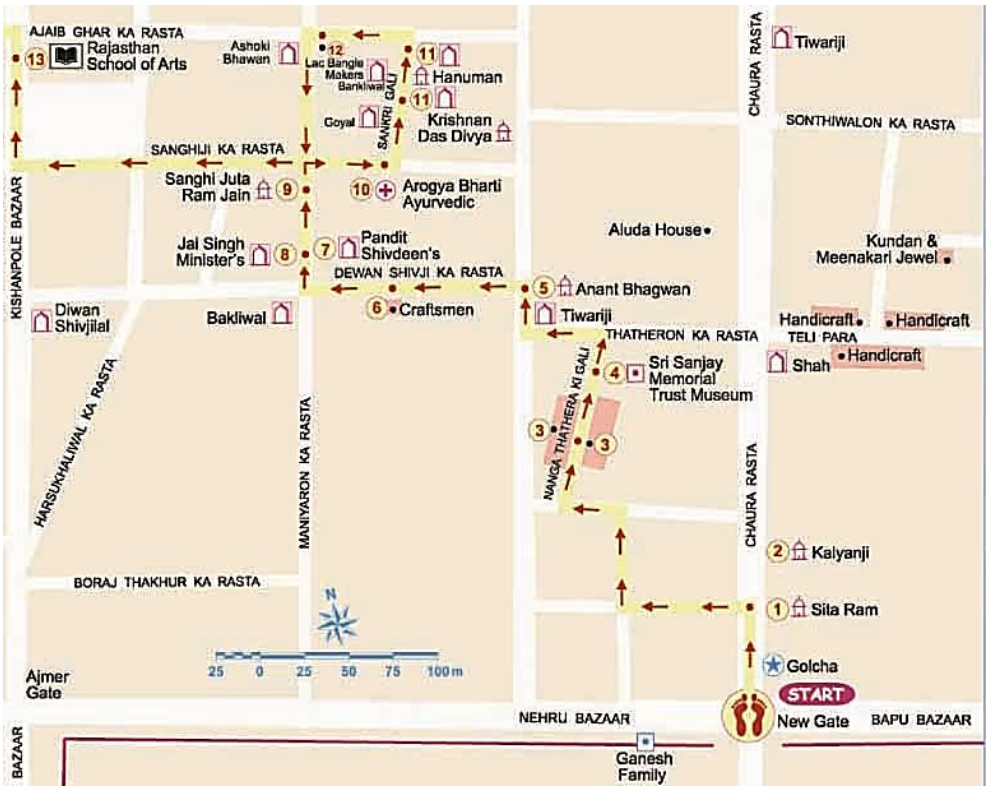


Image métrique panchromatique Kompsat-2, bâtiments remarquables (rouge, marron), zones artisanales (bleu), sites ouverts (vert) à visiter, itinéraires des visites (jaune) et limites du centre historique de Jaipur (rouge).

Figure 149 : extrait de carte d'itinéraire de visite produite à partir du SIG : parcours 1 « Face–to–Face ».



Vecteur de communication et de géo–markéting, le SIG est un outil de sensibilisation et d'éducation. A Jaipur, la politique de sensibilisation s'inscrit dans un processus de réappropriation du patrimoine culturel dans lequel le SIG est un élément contribuant à la prise de conscience de la valeur de l'héritage historique et architectural. De ce fait il est employé pour attirer l'attention des populations, des touristes et des politiques sur la vulnérabilité du patrimoine et la nécessité de le préserver, de le restaurer et de le valoriser. Les initiatives engagées pour la préservation de la vieille ville induisent également un effet de levier dans lequel le SIG est utilisé comme support informationnel et d'aide à la décision.

La création du SIG patrimoine a permis d'attirer l'attention sur la nécessité de mettre en place un programme de préservation des différentes facettes sociogéographiques du patrimoine historique et culturel de Jaipur. Le SIG est un support au processus de « conscientisation » et de réappropriation de la population locale de son patrimoine architectural, culturel, historique.

Les connaissances géoculturelles issues du SIG peuvent être utilisées pour l'aménagement urbain et touristique : gestion des flux, parcours balisés comme cela a été développé. La gestion et la canalisation des flux et parcours touristiques posent une question croissante en aménagement touristique urbain, notamment dans la vieille ville de Jaipur. Les ruelles sont étroites, la densité de population importante. Elles participent également à une politique de sécurisation croissante des lieux touristiques. Si elle a été prise en compte dans la création et le balisage des itinéraires, cette préoccupation est encore absente dans la planification et le développement territorialisé du tourisme, en particulier au Rajasthan. C'est la logique de massification des flux touristiques qui est recherchée. Le SIG du patrimoine apparaît comme support de communication pour le développement du tourisme et un outil techno–informationnel de sensibilisation au patrimoine urbain.

L'intégration de la 3D renforce la géo–visualisation des itinéraires et la découverte de l'environnement géographique urbain. Il donne aux architectes en charge de la rénovation des bâtiments remarquables la capacité de géo–visualiser leur niveau de conservation ou de dégradation (Campagna et al., 2000). L'intégration de supports interactifs de géo–localisation et de géo–visualisation (géo–visualisation 3D des bâtiments et des lieux remarquables), est handicapée par les investissements et le maintien en condition opérationnelle du SIG sur le moyen terme, choses encore difficiles pour les structures locales de protection et de valorisation du patrimoine.

La mise sur l'Internet du SIG touristique et de valorisation du patrimoine culturel offre à travers la notion de SIG participatif de partager, enrichir les bases de données géographiques et touristiques (Campagna, 2002). Il est un support géo–informationnel et socioculturel à de nouvelles formes de voyages comme le

woofing et le *couchsurfing*. C'est un vecteur de valorisation du tourisme « responsable ».

LE SIG, UN OBJET TECHNO–INFORMATIONNEL DE LA METROPOLISATION

Le SIG comme entité techno–informationnelle participant à la construction des territoires métropolisés, des territoires de la techno–métropolisation est indissociable des technologies de télécommunications et de leurs supports mobiles. Supports qui tendent à s'individualiser et à s'hybrider à l'homme.

Une partie de son développement depuis le milieu des années 1990 est passée par son intégration dans les TIC comme composante géo–spatiale et cartographique des systèmes d'information et de télécommunication.

Il s'est enrichi dans le même temps des outils, méthodes multimédias. Le SIG, au travers d'une cartographie interactive, fournit autant de vues géographiques synthétiques que détaillées, thématiques ou générales et permet à la fois de préparer, gérer et vivre son voyage ou son déplacement de manière multidimensionnelle. La logique d'efficacité et la simplicité d'utilisation qui prévalent dans l'intégration de la géographie et de la géo–localisation sur des supports informationnels mobiles individuels et individualisables, repositionnent un certain nombre de problématiques en géomatique et en sciences de l'information géographique :

- ✓ Le développement et l'accès à l'information géographique thématisée, sa fiabilité, sa capacité à être représentée sémiologiquement et graphiquement à différentes échelles, son interopérabilité, la capacité de les combiner, etc.
- ✓ Elle nécessite de travailler en amont sur les questions de représentation et de figuration sémantique, c'est-à-dire, sur les informations à afficher la sémantique et la sémiologie graphique pour les touristes sur de petits écrans.

Si les progrès dans la diffusion, l'individualisation et l'utilisation de la géomatique et de l'information géographique dans le quotidien de la population et des individus sont conséquents, le problème fondamental reste celui de la qualité, de la pertinence et de la disponibilité des données géographiques utilisées. La multiplication, l'individualisation des besoins en informations et en connaissances géographiques induisent des tensions sur leur disponibilité, leur adéquation et sur la capacité à en produire malgré la multiplication et la spécialisation des capteurs de télédétection et systèmes de mesure, la normalisation, la production et la mise à disposition des bases de données géographiques et géo–localisées.

Le problème fondamental reste toujours celui de la capacité à produire une information géographique pertinente. Information géographique qui va de pair

avec des besoins de plus en plus importants en connaissance géographique. L'enjeu est tout autant d'avoir la capacité à produire de l'information que de la connaissance géographique, de l'intégrer dans les systèmes d'informations géographiques et de la traiter. Traitements dont l'un des enjeux va être la capacité à automatiser la production de connaissances géographiques : passer de traitements géographiques de niveau « bas » à des traitements dits de niveau « haut ».

3.4. URBANISATIONS LITTORALES EN AFRIQUE DE L'OUEST : QUELLES PREMICES A UN PROCESSUS DE METROPOLISATION ?

3.4.1. DYNAMIQUES REGIONALES D'URBANISATION LITTORALE

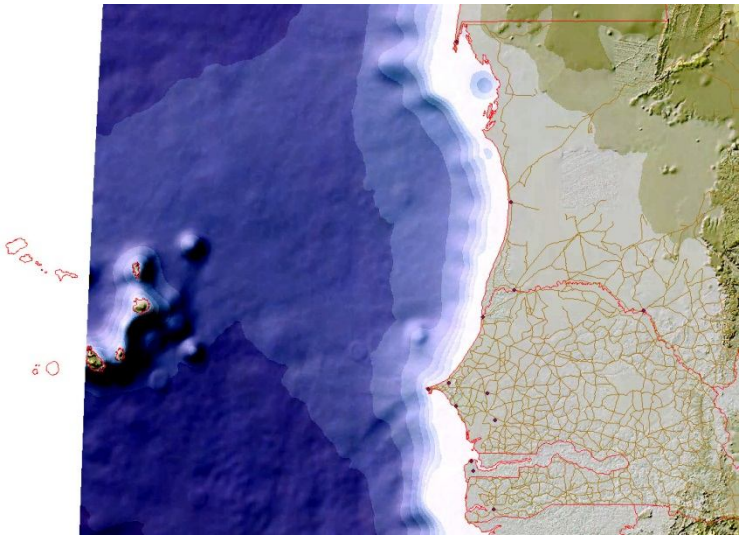
ENJEUX

Les processus de métropolisation et d'urbanisation sont un des éléments constitutifs majeur des problématiques de développement et de gestion des ressources littorales. Les territoires urbanisés , métropolisés ou mégapolisés littoraux, résultant des processus de transformations socio-économiques et culturelles des sociétés concentrent la quasi–totalité des problèmes environnementaux, sociaux, humains et politiques sur un espace fragile, complexe, souvent dégradé et fortement sollicité.

Ces territoires constituent de plus en plus les lieux de vie de 40% de la population urbaine du Sénégal, de la Mauritanie et de 61% du Cap–Vert. Ce sont les lieux du développement économique et les centres politiques de décision, tout comme les espaces d'interface avec les autres territoires de la globalisation.

La question qui se pose sur la portion des 1300 Km du littoral Ouest–Africain mauritanien, sénégalais et cap–verdien, étudiée avec des taux de croissance urbaine littorale annuelle de 3% à 5% selon les localités, est de savoir si l'émergence de territoires urbains littoraux du sous–développement préfigure l'entrée ou non dans la métropolisation.

Figure 150 : extrait du SGIMT sur l'Afrique de l'ouest [MNT, MNB, bases de données routes (marron), BD frontières (rouge), BD villes (points)].



Le suivi systématisé de la mesure et de la modélisation des processus de littoralisation et de l'évaluation des risques consécutifs sur un milieu littoral par essence complexe, constitue un enjeu géographique du développement.

Les processus d'urbanisation en Afrique de l'ouest posent plusieurs questions :

- ✓ Comment se traduisent-ils spatialement ? Existe-t-il des modèles d'urbanisation ou des prémices d'une métropolisation spécifique qui diffèrent de ceux que l'on peut observer dans le Monde, comme en Inde ou les Pays baltes ?
- ✓ Ces nouveaux territoires issus de l'exode rural et de l'accroissement de la population engendrent-ils de mêmes formes de territorialité ? Sont-ils animés d'une même quintessence ?
- ✓ Quels sont les risques et les enjeux politiques, environnementaux, humains et sociétaux de la littoralisation ?

Ces enjeux sont analysés à trois niveaux géographiques :

- ✓ Au niveau subcontinental.
  Comment les régions littorales urbanisées en développement s'intègrent-elles dans l'espace africain et mondial ?
- ✓ Au niveau régional.
  Comment s'organisent et se structurent les territoires en mutation, quelles sont les tendances qu'il est possible de dégager ?
- ✓ Au niveau local.
  C'est-à-dire, à l'échelle du référentiel habitat–habitant, quels sont les risques sur les populations ?

EXODE RURAL, URBANISATION « ENDOGENE » ET LITTORALISATION

L'Afrique de l'ouest est l'une des régions du Monde la moins urbanisée. Bien que réelle, cette situation est actuellement en train de s'inverser. En effet, depuis une dizaine d'années, les rythmes d'urbanisation sont importants avec un taux de croissance annuel moyen de 3 %.

Ces processus d'urbanisation se concentrent, pour l'essentiel, sur la zone côtière donnant naissance à l'échelle régionale à une urbanisation aréolaire et discontinue autour de pôles urbains comme Dakar, Saint-Louis, Praia ou Nouakchott. Elle se traduit à l'échelle régionale et méso–urbaine par deux formes spatiales majeures d'urbanisation : polarisée à l'instar de Dakar, Nouakchott, Praia et « littoralisée » comme la petite côte au Sénégal (Mbour–Sally).

L'urbanisation littorale est un des éléments moteurs des mutations des structures territoriales, spatiales et de l'environnement littoral. Il est essentiellement mû par l'accumulation des populations rurales sur la côte issues dans les années 1980, 1990 de l'exode rural et de l'apparition dans les années 2000 d'une forme d'urbanité associée à une croissance démographique endogène. L'arrivée massive de la population des campagnes marque l'échec des politiques de développement mises en place par les Organisations non gouvernementales (ONG). Ces politiques avaient pour objectifs de fixer territorialement les populations rurales par des politiques volontaristes de développement et de soutien à l'agriculture et d'empêcher la migration des ruraux vers les villes et agglomérations littorales.

Aux processus de littoralisation, moteurs dans une large mesure de l'étalement urbain, se surimposent sur certains territoires urbains littoraux d'Afrique de l'ouest comme Dakar, Mbour–Sally ou encore Praia (îles de Santiago et de Sal) des phénomènes de mondialisation qui sont, pour l'essentiel, la conséquence des mobilités liées à l'émigration et au tourisme. Ce sont les lieux où l'on observe les taux de croissance urbaine les plus importants avec l'émergence de territoires urbains « littoralisés ». L'intégration de ces territoires urbains littoraux dans le réseau des territoires globalisés en fait-elle des territoires en métropolisation ? Si métropolisation, mondialisation et globalisation (l'inscription territoriale d'un lieu dans la mondialisation) sont interdépendants et qu'il n'y a pas de métropolisation sans mondialisation et globalisation sans métropolisation, ce territoire urbain littoral en développement amène comme dans les Pays baltes en Lituanie et en Inde à « revisiter » le concept de métropolisation :

- ✓ Structure métropolisée planifiée et construite sur des critères géo–économiques et idéologiques, vide ou presque de population dans les Pays baltes.

- ✓ Intégration territoriale de territoires métropolisés et urbains ayant des niveaux de développement et d'intégration à l'espace Monde différenciés, portée par l'intensité du développement économique, l'émergence d'une classe moyenne de dizaines de millions d'indiens et le poids démographique.
- ✓ Emergence de territoires urbains littoraux millionnaires, dont certains sont entrés dans la boucle de la mondialisation des mobilités de l'émigration et du tourisme, sur des espaces marqués par le sous–développement. L'indice de développement humain place le Sénégal au 144e rang, la Mauritanie au 136e rang et le Cap–Vert en 120e position (UNDP, 2011).

Les processus émergents de métropolisation sont essentiellement des mécanismes endogènes, globalisés, de transformation des espaces urbains en territoires métastasiques, aréolaires et interconnectés. Ils traduisent un nouveau rapport de la société au territoire à trois niveaux : le local, la région urbaine (mégapolisée ou métropolisée) et l'espace mondial à travers les interconnexions et les interdépendances avec les autres lieux urbains globalisés, qui sont, pour l'essentiel, les territoires métropolisés.

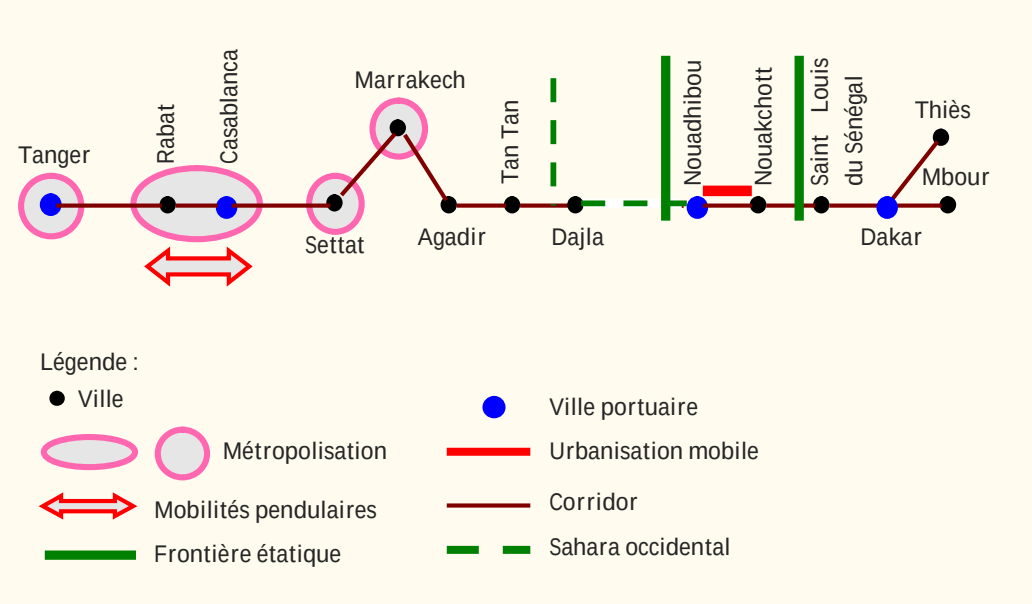
IMPACTS DU CORRIDOR EURAFRIQUE MADRID–TANGER–DAKAR

La construction d'un axe routier interrégional reliant Dakar à la structure aéroportuaire globalisée de Tanger construite au début des années 2000 réactive tout autant l'aire d'influence économique passée du Maroc que les échanges. Construit entre 2002 et fin 2004, ce corridor de transport longeant les 3000 km de côtes séparant Tanger de Dakar était appelé à devenir également un corridor de développement économique et d'intégration interrégionale. Si ce corridor de transport, appelé aujourd'hui l'axe Eurafrique avec l'intégration de la portion Madrid–Tanger, a permis la multiplication économique des échanges Nord–Sud, il est difficile de mesurer son impact sur les structures territoriales. Il aurait accéléré le déclin économique de Nouadhibou (Choplin, Lombard, 2008).

Les effets des frontières sont importants, notamment avec la frontière marocaine. Nouadhibou, ville frontière, ancien poumon économique de la Mauritanie connaît depuis les années 1990 un déclin économique relativement important (minerais, pêche) qui se joue au profit de la capitale Nouakchott. Elle tend à accueillir un nombre croissant d'habitants de Nouadhibou, notamment les populations non originaires de Nouadhibou (Choplin, Lombard, 2008). Déclin qui a été accentué par la construction du corridor routier transsaharien reliant la ville à la capitale 470 Km plus au Sud. L'absence de liaison routière efficiente avant 2005 faisait de la ville un point de passage obligé qui est aujourd'hui marginalisé par la mise en interconnexion de la route transsaharienne interrégionale liant le Maroc à la Mauritanie. La ville n'est plus le lieu d'arrêt ou de passage obligé. Elle reste le

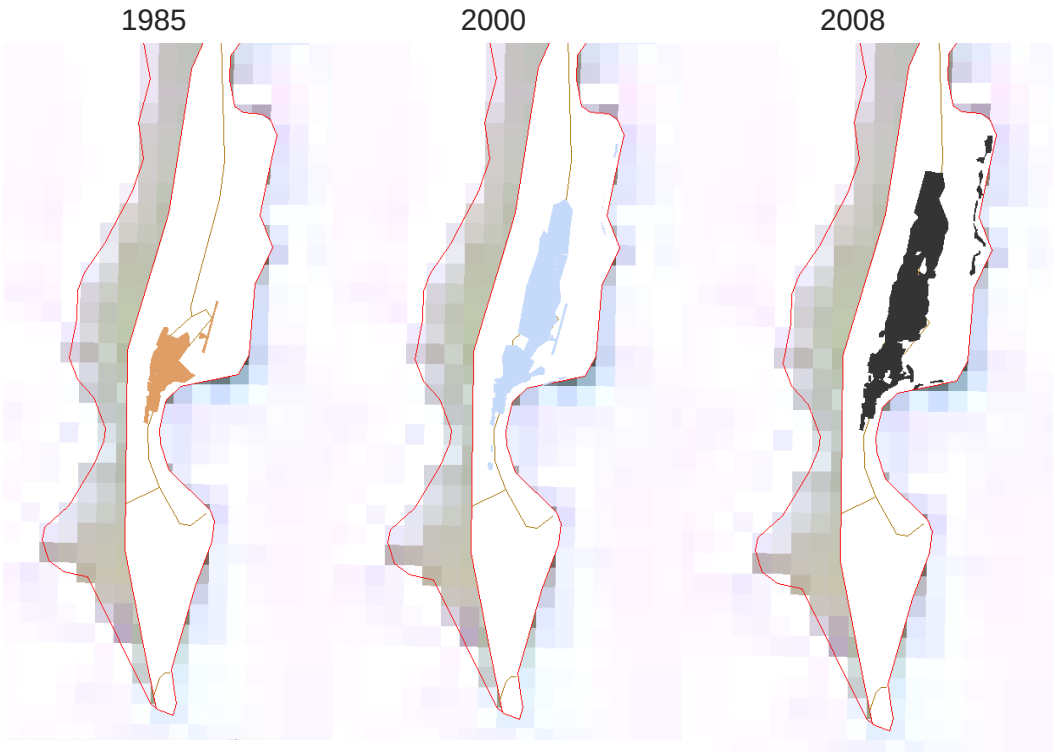
réceptacle, le point de non passage de l'émigration clandestine de l'Afrique de l'ouest à destination de l'Europe.

Figure 151 : corridor Tanger–Dakar.



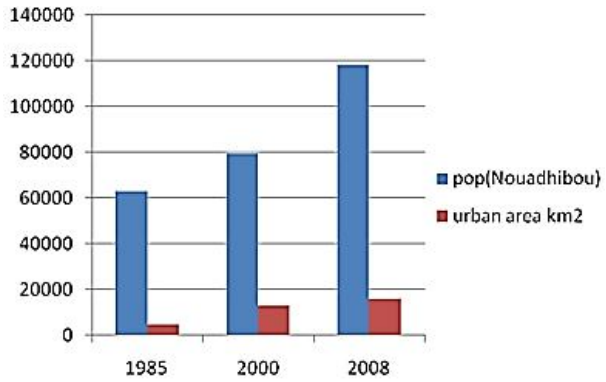
Néanmoins cette situation de déclin décrite par certains géographes n'est pas observable par télédétection. On observe au contraire un processus de croissance urbaine marquée entre 1985 et 2008. La majeure partie de la croissance urbaine de la ville s'est faite entre 1985 et 2000, celle-ci triplant sa surface. Entre 2000 et 2008 on observe, en sus de l'extension de la ville vers le Nord, un processus de périurbanisation diffus sur la frange côtière. En 2005, un certain nombre de maisons en bord de plage pouvaient être observées sur les images à haute résolution spatiale.

Figure 152 : croissance urbaine de Nouadhibou (1985–2008).



Légende : MNT (niveaux de gris), frontière (rouge), route (marron), limite administrative de Nouadhibou (blanc).

Figure 153 : croissance urbaine, croissance de la population (1985–2008).



Source : Outtara A., Gadal S., Martensson U., 2011, GIS Centrum, Université de Lund, Suède.

L'exode rural durant les années 1980–1990, les flux migratoires, le tourisme et l'intégration régionale sont ici les vecteurs déterminants du développement urbain ouest–africain. Ce seront les lieux moteurs du développement, les lieux de vie de 40% de la population ouest–africaine en 2010, des lieux de relais d'une mondialisation sectorisée au tourisme et aux migrations.

La mise en interdépendance des territoires par les infrastructures de communication comme l'axe « Eurafrica » et de télécommunication sont un élément contribuant au développement économique et à l'émergence d'espaces urbains pouvant s'apparenter à des prémices de phénomènes émergents de

métropolisation. L'apparition de territoires interconnectés et interdépendants en phase de métropolisation traduit les échanges, les innovations, la concentration des richesses, de l'économie et des pouvoirs tout autant que les « réceptacles » de la pauvreté, des tensions, des conflits, des problèmes sanitaires et environnementaux, en somme les lieux du sous et du mal développement. Les territoires urbanisés ouest–africains, pour certains partiellement mondialisés, constituent un enjeu central et majeur du développement humain, social et politique pour le développement de la sous–région.

3.4.2. DEMARCHE ET MODELISATION SPATIALE

DONNEES SPATIALES MOBILISEES

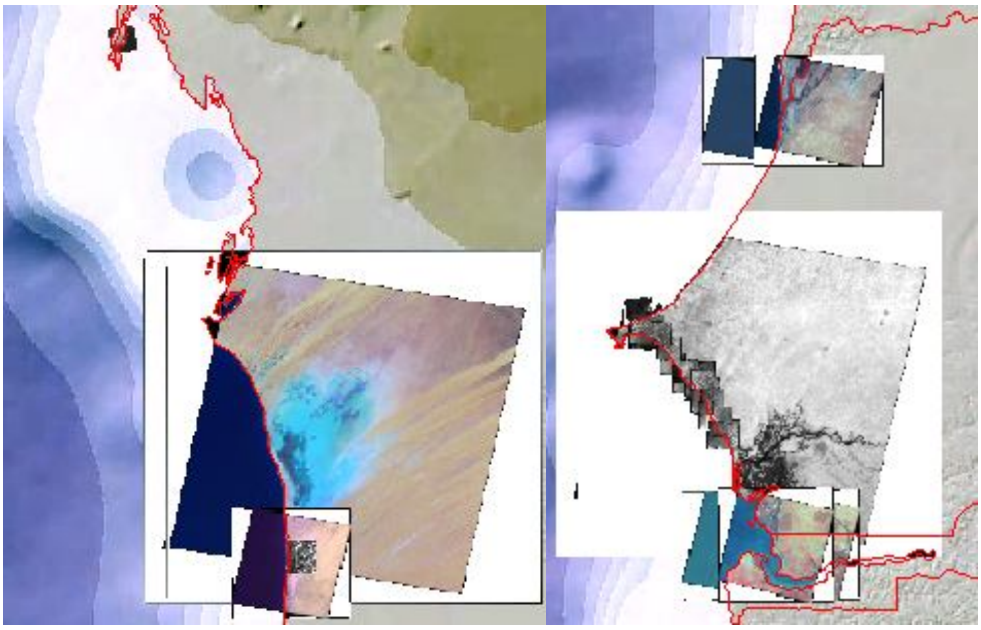
L'analyse des processus de littoralisation sur 1300 Km par l'entrée spatiale est d'autant plus nécessaire : étendue de la zone d'étude, multiplicité, rapidité des dynamiques d'urbanisation, interaction avec d'autres processus économiques, sociaux, environnementaux, politiques, absence ou obsolescence de données géographiques, environnementales et socio–économiques. Une partie du travail a consisté à mettre en place un SGIMT pour suivre les évolutions du littoral ouest–africain sur le modèle des SGIMT baltes et indiens sur les vingt dernières années.

L'étude s'appuie, comme pour les Pays baltes et l'Inde, sur une série d'images Kompsat-2 (2007), Landsat-5 TM et 7 ETM+ (1985-2009), Spot 3, 4 et 5 (1993-2006), DMSP OLS (2002), des images MSG 14 (2004-2007) et des jeux de photographies aériennes panchromatiques de l'IGN (1954-1978). Plusieurs missions de terrain ont été effectuées en 2006 et 2007. Plusieurs bases de données mises à disposition par la NASA, le NGA et l'USGS ont été également utilisées : bases de données routes, hydrographie, densité de la population, spatio–cartes d'occupation des sols, MNT, MNB, etc.

Figure 154 : extrait des données géographiques, aériennes et spatiales utilisées à partir du SGIMT.

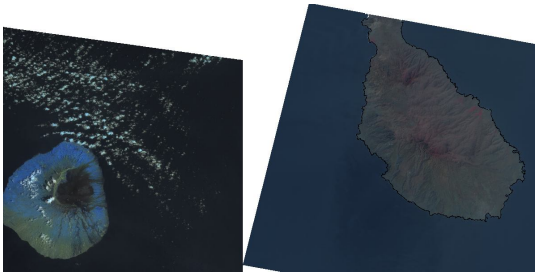
Compositions colorées Kompsat-2, Landsat-5/7, SRTM2, MND, BD frontières (Mauritanie)

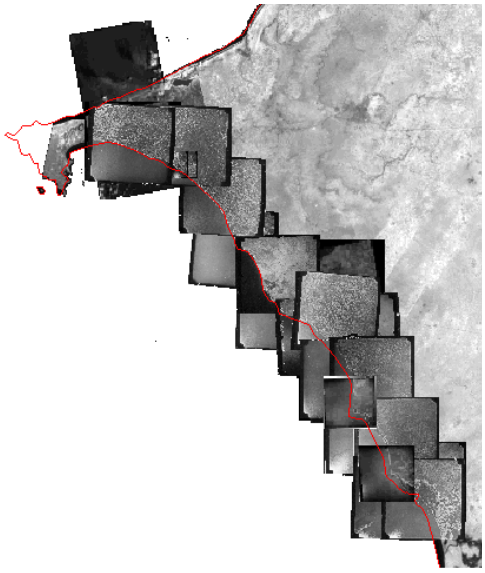
Compositions colorées Kompsat-2, Landsat-5/7, Spot-3, 4, 5, photographies aériennes, SRTM2, MND, BD frontières (Sénégal)



Extrait de compositions colorées Spot 3 XS (1994 droite) et Landsat-7 ETM+ (1999 à gauche) (Cap-Vert)

Extrait du SGIMT, photographies IGN scannées (1954-1978), Dakar, Petite Côte, Sénégal



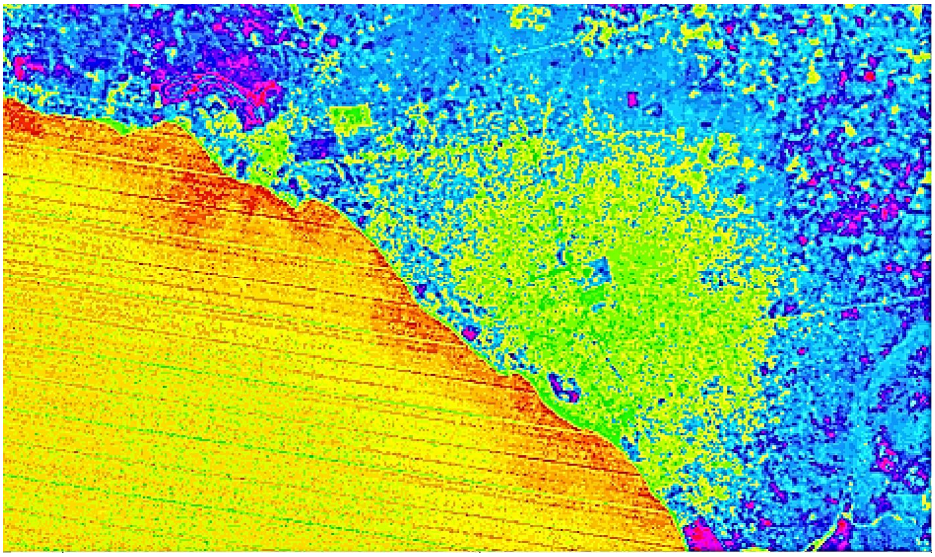


L'utilisation systématisée des images MétéoSat Seconde Génération pour le suivi de l'urbanisation est difficile dans le sens où les tests effectués montrent un manque de stabilité des résultats dans la détection et la reconnaissance des centres urbains (cf. partie 2). Une meilleure résolution spatiale améliorerait-elle la détection des villes à partir des images MSG ? Meilleure résolution qui pourrait être obtenue par un ré–échantillonnage des images par fusion avec l'image panchromatique de MSG.

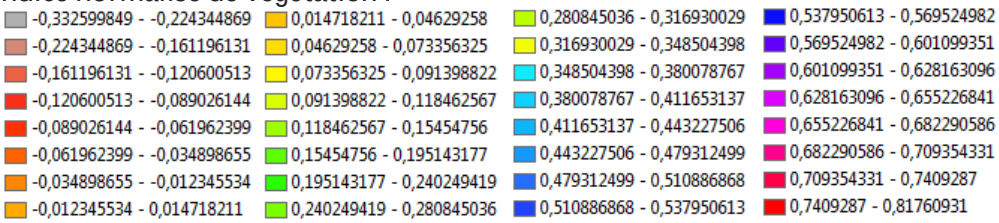
Une méthodologie de reconnaissance des centres urbains a été développée à partir des images Landsat-5 TM / 7 ETM+ sur Mbour–Sally au Sénégal. Elle consiste par le calcul de l'indice de végétation normalisé (ou *Normalized Difference Vegetation Index -NDVI*) de reconnaître les lieux urbains en « jouant » sur l'absence ou le faible niveau de végétalisation des villes.

Les centres urbains apparaissent dans les NDVI avec des valeurs comprises entre 0,10-0,30 sur la zone test de Mbour avec les images Landsat-5 TM / Landsat-7 ETM+. Cette démarche s'apparente à celle expérimentée en 2003 sur Bonn (Braun, Martin, 2003) sur Pékin (Weidong et al., 2005) ou Sioux (Thanapura et al. 2007). Le calcul du NDVI avec Landsat-5 TM / 7TEM+ est ce qu'il y a de plus classique : (bande 4 – bande 3) / (bande 4 + bande 3). La végétation réfléchit entre 0,7 et 0,9 µm et peu entre 0,6 et 0,7 µm en raison de l'absorption par la chlorophylle. La robustesse (niveau de reproductibilité) de cette méthode n'a pas encore été faite et testée avec d'autres données satellites ou aéroportées. Elle n'a donc pas été présentée dans la partie méthodologie.

Figure 155 : reconnaissance de Mbour par le calcul du NDVI (Landsat-7 ETM+, 2009).



Indice normalisé de végétation :



MODELISATION SPATIALE DE L'URBANISATION LITTORALE

UNE URBANISATION SOUTENUE

Les mesures montrent que depuis une dizaine d'années les rythmes d'urbanisation sont importants avec un taux de croissance annuel moyen de 3%. Chiffres qui sont confirmés par les estimations de croissance urbaine de l'UNDP ou de l'Agence nationale de la statistique et de la démographie (ANDP) au Sénégal : 2,9% en Mauritanie, 3,3% au Sénégal.

Ces dynamiques d'urbanisation se concentrent, pour l'essentiel, sur la zone côtière et littorale. Elles sont caractérisées par des formes d'urbanisation qui sont fortement différenciées à l'échelle locale : littoralisation de la région de Mbour–Sally, mégapolisation de Dakar avec ses 2,5 millions d'habitants, formes de pré urbanisation « mobile » entre Nouadhibou et Nouakchott, etc.

Il en découle, à l'échelle régionale, une structure urbaine littorale aréolaire et discontinue conséquente des mutations territoriales, sociales et géographiques en cours, qui sont liées en bonne partie à l'exode rural.

L'urbanisation des années 2000 découle également d'une croissance démographique urbaine endogène avec l'émergence d'une nouvelle forme d'urbanité et de territorialité. Le taux d'urbanisation s'établit en 2010 à 52% de la population totale d'un pays de 3 millions d'habitant en Mauritanie, à 59,6% au Cap-Vert, à 56,44% en Gambie et à 47% au Sénégal.

La population urbaine du Sénégal est évaluée à 5 millions d'habitants sur 12,6 millions de personnes, dont environ 2,6 millions vivent à Dakar, 270000 à Thiès et 216000 à Mbour. Le pourcentage d'urbains a peu évolué durant les années 2000 (45%). Il a augmenté de 2% dans un contexte d'urbanisation moyenne annuelle estimée à 3,3% (ANSD, 2011). La croissance urbaine sur dix ans est relativement déconnectée du taux d'urbanisation annuel. C'est un processus qui est, depuis les années 2000, en partie endogène au regard des statistiques fournies. C'est-à-dire, une urbanisation qui est générée par l'accroissement de populations déjà urbanisées.

En Mauritanie, le taux d'urbanisation annuel est relativement important. Il est estimé à 2,9%. Les villes de Nouakchott (822000 habitants), Kiffa (84000),

Nouadhibou (83900) et Rosso (75000) accueillent 41% de la population totale du pays avec un taux d'urbanisation estimé à 52% (2010). Elle est marquée par la primatie démographique de la capitale.

En Gambie, Banjul accueille 888000 personnes, soit quasiment la totalité de la population urbaine du pays (56%) sur une population qui est estimée à 1800000 personnes (2007).

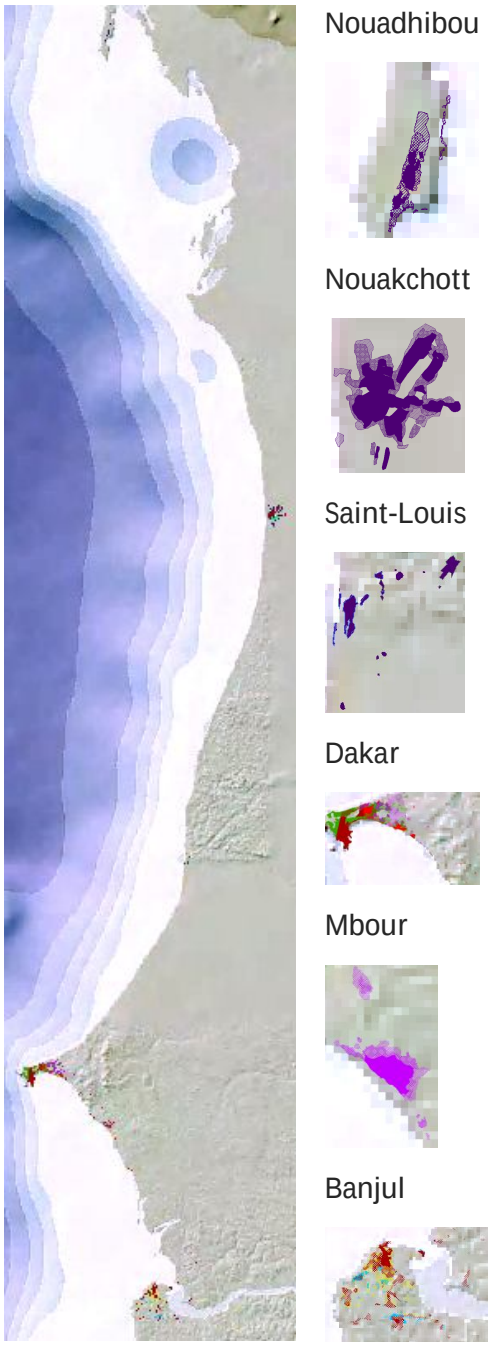
Si l'on se réfère aux processus d'urbanisation, puis de métropolisation en Europe, en Asie, etc., entre 40% et 53% de la population de ces pays vivent dans les campagnes. Le potentiel de croissance urbaine reste important dans un contexte régional de pays qui ont un poids démographique relativement faible, malgré une croissance annuelle importante (2,5% en Gambie et au Sénégal, 2,85% en Mauritanie, 1,4% au Cap-Vert). Seul le Sénégal dépasse les douze millions d'habitants en 2010.

VERS L'APPARITION D'UNE REGION URBAINE LITTORALE ?

Echelle régionale

A l'échelle régionale, le littoral est peu urbanisé. L'urbanisation est polarisée autour de quelques agglomérations : Dakar, Nouakchott, Mbour, Saint-Louis, Nouadhibou, Praia.

Figure 156 : structure urbaine en 2009 (Banjul : 2002).



Mauritanie : macro–polarisation de Nouakchott

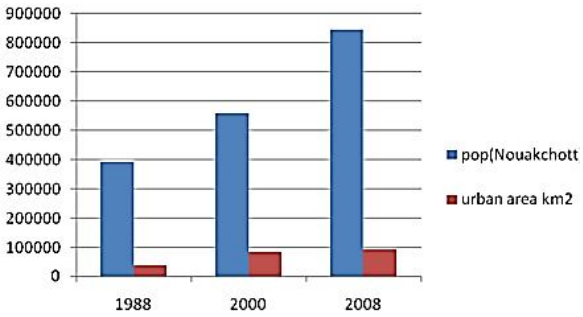
Entre 1988 et 2008, la surface de Nouakchott a progressé de 55 Km² (+148% sur 20 ans) avec un taux de croissance annuel estimé à 2,7 Km² ce qui correspond à une croissance d'environ 22600 habitants chaque année (+115% sur 20 ans). Deux périodes peuvent être dégagées : 1988-2000 et 2000-2008. Sur la première période il y a eu un accroissement de 46 Km² (soit 3,8 Km² par an) soit une

augmentation globale de 124%. Durant les années 2000 est observé un ralentissement de la croissance urbaine avec une augmentation de 11%.

Figure 157 : croissance de Nouakchott (1988-2008).

Depuis les années 2000 l'urbanisation tend vers une forme de « road urbanisation » Nord–Sud suivant la route transsaharienne « Dakar–Tanger », faisant office d'axe urbain structurant au même titre que l'ancienne voie venant de l'Est.

Figure 158 : croissance urbaine, croissance de la population.



Source : Outtara A., Gadal S., Martensson U., 2011, GIS Centrum, Université de Lund, Suède.

Sénégal : un développement littoral tricéphale

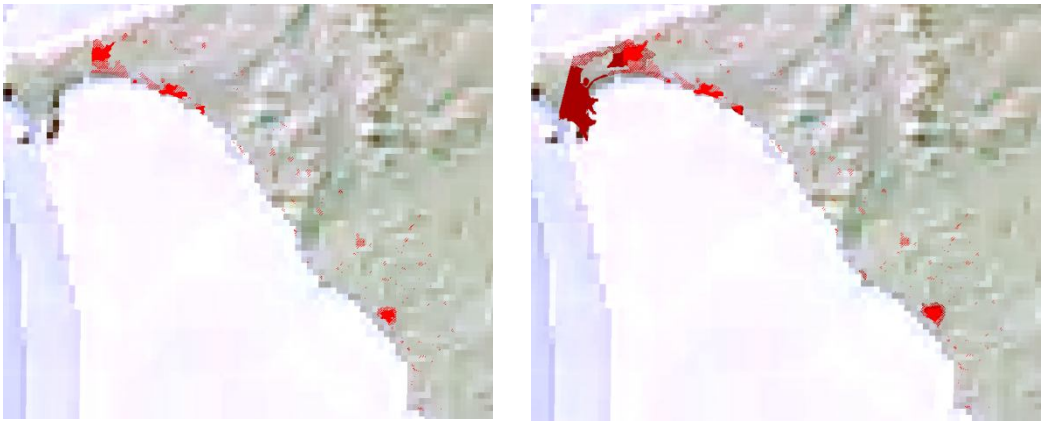
La croissance urbaine du Sénégal se concentre sur trois pôles urbains : Saint-Louis, Dakar et le long de la petite côte avec Mbour comme point focal de la croissance urbaine littorale.

Dakar, seul territoire urbain multimillionnaire, concentre la quasi–totalité des problématiques sociales, politiques, sanitaires et environnementales liées à une croissance urbaine continue assez mal encadrée qui s'entrecroise avec des processus de mondialisation (port, émigration, tourisme, interconnexion avec le Maroc, l'Europe, les Etats-Unis) et l'exode rural venant « grossir » la ville. La ville qui s'étend à l'Est en direction de Thiès pour donner naissance à un dipôle urbain et la petite côte, reliée aux Etats-Unis et à l'Europe, voit depuis le milieu des années 2000 son rôle se transformer avec le corridor « Eurafrique ».

Figure 159 : croissance urbaine littorale Dakar–Mbour (1954-2007).

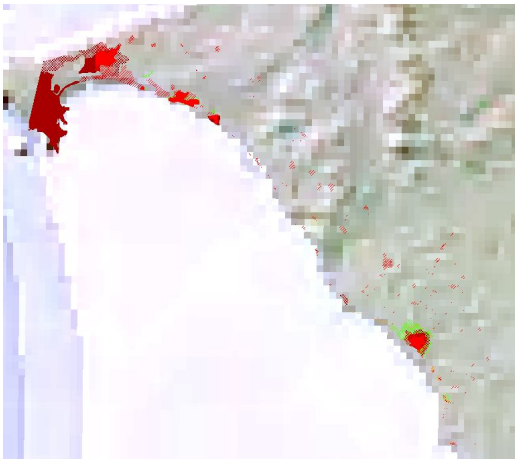
1978

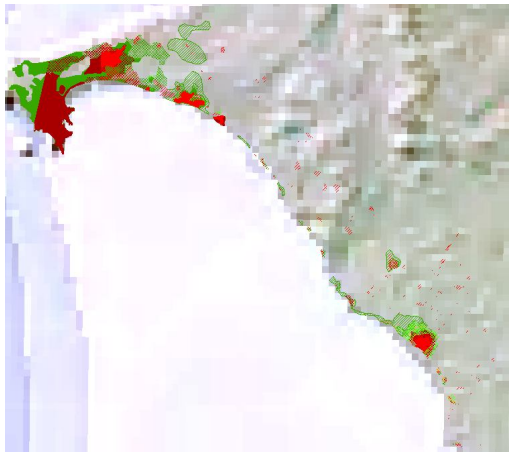
1988 (la coupure sur la partie ouest de Dakar correspond à la limite de la scène satellite)



1997 (les seules données disponibles sont sur Mbour) et au Sud de Dakar (croissance urbaine contigüe sur les deux territoires)

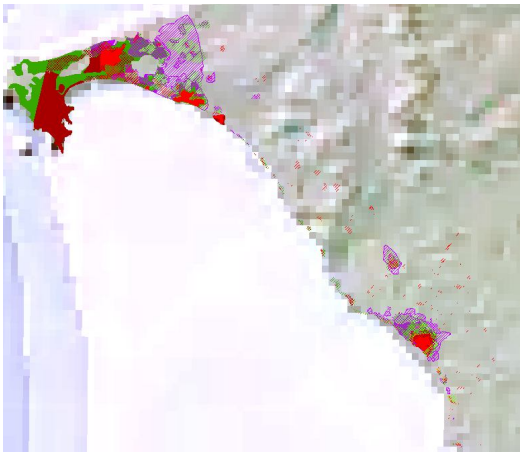
1999

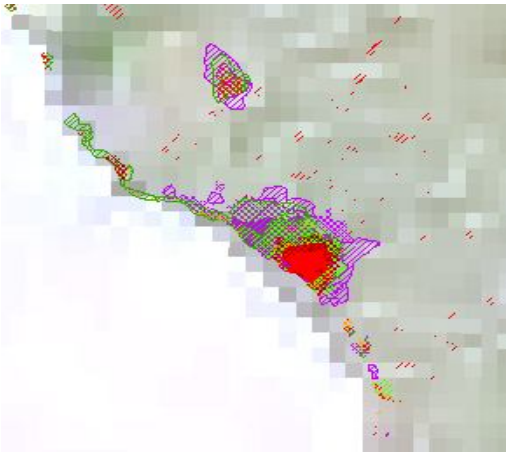




2007

Croissance urbaine de Mbour (1978-2007)



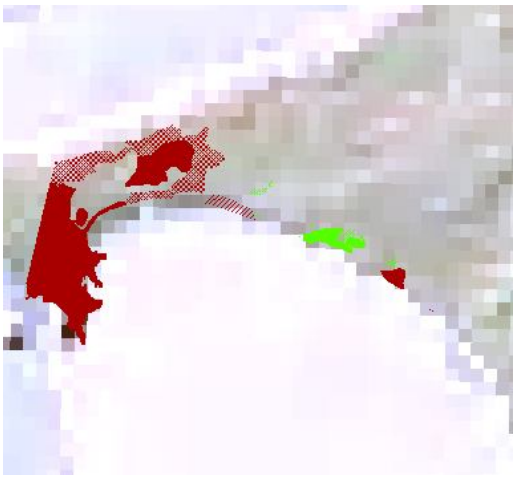


Le suivi diachronique de la croissance urbaine met en évidence deux périodes de forte croissance de l'urbanisation de Dakar et de Mbour : 1989-1997, 1999-2007.

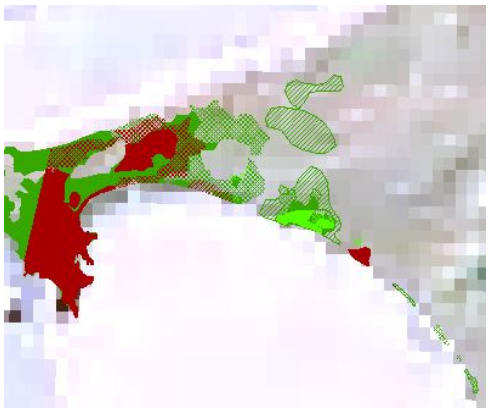
La visualisation de l'urbanisation entre 1997 et 1999 montre une « explosion » de l'urbanisation (effet de seuil), urbanisation essentiellement diffuse, peu dense en l'espace de deux ans. Seuil qui va entraîner un changement de la configuration spatiale de deux villes, c'est-à-dire, une rupture territoriale qui dans les années 2000 va s'amplifier.

Figure 160 : identification d'un seuil d'urbanisation.

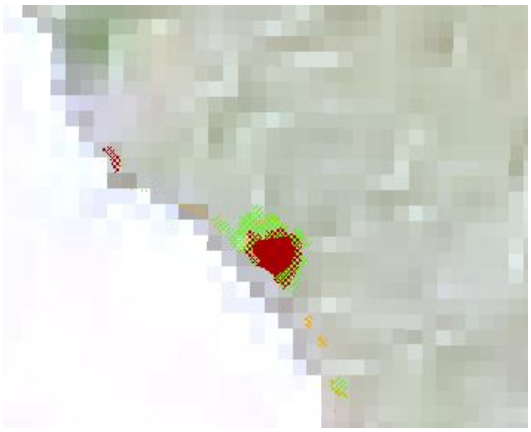
1997 (Dakar)



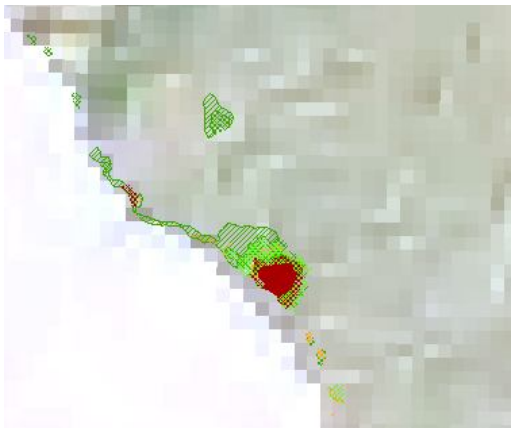
1999 (Dakar)



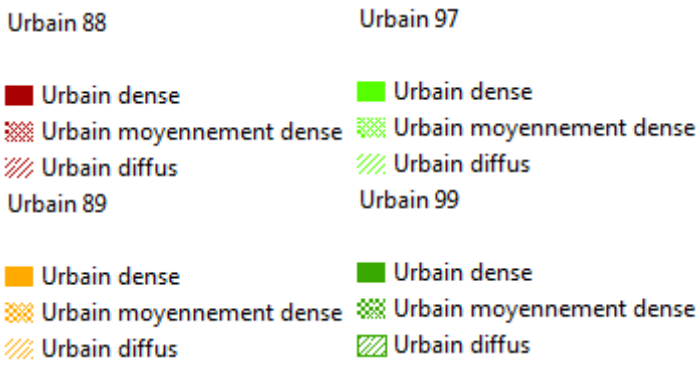
1997 (Mbour)



1999 (Mbour)



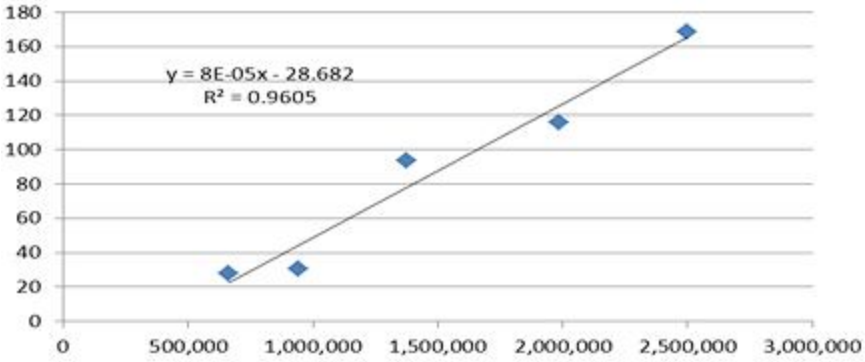
Légende :



Les calculs effectués à partir des analyses diachroniques montrent que Dakar a augmenté en superficie de 291% entre 1978 et 1999.

Figure 161 : concomitance entre croissance urbaine et croissance démographique.

(Régression linéaire).



Sources : Source : Outtara, A., Gadal, S., Martensson, U., 2011, GIS Centrum, Université de Lund, Suède.

En 1978, Mbour se caractérisait par quelques constructions de pêcheurs le long du littoral. L'augmentation de 108% de sa population s'est traduite par une extension spatiale de 56%, pour connaître durant les années 1990 un doublement de sa population et de la surface urbaine couverte. La croissance urbaine, comme sur Jaipur en Inde, induit une régression marquée des espaces agricoles, la périurbanisation touchant directement les cultures et les plantations.

A la fin des années 1990, la croissance urbaine de Mbour s'étend au littoral en direction de Sally et de Nguékhokh le long de l'axe routier menant à Dakar avec l'émergence de centres urbains secondaires discontinus et aréolaires formant un arc semi–circulaire autour de l'agglomération. Ce processus va se poursuivre dans les années 2000 avec une croissance urbaine soutenue qui va s'appuyer sur ces pôles urbains relais.

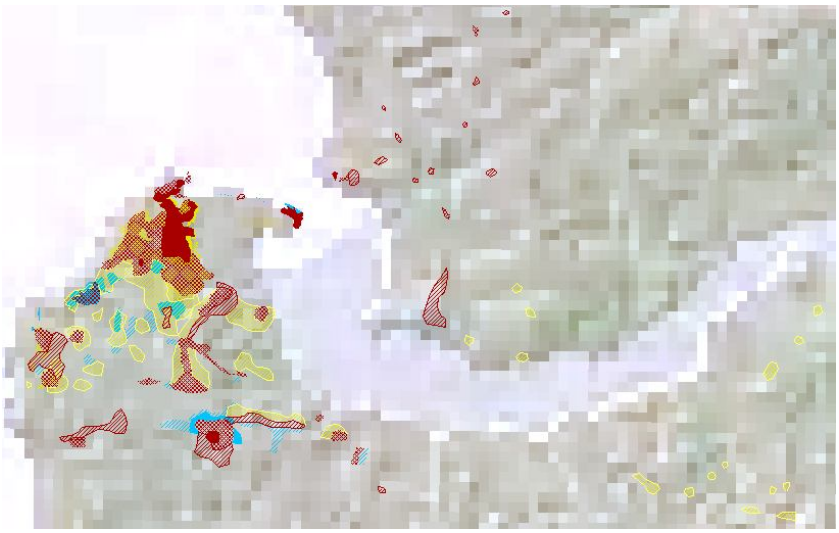
Que ce soit en Mauritanie ou au Sénégal, c'est un même modèle d'urbanisation littorale qui s'est mis en place durant les années 1980, 1990 et 2000. Un modèle d'urbanisation qui est porté par trois facteurs : la croissance démographique, l'exode rural dans les années 1980 et 1990, l'émergence d'une urbanisation « endogène » dans les années 2000.

L'insertion dans la mondialisation se fait par l'émigration et les liens avec la famille émigrée et depuis les années 1990 et 2000 par l'apparition du tourisme balnéaire (Mbour) qui va provoquer une urbanisation marquée du littoral.

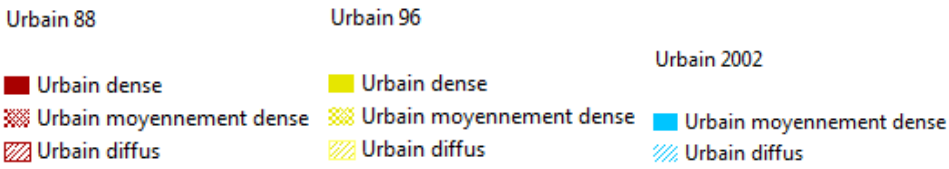
Banjul (Gambie) : périurbanisation et émergence d'une région urbaine

On observe à Banjul en Gambie un processus d'urbanisation de même intensité qu'au Sénégal ou en Mauritanie qui est porté par la croissance démographique. Il se distingue des formes sénégalaises, mauritaniennes et Cap-Verdiennes d'urbanisation par une périurbanisation aréolaire et discontinue distante de Banjul.

Figure 162 : croissance urbaine de Banjul (1998-2002).



Légende :



En 1988, Banjul se caractérise par un étalement urbain diffus, aréolaires importants avec les centres urbains secondaires rayonnant autour de la ville, formant de fait une région urbaine. La période 1988-1996 a connu, à l'instar de Dakar, Nouakchott, Mbour, une croissance urbaine exponentielle qui a été portée par la croissance démographique. Elle se caractérise principalement par une urbanisation peu dense et l'émergence de centres urbains le long de l'axe routier Banjul–Soma. Entre la fin des années 1990 et 2002, même si les dynamiques d'urbanisation et de périurbanisation restent importantes, leur intensité par rapport aux années 1988-1996 est moindre.

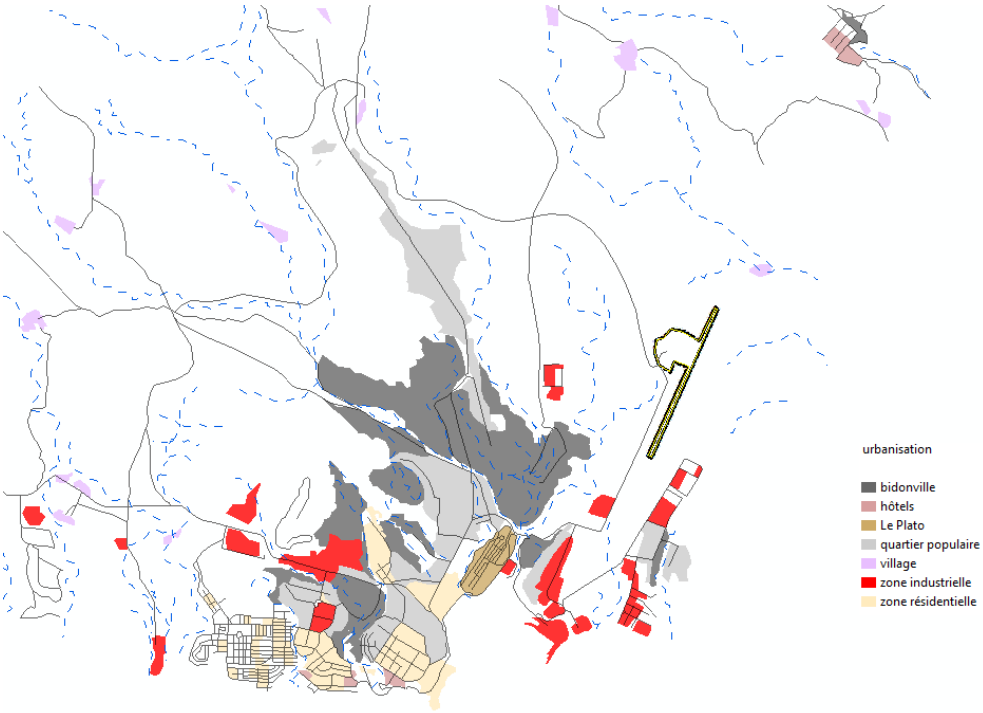
Cap–Vert : littoralisation touristique et polarisation urbaine

La ville de Praia regroupe sur un espace relativement restreint un certain nombre d'enjeux environnementaux, sécuritaires, sociaux et d'aménagements interdépendants tournant autour de la problématique de la fragmentation socio–spatiale générée par la pauvreté. 37 % de la population de Praia vit avec moins de 3 dollars US par jour. Ce processus de ségrégation socio–spatiale tend à s'accentuer avec l'arrivée des touristes, l'exode rural, le retour d'un certain nombre d'émigrés Cap–verdiens et les projets de construction de quartiers fermés pour retraités européens à la périphérie de Praia. La multiplicité des problèmes sécuritaires, humains et environnementaux pose un certain nombre de questions en termes d'aménagement (infrastructures de transports, assainissement, collecte des déchets, etc.), de gouvernance urbaine, de mobilisation des ressources (eau, électricité, etc.) et de gestion des risques (sécuritaires, pollution, inondation des zones construites sur les lits du fleuve, etc.).

Le développement du tourisme, la croissance urbaine (hôtels, résidences front de mer, etc.) conjuguent plusieurs enjeux environnementaux et urbains à l'instar, par exemple, du projet avorté de cent millions de dollars de construction d'un complexe de loisirs sur l'île de Santa Maria, réserve naturelle, située face à la ville de Praia.

La croissance urbaine de l'archipel du Cap–Vert est portée par deux dynamiques : celle de Praia sur l'île de Santiago et par le tourisme balnéaire. L'extension spatiale de la capitale, Praia, est liée à son dynamisme démographique, avec en 2011, 132000 habitants sur une population qui compte sur l'archipel un demi-million d'habitants. Durant la deuxième moitié des années 2000, l'intensité de la croissance urbaine va transformer le visage de Praia avec la construction de nombreux quartiers résidentiels au Sud de la ville et populaires à l'Ouest. Les bidonvilles se concentrent à proximité ou dans les talwegs.

Figure 163 : ségrégation socio–spatiale de Praia (générée à partir d'une scène multi–spectrale Kompsat-2 de décembre 2006).



Le second visage de l'urbanisation cap–verdienne est lié au développement du tourisme balnéaire de masse. Elle a réellement débuté, à partir de 2007, avec l'autorisation de la construction de plus d'une centaine de « ressorts », notamment sur Boa Vista, les « ressorts » de l'île de Sal préfigurant le futur du développement éco–touristique du Cap–Vert. La politique menée par l'Agence cap–verdienne de promotion des investissements (*Cabo Verde Investimentos*), sur le modèle de l'archipel des Canaries, conduit à une massification des processus d'urbanisation « balnéaire » littoraux avec en 2007, deux cents projets de complexes hôteliers retenus.

L'intérêt du Cap–Vert tient au modèle de développement économique et territorial qui a été mis en place dans les années 2000. Modèle qui base son développement sur le tourisme de masse en jouant sur sa relative proximité avec l'Europe, en prenant pour exemple les Canaries. Le choix du développement du tourisme a été conditionné par deux éléments interdépendants :

- ✓ La nécessité de développer les infrastructures de transport et de communication (port, aéroport, Internet à très haut débit) dans une logique d'intégration territoriale de l'archipel, élément primordial à la mise en place d'une politique de développement.
- ✓ Répondre aux exigences et aux critères du Fonds monétaire international pour disposer des crédits nécessaires à la construction des infrastructures aéroportuaires de transport, les financements étant accordés aux politiques territoriales de développement économique.

L'intérêt du suivi du processus de littoralisation par télédétection et modélisation par SGIMT qui est lié à la construction des dizaines d'hôtels et de « ressorts » sur le littoral tient à la spécificité géopolitique et législative du Cap–Vert. Au-delà des impacts supposés sur l'emploi des populations pauvres (37% de la population à Praia vit avec l'équivalent de 90 dollars US par mois) et à la capacité à les sortir de la pauvreté, les mécanismes du processus d'urbanisation touristique du littoral posent la problématique et la mesure des investissements mafieux et criminels dans le mécanisme conduisant à l'urbanisation, tout autant que du rôle de la corruption dans les conflits fonciers qui opposent les communes à l'Etat.

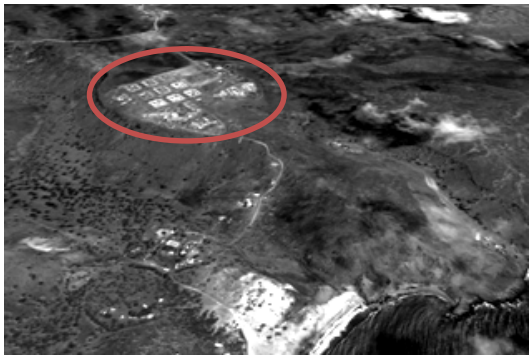
Dans quelle mesure le blanchiment de l'argent d'organisations criminelles dans l'immobilier, le tourisme et la construction, est-il un élément moteur de la croissance urbaine et de l'émergence de territoires qui s'insèrent dans la mondialisation ?

Si les choses sont probablement plus visibles au Cap–Vert, il est illusoire de croire que seuls les pays en développement en sont les seuls réceptacles. Une partie des processus d'urbanisation et de périurbanisation de la région de Milan en Italie est typiquement le résultat des opérations de recyclage de l'argent des groupes mafieux. Le blanchiment de l'argent des groupes criminels ou issus de l'évasion fiscale génère de l'urbanisation, qui elle-même induit du développement, voire de la métropolisation. La croissance urbaine de la région de Mbour, dans les années 2000 au Sénégal, est en partie liée au transfert des investissements financiers dédiés ou provenant de la Côte d'Ivoire.

Tout autant que la croissance démographique et le développement économique, les investissements financiers sont également un des moteurs de l'urbanisation et de la métropolisation. L'impact du recyclage financier de l'économie parallèle et criminelle sur l'urbanisation, notamment touristique, est réel, voire sur certains lieux prépondérants. Il doit être pris en compte dans les « inputs » conduisant à l'urbanisation et au développement territorial.

Une autre particularité du modèle de développement urbain et territorial du Cap–Vert tient à la construction de quartiers extra–territorialités pour les retraités européens pour une période de quatre-vingt-dix-neuf ans. Quartiers qui sont généralement implantés au milieu de nulle part au bord de l'Océan atlantique.

Figure 164 : quartier extra–territorialité britannique de Porto de Sao Francesco (« Sambala village »).



REMARQUES SUR LES MODELES DE DEVELOPPEMENTS TERRITORIAUX

L'intensité des processus d'urbanisation littorale touchant la Mauritanie, le Sénégal, la Gambie ou le Cap–Vert avec des taux d'accroissement de la population élevés sur des territoires du mal développement, pose la question des moyens et des méthodes de contrôle des processus d'urbanisation et la maîtrise des problématiques d'aménagement. Ce sont à la fois des problématiques sociales, politiques et environnementales de l'urbanisation littorale, celles liées aux enjeux de développement du tourisme et des infrastructures qui se posent. Ou encore, comme à Saint–Louis du Sénégal, les questions de la gestion de l'eau, des inondations et de l'aménagement qui focalisent la problématique urbaine.

Les autorités en charge de la gestion de ces villes manquent généralement de moyens techniques et financiers, ne pouvant au mieux que pallier aux principales urgences. Un manque de moyens qui se double d'une absence de culture d'aménagement urbain de l'espace et de gestion territoriale construite et pensée localement. L'aménagement côtier et littoral se fait aux profits de modèles importés souvent peu adaptés à l'environnement géographique et culturel local accentuant les problèmes de gouvernance. Les méthodologies d'aménagement urbain et de planification territoriales utilisées prennent mal en compte la réalité géographique ouest–africaine. Les instruments classiques de la planification restent trop rigides et lourds avec des taux effectifs de mise en œuvre faibles.

La mobilisation de l'information géographique et la constitution de systèmes locaux et régionaux dédiés au suivi des dynamiques territoriales sont insuffisantes. Elles doivent s'accompagner du développement et de la mise en œuvre d'outils opérationnels : acquisition et capitalisation des données, modèles de suivi des transformations de l'espace côtier et littoral, développement de systèmes géo–spatialisés d'aide à la décision.

La question de la gestion et de la maîtrise des territoires urbains littoraux dans les prochaines années constitue un enjeu de développement et d'aménagement

du taux de croissance démographique et urbain élevé. Elle pose le problème du choix du ou des modèles d'aménagement et de gestion territoriale à mettre en place et des formes d'organisation de l'espace géographique à implémenter. C'est-à-dire, réfléchir sur les modèles de développement économique, social et territorial à appliquer.

Cette demande qui peut se formuler dans le cadre d'une problématique géographique est d'autant plus aigüe qu'un certain nombre de ces territoires urbains s'insèrent dans un processus d'intégration régional émergent et dans certains aspects de la mondialisation.

POSTFACE

La géomatique est le témoin des contradictions internes des démarches en géographie et dans les sciences sociales. C'est un moyen de produire une connaissance renouvelée sur l'espace géographique. C'est également un acteur participant aux transformations des territoires. Nous nous retrouvons dans une situation dans laquelle les démarches de recherche sont intrinsèquement les mêmes que celles qui mettent en place l'objet de recherche. Elles mettent en avant la primauté des technologies, des méthodes et des techniques dans les démarches scientifiques. Primauté des démarches géomatiques qui permet de masquer la faiblesse des travaux théoriques en géographie. C'est au travers du renouvellement des méthodes, des techniques et des avancées technologiques du moment que l'on est capable de produire une connaissance enrichie des processus de métropolisation.

L'originalité des apports méthodologiques tient à la capacité à analyser temporellement et à différentes échelles les processus de métropolisation. Elle s'appuie sur des méthodologies de traitement et d'analyse d'images identiques et des mesures de télédétection équivalentes basées sur les approches orientées objets « frontières » et « régions ». Chaque objet géographique est reconnu, identifié et défini à partir de ses caractéristiques biophysiques et morphologiques qui sont intégrées dans une base de données géographiques. L'ensemble des résultats sont normalisés et structurés en SIG. Les transformations territoriales sont modélisées par simulation empirique par évènement discret à partir des objets géographiques comme le bâti reconnu et extrait par télédétection. Ils sont indistinctement représentés sous une forme 2D ou 3D.

Les démarches mises en place par télédétection et simulation à travers la notion de SGITM se distinguent des approches généralement développées en géographie par leur capacité à analyser simultanément plusieurs territoires dans le temps et à différentes échelles. Elles « renversent », de fait, la logique des études en géographie en passant d'analyses circonscrites à un territoire à des méthodes transposables sur l'ensemble des territoires. Elles clôturent dans un certain sens les programmes mis en place en Europe dans les années 1990 avec GMES et INSPIRE dans la production de bases de données harmonisées et interopérables sur l'ensemble de l'espace européen et les travaux engagés en doctorat. Ils consistaient à créer des méthodes d'analyse de la métropolisation reproductibles sur l'ensemble de l'espace terrestre. Ces travaux menés depuis plus d'une dizaine d'années s'enracinent dans l'héritage du groupe Dupont et de la nouvelle géographie qui est apparue en France au début des années 1970 contribuant au renouvellement de ses problématiques, objets d'études et méthodes.

Sur le plan théorique, les apports à la géographie et à la problématique de la métropolisation sont marqués par une diversification des terrains d'étude, contribuant à une relecture du concept. La métropolisation n'est pas un

processus de transformation de l'espace géographique circonscrit à certains pays développés européens, asiatiques ou nord-américains. C'est un phénomène géographique apolitique et a–culturel qui est lié à un certain niveau de développement sociétal, qui se joue en partie du modèle économique de développement dans lequel elle s'insère, tout autant que du nombre d'habitants. Des territoires faiblement peuplés comme en Lituanie sont structurellement métropolisés. C'est un processus globalisé dans le sens où elle touche un certain nombre de territoires et non la totalité des espaces humanisés.

Le choix des démarches d'analyse par télédétection et géomatique est singulier. Les démarches par télédétection permettent de couvrir l'ensemble des territoires en métropolisation ou métropolisés à différentes échelles et pas de temps, de mesurer et de modéliser les changements. Télédétection, SIG, modélisation spatiale, sont des « blocs » technologiques de plus en plus centraux des systèmes d'information. Les systèmes *géomatiques* participent à la gestion et au fonctionnement des territoires métropolisés. Ils génèrent des réseaux, de la territorialisation, de la mondialisation. Ils modifient les comportements individuels et collectifs, supportent, intensifient les mobilités, les échanges d'informations et les communications entre les lieux et les personnes. Ils produisent des formes de territorialisation a–physique dans le sens où ils ne génèrent pas de transformations qui s'inscrivent physiquement dans l'espace contrairement à l'urbanisation. L'impact territorial de l'emploi des technologies de l'information et de la communication a un impact aujourd'hui restreint sur la structure territoriale, même s'il modifie les comportements sociaux et progressivement la structure du travail. Elle est difficilement détectable par télédétection en l'absence d'inscription physique (spécifique). Elle est consignée dans la structure spatiale existante. Elle est par contre parfaitement modélisable en SIG et en analyse spatiale. Si l'on se place sous l'angle du double enjeu géostratégique et environnemental de la métropolisation et de l'aménagement territorial (Gadal, 2011), les contraintes énergétiques vont modifier l'organisation des territoires aux échelles urbaines et intra–urbaines, sans pour autant modifier l'intensité des mobilités de lieux à lieux (entre les territoires métropolisés).

Les liens entre télédétection et formes spatiales de métropolisation, répartition de population et modes d'habitats sont univoques (Gadal, 2001) (Gadal, 2003). La télédétection met bien en évidence les transformations des structures spatiales et territoriales, la répartition spatiale des populations, générées par la métropolisation aux échelles régionales, méso–urbaines et subcontinentales. A l'échelle métrique, celle de l'habitat, elle permet d'appréhender les modes de territorialisation (Gadal, 2011). S'il est possible de lier métropolisation et répartition démographique, le lien entre télédétection, géomatique et économie reste mal établi (Maletto, Gadal, 2005) (Gadal, Maletto, 2007). Il est facile de télédétecter les usines, conglomérats, les zones économiques spéciales, les hangars, etc. Cependant le lien entre télédétection et modèles géoéconomiques n'a pas encore été formalisé. C'est un chantier en développement. Force est de

constater que l'on s'oriente de plus en plus vers une convergence des démarches par télédétection et des démarches issues de la géographie sociale. Le but est de lier formes et caractéristiques biophysiques des objets géographiques avec leur sens sociétal et fonctions socio-économiques. Elle nécessite des avancées théoriques en géomatique et en géographie qui se formalisent par l'importance prise par les questions d'ontologie géographique et spatiale en géomatique

DE LA TRANSDISCIPLINARITE UTILITARISTE A L'OBJET DE CONNAISSANCE DU MONDE

CONCLUSION

Trois mots–clés, trois concepts guident les recherches : la métropolisation, la géomatique et le développement. Chacun d'entre eux sont des concepts polysémiques qui ont une réalité physique, sociale et technologique dont leurs définitions, leurs représentations et leurs acceptations renvoient à des pratiques disciplinaires, sociales, à des démarches scientifiques ou technoscientifiques différentes qui leur sont propres, y compris au sein d'une même discipline comme la géographie. Chacun des corpus disciplinaires ou infra–disciplinaires met en lumière l'une ou l'autre des facettes de la métropolisation, du développement territorial, de la géomatique en fonction de ses référents théoriques et de ses méthodes mettant en jeu leurs objets et approches. L'étude de la métropolisation n'est pas l'apanage de la géographie, tout comme la problématique du développement territorial et la géomatique. La métropolisation est également un objet d'étude sociologique, économique et d'aménagement, tout comme le développement territorial. La géomatique embrasse le champ de la géographie, de l'informatique, des mathématiques, de l'ingénierie et de la physique dans le domaine de la télédétection. Ce sont des objets d'études interdisciplinaires qui se nourrissent les uns aux autres dans un travail de recherche qui, au sein de la géographie, est « à cheval » entre sciences géomatiques, géographies urbaine et du développement. Cette démarche qui pourrait être qualifiée d'intra–disciplinaire par la mobilisation de trois de ces champs scientifiques est une approche géographique.

Par contre, elle s'insère dans le champ des études interdisciplinaires du fait des objets conceptuels mobilisés pour étudier la métropolisation dans les pays en transition et en développement par la géomatique (télédétection, SIG, simulation, géo–visualisation). Objets conceptuels qui sont par essence transdisciplinaires et qui font l'objet d'une démarche interdisciplinaire.

Cette tension entre logique disciplinaire, transdisciplinarité et interdisciplinarité, que l'on retrouve sur le plan des pratiques scientifiques et universitaires, dans la problématique de recherche et les objets méthodologiques mobilisés, reflète les « discordances » sociétales qui animent les débats sur le rôle de la géographie et des sciences en général. Comme le montre Jean-Pierre Kesteman (Kesteman, 2004), l'interdisciplinarité, la transdisciplinarité, la pluridisciplinarité renvoient à des choix méthodologiques qui sont, aussi et surtout, des résultantes de modèles de société et de pensée. La géomatique en est l'exemple : démarche devant conduire à l'élaboration de connaissances rationnelles sur la compréhension et

l'ouverture au Monde, à l'espace géographique, elle est un système techno–informationnel de la métropolisation, un outil d'ingénierie géo–informationnel au service de l'aménagement, de l'environnement, de la sécurité, etc. Un objet techniciste dénoué de toute sensibilité humaniste et scientifique. Un objet technique et techno–informationnel typique du modèle de pensée et d'organisation sociétale qui s'est mis en place dans les années 1990 : la postmodernité capitaliste.

Il est le résultat fécond et réussi, contrairement à beaucoup d'autres, d'une démarche de recherche interdisciplinaire qui aujourd'hui rassemble encore géographes, informaticiens, mathématiciens et physiciens au sein de groupements de recherches en télédétection, traitement d'images, SIG, modélisation et simulation spatiale.

C'est un « concept géographique » techno–informationnel qui contient en lui une dualité intrinsèque :

- ✓ Il peut être une démarche et un outil s'insérant dans la logique d'efficacité, de rationalité technoscientifique dont le modèle capitaliste postmoderne (postfordiste) est friand et demandeur pour l'aménagement, le contrôle territorial, la prospective, etc. L'essor des sciences géomatiques est concomitant du changement de modèle économique (la fin du fordisme) dont les chocs pétroliers de 1973 et 1979 vont être les pourfendeurs. De la crise du fordisme va émerger un nouveau modèle d'organisation du travail fondé sur l'autonomie et la responsabilité qui va s'appuyer sur l'informatisation, l'automatisation et la robotique, la connaissance et l'information. La géomatique va bénéficier de l'émergence du modèle capitaliste postfordiste pour se développer, émerger et s'imposer (partiellement) dans son propre champ disciplinaire d'origine. C'est un vecteur informatique, un système informationnel géo–spatial générant des connaissances à haute valeur ajoutée susceptibles d'être « marchandisées », induisant de l'efficacité et de la productivité. C'est une industrie avec ses logiques, ses modèles, ses modes de production qui s'est progressivement imposée. Il ne s'agit pas d'une démarche devant conduire à l'émergence de faits, de « vérités » scientifiques, de connaissances sur le Monde. La géomatique, comme la géographie quantitative, a bénéficié, du moins aux Etats-Unis, de la guerre froide. Elle en est une résultante à l'instar des *spatial sciences* et tire son essence de la seconde guerre mondiale avec l'intégration des géographes comme Hartshorne, Ackerman, Harris, Ullman, Garisson, dans des équipes interdisciplinaires utilisant calculateurs, statistiques, démarches cybernétiques (Barnes, 1984). Moyens qui seront mis à la disposition de nombre de géographes universitaires étasuniens avec le soutien logistique et financier de l'*Office of Naval Research* (ONR), de l'US Air Force (Tobler, 1979), etc. Par contre, elles ont souffert de l'absence de cadre théorique qu'elles sont allées rechercher dans les modèles de la

physique gravitationnelle et les modèles économiques néoclassiques : Losch, von Thünen, Christaller (Barnes, 1984).

- ✓ C'est également une démarche d'analyse et de compréhension du Monde, « intégratrice », qui porte en elle les germes opératoires visant à rassembler en un tout, l'ensemble des mesures, informations et connaissances géographiques. En ce sens, les démarches géomatiques en géographie peuvent se rapprocher des idéaux de Basarab Nicolescu (Nicolescu, 1997) sur l'utopie de la construction d'un savoir transdisciplinaire unifié de la connaissance du Monde. La télédétection, les SIG, les modèles de simulation spatiale sont-ils capables de porter ou du moins de contribuer à la construction de cette utopie humaniste ? La télédétection spatiale et aéroportée, comme les SIG, gère, génère, mesure, reconnaît, identifie, recompose le Tout géographique et les Parties du continuum terrestre. La télédétection est une mesure de l'unité et de la diversité de l'espace géographique. Le Tout qui est mesuré est divisé en parties par les méthodes de traitement d'images. Leur reconnaissance et leur identification par analyse d'image donnent un sens géographique aux parties (lieux–objets localisés). De par son objet d'étude, l'espace géographique, la géographie à travers les démarches géomatiques étudie les formes d'anthropisation et de territorialisation. Elle mesure, pour reprendre Edgar Morin, « *l'enracinement du sujet*, [...] l'Homme [...] *dans son environnement* » (Morin, 1997).

L'entrée de la société dans l'aire postfordiste entraîne un remodelage de l'utilité sociétale des sciences et de la sphère universitaire. Elles sont devenues les éléments de la chaîne de production postfordiste en tenant une place de plus en plus centrale. La géographie n'y échappe pas. La géomatique, les métiers et les sciences du territoire, l'environnement, l'aménagement en sont les vecteurs et les bénéficiaires. Pour paraphraser un des apôtres de la transdisciplinarité postfordiste néolibérale, Michael Gibbons, « *la science doit avoir une dimension pratique et technique, plus que cognitive* » (Gibbons, 1994) (Kesteman, 2004). Elle se doit de résoudre des problèmes pratiques au détriment d'une science théorique capable d'apporter un jour le progrès par la technologie. Les problèmes « pratiques » du moment requièrent dans ce nouvel ordre scientifique un nouveau mode de production des savoirs qui passe par des démarches « transdisciplinaires » autour d'un problème donné, complexe, ponctuel. Les sciences, dont la géographie, doivent répondre aux besoins d'ordre social, économique et industriel et procéder à des alliances transdisciplinaires ad hoc. Elle sonne le glas de la modernité et de l'Université qui est pensée comme moyen de progrès, d'émancipation et de connaissance du Monde, celle de la capacité à penser, à construire, à anticiper la société et les territoires de demain.

L'étude de la métropolisation par la géomatique en fait d'elle un objet d'étude transdisciplinaire scientifique, sociétal et économique de la postmodernité capitaliste à l'instar de l'environnement ? Si l'on s'en tient à une lecture postfordiste du Monde, les processus de métropolisation peuvent s'inscrire comme l'expression spatiale du modèle capitaliste postmoderne. Son émergence

en Europe occidentale, puis dans un certain nombre de pays ex–communistes et en développement comme l'Inde pourrait être prise comme exemple. Cependant les résultats obtenus par SGIMT (télédétection, SIG, modélisation, simulation et géo–visualisation) sur les trois terrains d'étude ne montrent pas cela. La métropolisation est un phénomène géographique, un processus spatial qui se joue de la culture, du modèle politique et des territoires. Elle est un marqueur géographique et spatial du développement des sociétés. Elle est l'expression territoriale du développement des Hommes et des sociétés. Dans les Pays baltes, plus particulièrement en Lituanie, ce sont les modèles géo–économiques territoriaux de la planification soviétique qui ont modelé l'espace en un territoire métropolisé. En Inde, ce sont la croissance démographique, l'émergence d'une classe moyenne enrichie, une politique économique libérale s'ouvrant progressivement au Monde, qui font la métropolisation. Une métropolisation dont les modes de pensée et les modèles d'organisation de l'espace portent en eux l'héritage soviétique et britannique. En Afrique de l'ouest, l'urbanisation littorale est tout autant portée par l'élévation du niveau de vie de l'émigration, que d'une ouverture sectorielle à des portions de l'espace monde, notamment à travers le tourisme européen. Tous ces territoires et à travers eux les populations sont mus par une même aspiration qui s'exprime par des modèles urbains de territorialisation et des pratiques territoriales proches. La différenciation territoriale entre ces trois territoires tient au niveau de vie global de l'ensemble des populations. Il peut être mesuré, analysé, formalisé spatialement notamment par télédétection haute résolution par l'analyse fine des structures et des formes d'habitat.

Certes, le modèle néolibéral postfordiste peut jouer sur l'élévation du niveau de vie des populations et par ce biais devenir un des acteurs de la métropolisation. Il convient d'en évaluer les inputs réels en pérennisant par le biais d'observatoires spatiaux le suivi des territoires étudiés et en élargissant le champ d'étude à d'autres territoires en phase de métropolisation et d'urbanisation.

Il s'avère que la métropolisation est avant tout un processus individualisé qui se joue au niveau local et qui par le jeu d'accumulations et d'extensions spatiales (horizontales et verticales), de la mobilité et de la mise en interconnexion des lieux et des territoires va générer de l'intégration territoriale, de l'interdépendance spatiale (de lieu à lieu). A partir de ces processus vont émerger des régions urbaines qui vont être plus ou moins connectées aux territoires mondialisés de portée globale ou régionale (à l'échelle européenne, indienne, etc.). C'est un processus multi–échelles que les démarches multi–niveaux par télédétection prennent bien en compte.

L'impact des corridors d'échanges, des réseaux de communications et de télécommunications dans la construction des territoires métropolisés, planifiée ou « libérale » est déterminant. Les corridors génèrent des échanges, de l'interaction spatiale de lieu à lieu qui, dans les trois cas d'étude, ont progressivement débouché sur des processus d'intégration par la mobilité, l'urbanisation et les télécommunications. La métropolisation est un système

spatial de lieux urbains interdépendants à quelque échelle qu'ils soient. La télédétection, les modèles spatiaux et de simulation prennent bien en compte la dimension temporelle. Ils permettent de bien mettre en évidence à différentes échelles l'émergence des territoires métropolisés. La télédétection s'accorde par contre mal de la prise en compte des réseaux de communications et de la mesure des flux. C'est pourtant un élément essentiel à prendre en compte, à mesurer, modéliser et analyser. Plusieurs pistes sont envisagées.

Un certain nombre de problématiques géographiques sociétales et méthodologiques qui découlent des travaux présentés dans ce mémoire ou en cours de finalisation ont émergé. Ils vont structurer pour partie les orientations et la conduite de mes futures recherches. Ils se fondent sur des partenariats avec bien sûr les géographes mais, également, avec des architectes, des climatologues (physiciens) et des informaticiens.

Le suivi géographique de la structuration et de la transformation des territoires de la métropolisation dans leurs dimensions socio–environnementales par les méthodes d'observations géo–spatiales constitue le cœur du travail de recherche. Un des objectifs est d'évaluer le rôle du système capitaliste postfordiste actuel sur l'organisation des territoires métropolisés et de ses avatars environnementaux, écologiques, financiers, etc. par SGIMT interactifs. Le choix des territoires est en cours de détermination : territoires émergents, ex–soviétiques, etc. Tout comme durant la guerre froide, les orientations géostratégiques post 11 septembre 2001 définies par le Pentagone, ont réorienté une partie des investissements économiques vers l'environnement et l'écologie dans le but de réduire la dépendance énergétique vis-à-vis de certains pays et de gagner en autonomie de décision diplomatique et stratégique sur le moyen terme. Cette réorientation stratégique a été d'autant facile qu'elle correspond à la fin du « cycle scientifique » de la problématique environnementale avec son transfert dans la sphère sociétale : métiers de l'environnement, etc., technologies de l'environnement, etc. Elle est devenue un produit relais de croissance du capitalisme postmoderne et une réponse sociétale aux problématiques écologiques, sanitaires, de pollutions et climatiques. A titre d'exemple, l'interface sur les questions d'écologie et d'environnement urbain se construit sur deux axes :

- ✓ Groupe de réflexion sur le futur des métropoles écologiques postsoviétiques.
- ✓ Faisabilité (Mumbai, Inde) sur la mise en place de modèles d'inversion carbone à l'échelle du bâti (télédétection très haute résolution). L'enjeu est tout autant de développer un modèle carbone liant le bâti aux émissions, que d'expérimenter des méthodes d'identification et de caractérisation fine du bâti (matériau, contexte morphologique et social, niveau de vie, population, industrie). Elle vise à générer de l'information biophysique et sociale.

Consolider les analyses et les résultats sur le rôle des corridors de développement économique dans l'émergence des territoires urbanisés et

métropolisés, asseoir le rôle des frontières. Deux projets sont en phase de montage dans les Pays baltes (ouverture de frontière ou inversement) (démarche temporelle par télédétection, SIG et simulation).

Prendre en compte l'un des caractères structurant qui font la métropolisation par télédétection et simulation : les réseaux et les mobilités individuelles. Un modèle de simulation individuel à l'échelle de la « rue » est en développement depuis deux ans. Il se base sur la morphologie urbaine, les SIG et la télédétection très haute résolution spatiale. La prise en compte des réseaux de communication va être développée : détection automatisée des routes à partir des travaux effectués par l'IGN dans les années 1990 et 2000, mesure et traçabilité des déplacements automobiles par télédétection hyper–spectrale (marqueur spectral temporel) sont des pistes qui seront développées dans les prochaines recherches sur les questions de frontières et de corridors et sur les zones d'étude de la métropolisation.

L'ensemble des problématiques de géographie sociale se fonde sur des développements méthodologiques en télédétection, SIG et simulation spatiale visant autant que possible à intégrer la dimension sociale, voire phénoménologique, en géomatique.

L'objectif est de passer de modèles géomatiques descriptifs qui sont porteurs d'informations et de connaissances géographiques à des modèles explicatifs. En somme, essayer de sortir de l'approche « mécaniste » de description et d'analyse de l'espace géographique, à une approche explicative et phénoménologique. Essayer de dégager sous une forme plus automatisée du signifiant géographique aux processus mesurés, modélisés, caractérisés, identifiés. Jusqu'à présent, les résultats obtenus par télédétection recèlent de façon intrinsèque des sens, des signifiants, des explications. Ils sont généralement produits par le géographe lors de la phase d'analyse d'images ou de leur intégration en SIG (analyse spatiale, fusion, comparaison avec d'autres données, résultats, informations). Si donner une sémantique aux formes des objets qui sont reconnus s'opère lors de la phase de transfert sémantique (faite par le géographe ou par fusion avec des bases de données géographiques), leur valeur explicative si elle est dans les résultats n'est pas exploitée. Les démarches d'analyse spatiale de la géographie quantitative rapportées à la télédétection sont-elles une réponse ou un champ à explorer ? Il faut l'expérimenter.

Le second champ de recherche méthodologique vise à passer des systèmes géomatiques produisant de l'information à des systèmes géomatiques de connaissances géographiques. Le passage de l'information à la connaissance géographique informatisée, normalisée, se structure sur deux plans : l'un en relation avec les problématiques géographiques et territoriales, le second avec la communauté des sciences de l'ingénieur et informatiques. Il constitue un stade « intermédiaire » dans l'essai d'élaboration de modèles de connaissances explicatifs, explicites en géomatique. Il passe par deux niveaux en cours d'élaboration ou d'expérimentation :

- ✓ Essai d'identification et de formalisation des formes universelles d'ontologies de l'espace géographique et à travers les images de télédétection spatiale. Des travaux associant géographes, informaticiens, cogniticiens et philosophes sont en cours. Un ouvrage, *Universal Ontology of Geographic Space* est en cours de publication aux Etats-Unis. Les enjeux sont importants. Ils vont déterminer les futures architectures et fonctionnalités des SIG tout comme, si les résultats sont probants, orienter les méthodes d'analyse de l'espace géographique par télédétection.
- ✓ Essai d'identification des objets ontologiques de la géographie qui passe par un investissement important dans l'expérimentation amont des futurs capteurs aéroportés et spatiaux. L'idée est, actuellement, de capitaliser l'ensemble des travaux qui ont été effectués depuis 1997 avec DAIS, puis les nano–capteurs hyper–spectraux NASA et avec le système radar Ramses de l'ONERA (depuis 2006) dans deux programmes d'expérimentation multi–capteurs en cours d'élaboration :
  - Hyper–spectral centimétrique NASA (VNIR, SWIR)/Lidar /optique sur drone. Ce programme a pris deux ans de retard suite au crash de l'avion à l'atterrissage et au décès du pilote.
  - Hyper–spectral/Multi–spectral/Thermique/SRO (bandes X, L & P) sur avion.

L'idée est de démultiplier la capacité de mesures sur les objets géographiques des terrains d'étude de la métropolisation et des avatars (aménagement, environnement) pour mieux les caractériser, produire une information et une connaissance géographique biophysique et sociale renouvelée sur les formes élémentaires de territorialité (l'habitat), indicateurs qui permettent de caractériser, définir, analyser et décrire les processus de transformations territoriales et leurs conséquences socio–environnementales. L'intégration systématique de la 3D permet d'intégrer un élément essentiel trop rarement pris en compte dans les études urbaines et du développement : l'étagement, le volume et la verticalité.

Un autre intérêt consiste à produire des bases de données spectrales biophysiques et sémantiques des objets géographiques. C'est-à-dire, à produire de l'information contenant une dimension explicative qui peut être utilisée pour analyser et interpréter les résultats.

La démultiplication des mesures et des tailles des données va rapidement nécessiter un investissement important dans le champ des méthodes de traitement, d'analyse et d'extraction de connaissances biophysiques et sociales, tout autant que leur réinsertion dans le champ de l'explication géographique et de la compréhension géographique de la métropolisation. Les contacts et la détermination des cadres de collaboration ont été formalisés avec des mathématiciens et informaticiens pour développer de nouvelles approches et méthodes de traitement et d'analyse de données.

L'étude des processus de métropolisation souffre d'une relative pauvreté du cadre d'analyse conceptuel et sociétal du phénomène lui-même, éclaté entre de multiples démarches qui produisent une représentation de la métropolisation sur des critères qui sont essentiellement démographiques, économiques et politiques. L'affirmation du modèle capitaliste libéral postfordiste dans nombre de pays, comme système de référence économique et social, a considérablement appauvri le cadre d'analyse conceptuel, obligeant à observer, mesurer, analyser ses formes spatiales et territoriales dans le temps et sur des terrains d'étude géoculturels et historiques très différents. Dans le même temps, le défaut d'un renouvellement du paradigme sociétal comme cadre explicatif de transformation actuelle des territoires, est compensé par un besoin de connaissance, d'information, grandissant qui se matérialise par la multiplication des systèmes de mesure, d'observation, de modélisation. Un besoin porté en impératif scientifique, social et économique. Celui de la dominance techno–informationnelle qui va probablement faire progressivement place à la *dominance cognitive*. La réalité spatiale et territoriale du phénomène et de ses processus reste relativement peu abordée, voire niée. L'intégration de la spatialité consiste le plus souvent à faire coller une réalité morphologique à celle des bases de données démographiques, du niveau de l'habitat à celui de la région urbaine, l'explication se trouvant dans l'analyse géographique des résultats.

La réalité territoriale et spatiale du phénomène de métropolisation est celle des aménageurs, urbanistes et architectes qui sont contraints de prendre en compte la réalité spatiale, sociale, environnementale et territoriale du processus, tout autant que les impératifs politiques et sociétaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abrantes P., Clément C., Soulard C. Jarrigue F., Laurens L. (2010). « Etalement urbain, dynamiques agricoles et politiques périurbaines ». Actes de la conférence ISDA 2010, Montpellier, 28-30 juin 2010.

Agence nationale de la statistique et de la démographie (2011) : http://www.ansd.sn/

Agrawal B. (2009). Urbanisation of rural areas. New Delhi : ABD Publications, 456 pages.

Al-Kheder S., Khrisat B. (2007). "Assessment of the urban planning system in historic Jerash with GIS: Achievements and challenges for sustainable tourism". Tourism and Hospitality Planning & Development, vol. 4, issue 3, pp. 245 266.

Alsaody S., Serra J. (2011). "Connective segmentation generalized to arbitrary complete lattices". In Mathematical morphology and its applications to image and signal processing.

Amarsaikhan D. Douglas T. (2004). "Data fusion multisource image classification". International journal of remote sensing, vol. 25, no17 pp. 3529-3539.

Andersen K., Hansen H., Isaksen A., Raunio M. (2008). Nordic city regions in the creative class debate: putting the creative class thesis to a test. In The urban turn and the location of economic activities, Hansen H. (Ed.). Lund: Lund university, pp. 165-198.

Andersen K., Lorenzen M. (2005). The geography of the Danish creative class: a mapping and analysis. Copenhagen: Copenhagen business school.

Andersen, K.V., Lorenzen, M. (2005). "The Geography of the Danish Creative Class: A Mapping and Analysis". Copenhagen, Denmark: Copenhagen Business School.

Angulo J. Velasco-Forero S. (2011). "Sparse Mathematical Morphology Using Non-negative Matrix Factorization", In IMM 2011, Soille P., Pasaresi M., Ouzounis G. (Eds.). Berlin: Springer-Verlag, pp. 1-12.

Anys H., Bannari A., He D. C., Morin D. (1994). « Texture analysis for the mapping of urban areas using airborne MEIS-II images ». First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 11-15 septembre 1994.

Ascher F. (1995). Métapolis ou l'avenir des villes. Paris: Editions Odile Jacob. 346 pages.

Aurnague M., Hickmann M., Vieu L. (2007). Searching for the categorization of spatial entities. In. The Categorization of spatial entities in language and

cognition. Aurnague M., Hickmann M. and Vieu L. (Eds.). Amsterdam: John Benjamins Publishing Company. Pp. 01-32.

Baban S. M. J., Yuso K. W. (2001). "Mapping land use/cover distribution on a mountainous tropical island using remote sensing and GIS". Cartography and geographic information science, vol. 22, n°10, pp. 1909-1918.

Bailly A., Brun P., Lawrence R. J., Rey, M.-C. (Eds.). (2000). Développement social durable

Bala R. (2007). "Urbanization in Rajasthan at the dawn of the 21st century". In City, society, and planning city, Dutt A. K., Thakur B. (Eds.). Association of American geographers, pp.213-223.

Bansal S. C. (2007). "Growth of urban fringes of urban centres in upper Ganga-Yamuna Doab". In City, society, and planning city, Dutt A. K., Thakur B. (Eds.). Association of American geographers, pp. 200-212.

Barnes T. J. (1984). Quantitative revolution (geography of). Rapport d'étude. Vancouver : University of British Columbia, 20 pages.

Barnsley J. M., Barr S. L. (1996). "Inferring urban land use from satellite sensor image using kernel-based spatial reclassification". Photogrammetric engineering and remote sensing, vol. 62, n°8, pp. 949-958.

Barry Smith. (1999). "Agglomerations", in Spatial Information Theory. Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science. Freksa C., Mark D. (Eds.), Berlin: Springer. Pp. 267–282.

Benediktsson J. A., Kanellopoulos I. (1999). "Classification of multisource and hyperspectral data based on decision fusion". IEEE transaction on geoscience and remote sensing, vol. 33, n°3, pp. 1367-1377.

Bolon P. (1995). « Filtrage adaptatif pour le prétraitement d'images », In Cocquerez J.-P., Philipp S. (Eds.). (1995). Analyse d'images : filtrages et segmentation. Paris : Masson.

Borgo S. (2009). Euclidean and mereological qualitative spaces: a study of SCC and DCC. Proceedings of the Twenty-first International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI 2009, Pasadena, California, USA.

Borie A., Catalaa F., Papillault R., Vidyarthi S. (2007). Jaipur, Ville Nouvelle du XVIII^{e} siècle au Rajasthan. Paris : Thalia édition, 278 pages.

Boyle M. (2006). Culture in the rise of tiger economies : Scottish expatriates in Dublin and the creative class thesis. International Journal of Urban and Regional Research, vol. 30, n°26, pp. 403-426.

Braun M., Martin H. (2003). "Mapping imperviousness using NDVI and linear spectral unmixing of ASTER data in the Cologne-Bonn region (Germany)".

Proceedings of the SPIE 10th International Symposium on Remote Sensing, 8-12 Septembre 2003, Barcelona, Espagne.

Brenner R. (2002). "The Low Countries in the Transition to Capitalism", Journal of Agrarian Change, vol. 1, n°2, pp. 169-241.

Bronge L. B. (1999). "Mapping boreal vegetation using Landsat TM and topographic map data in a stratified approach". Canadian journal of remote sensing, vol. 25, n°5, pp. 460-474.

Brugioni D. A. (1989). ''Impact and social implications". Technology in Society, Global Impact of Commercial Remote-Sensing Satellites, vol. 11, n°1, pp. 77-87.

Brugioni D. A. (1989). ''The Serendipity Effect of Aerial Reconnaissance", Interdisciplinary Science Reviews, vol. 14, n°1, p. 16.

Brunet R., Ferras R., Théry H. (1992). Les mots de la géographie, dictionnaire critique. Paris: Reclus–La documentation française, 470 pages.

Bruzzone L., Prieto D. F., Serpio S. B. (1997). "A neural-statistical approach to multi-temporal and multisource remote sensing image classification". IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 37, n°3, pp. 1350-1359.

Bughin J., Hazan E., Said R., (2011). Impact d'Internet sur l'économie française. Comment Internet transforme notre pays. Rapport d'étude, Mc Kinsey & Compay, 44 pages.

Burrough P. A. & Frank A. U. (Eds.). (1996). Geographic objects with indeterminate boundaries. London: Taylor and Francis.

Cabral P. (2006). Etude de la croissance urbaine par télédétection, SIG et modélisation. Le cas des Concelhos de Sintra et Cascais (Portugal). Mémoire de doctorat de l'Ecole des hautes études en sciences sociales, 209 pages.

Campagna M. (2002). "The Geographic information technology support to historic urban centers redevelopment process: Towards a communicative approach". Proceedings of the European seminar: Spatial information and social processes, Thessalonique, 27-28 juin 2002, Grèce.

Campagna M., De Montis A., Deplano G. (2000). "Managing urban historical renewal in Italy: New perspectives of GIS/MCA architectures for Web-based collaborative planning". in Histocity Book, Esposito M.A. (Ed.), Finrenze: Alinea éditions.

Campbell J. B. (2007). Introduction to remote sensing. New York: Guildford Press.

Canny J. (1986). "A computational approach to edge detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 8, n°6, pp. 679 – 698.

Carton R., Gadal S. (2007). Analyse diachronique de la croissance urbaine de Jaipur : 1988-2006. Rapport d'étude, Kompsat-2 data qualification, 72 pages.

Casati R., Smith B., Varzi, A. (1998). Ontological tools for geographic representation. In Formal ontology in information systems. Guarino N. (Ed.). Amsterdam: IOS Press. Pp. 77–85.

Casati R., Varzi A. (1999). Parts and places. The structures of spatial representation. Cambridge: MIT press.

Casson M., Giusta M. (2007). Entrepreneurship and social capital. International Small Busniess Journal, vol. 25, pp. 220-244.

Chen X., Zhao H., Li P., Yin Z. (2006). "Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes", Remote sensing of environment, vol. 104, n° 2, pp. 133-146.

Chias P., Abad T., Echeverria E., Da Casa F., Celis F. (2007). "A GIS in cultural heritage bases upon multiformat databases and hypermedia personalized queries". Proceedings of the XXI International CIPA Symposium, Athènes, Grèce, 01-06 octobre 2007.

Choplin A., Lombard J. (2008). Migrations et recompositions spatiales en Mauritanie. « Nouadhibou du monde ». Ville de transit… et après ? », Afrique contemporaine, n°228, pp. 151-170.

Christaller W. (1933). Die zentralen Orte in Süddeutschland. Eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmäßigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen.

Clifton N. (2008). The creative class in the UK: an initial analysis. Geografiska Annaler, vol. 90, pp. 63-82.

Cocquerez J.-P., Philipp S. (Eds.). (1995). Analyse d'images : filtrages et segmentation. Paris : Masson.

Collet C., Rochon G., Caloz R. (2001). Précis de télédétection: Traitements numériques d'images de télédétection. Québec : Presses universitaires du Québec, 385 pages.

Cooke P., Morgan L. (1998). The associational economy: Firms, regions, and innovation, Oxford: Oxford University Press, 247 pages.

Coster M., Chermant J. L. (1989). Précis d'analyse d'images. Paris : Presses du CNRS. 560 pages.

Courgeau D. (1986). « L'hypothèse d'une transition dans la mobilité, simultanée à la transition démographique, est-elle vérifiée ? ». Actes du colloque : Les changements ou les transitions démographiques dans le monde contemporain en développement.

Croft T. A. (1973). "Burning waste gas in oil fields". Nature, n°245, pp. 375-376.

Croft T. A. (1978). "Night–time images of the Earth from space". Scientific American, vol. 239, n° 1, pp. 68-79.

Croft T. A. (1979). The brightness of lights on Earth at night digitally recorded by DMSP satellite. Stanford Research Institute Final Report prepared for the US Geological Survey, Reston, Virginia, 57 pages.

De Martonne E. (1948). Géographie aérienne. Paris : Albin Michel.

De Souza Filho C.R., Zullo J. Jr., Elvidge C. (2004). "Brazil's 2001 energy crisis monitored from space". International Journal of Remote Sensing, vol. 25, n°12, pp. 2475-2482.

Delcourt L. (2007). « Explosion urbaine et mondialisation », Alternatives Sud, vol. 14, n°2.

DeMartonne E. (1948). Géographie aériennes. Paris : Albin Michel. 242 pages.

Derivaux S., Forestier G., Wemmert C., Lefèvre S. (2010). "Supervised image segmentation using watershed transform, fuzzy classification and evolutionary computation". Pattern Recognition Letters, vol. 31, n° 15, pp. 2364-2374.

Dinh V., Gadal S. (2008). Rapport intermédiaire de recherche CITADAIN. Rapport de recherche.

Dobson J. E., Bright E. A., Coleman P. R., Bhaduri B. L. (2003). "Landsacan: a global population database for estimating populations at risk". In Mesev V. (Ed.). (2003). Remotely sensed cities. Londre : Taylor & Francis. Pp. 267-280.

Dobson J. E., Bright E. A., Coleman P. R., Durfee R. C., Worley B. A. (2000). "A Global Population Database for Estimating Population at Risk". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66, n°7, pp. 849-857.

Doll C. N. H. (2003). Understanding the information content of night–time light satellite data for modelling socio-economic dimensions of global change. Mémoire de doctorat, University of London.

Doll C.N.H, Muller J-P. and Morley J.G. (2006). "Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery". Ecological Economics, vol. 57, pp. 75-92.

Doll C.N.H. (2003). "Estimating non-population parameters from night-time satellite imagery". In Mesev V. (Ed.). Remotely Sensed Cities. London: Taylor & Francis, pp. 335-354.

Doll C.N.H., Muller J-P., Elvidge C.D. (2000). "Night–time imagery as a tool for global mapping of socio-economic parameters and greenhouse gas emissions". Ambio, vol. 29, n°3, p.157-162.

Doll N. H., Muller J.-P. (1999). "An Evaluation of Global Urban Growth via Comparison of DWC and DSMP-OLS Satellite Data". *IEEE 1999*, pp. 1-3.

Dupont V., Dureau F., Dupont V., Lelièvre E., Lévy J.-P., Lullet . (Eds.), (2000). « Delhi : une dynamique de peuplement centrifuge ». in *Métropoles en mouvement. Une comparaison internationale*. Paris : Anthropos.

Dureau F. (1988). « Utiliser la télédétection spatiale pour observer les populations citadines ». Actes de la Journée de la télédétection de l'ORSTOM, Bondy, 17-19 novembre 1988.

Dureau F. (2000). « Bogota : une double dynamique d'expansion spatiale et de densification d'espaces déjà urbanisés ». In Dureau F., Dupont V., Lelièvre E., Lévy J.-P., Lulle T. (Eds). (2000). Métropoles en mouvement. Une comparaison internationale. Paris : Anthropos. Pp. 81-92.

Dureau F., Barbary O., Lortic B., Michel A. (1988). Utiliser la télédétection spatiale pour produire rapidement des données démographiques en ville. L'exemple de Quito (Equateur). Actes de la conférence ISTED, Gestion urbaine et développement, Lyon, 20-22 septembre 1988.

Dureau F., Dupont V., Lelièvre E., Lévy J.-P., Lulle T. (Eds). (2000). *Métropoles en mouvement. Une comparaison internationale.* Paris : Anthropos.

Durrieu S., Deshayes M. (1994). « Méthode de comparaison d'images satellitaires pour la détection des changements en milieu forestier. Application aux monts de Lacaune (Tarn, France) ». Annal of sciences forest, n°51, pp. 147-161.

Eastman J. R. (2003), Guide to GIS and Image Processing, Clark Laboratory, Clark University, 328 pages.

Egenhofer M, & Mark D. (1995). Naive geography. Report of the national center for geographic information and analysis, Buffalo State University, New York, 16 pages.

Ehlers M., Edwards G., Bedard Y. (1989). "Integration of remote sensing with geographic information systems: A necessary evolution". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 55, n°11. pp. 1619–1627.

Ehlers M., Jadkowski M. A., Howard R. R., Brostuen D. E. (1990). "Application of SPOT data for regional growth and local planning". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n°56, pp. 175-180.

Elvidge C. D., Baugh K. E., Hobson V. R., Kihn E. A., Kroehl H. W., Davis E. R., Cocero D. (1997). "Satellite inventory of human settlements using nocturnal radiation emissions: A contribution for the global tool chest". Global Change Biology, vol. 3, n°5, pp. 387-395.

Elvidge C. D., Baugh K. E., Kihn E. A., Kroehl H. W., Davis E. R. (1997). "Mapping city lights with nighttime data from the DMSP operational linescan system". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 63, n°6, 727-734.

Elvidge C. D., Baugh K. E., Kihn E., Kroehl H. W., Davis E. R. (1997). "Mapping City Lights with Nighttime Data from the D.M.S.P. Operational Linescan System". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 63, n° 6, pp. 727-737.

Elvidge C. D., Chen Z. (1995). "Comparison of broad-band and narrow-band red versus near infrared vegetation indices". Remote Sensing of Environment, vol. 54, n° 2.

Elvidge C. D., Imhoff. M. L., Baugh K. E., Hobson V-R., Nelson. I., Safran J., Dietz J. B., Tuttle. B. T. (2001). "Night–time lights of the world: 1994-1995". ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 56, pp. 81-99.

Elvidge C. D., Jansen W. T. (1999). "AVIRIS observations of nocturnal lighting". Proceedings of the AVIRIS Airborne Geosciences Workshop, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA.

Epstein J., Payne K., Kramer E. (2002). "Techniques for mapping suburban sprawl". Photogrammetric engineering and remote sensing, vol. 68, n°9, pp. 913-918.

Ferrier J. P. (1998). Le contrat géographique ou l'habitation durable des territoires. Lausanne : Payot.

Ferrier J. P., Hubert J. P., Nicolas G. (2005). Alter-Géographies. Fiches disputables de géographie. Publications de l'Université de Provence, 281 pages.

Ferrier J.-P. (1993). « La métropole méditerranéenne, modèle de la métropole de la modernité 3 ». Méditerranée, nº1-2.

Ferrier J.-P. (2000). « De l'urbain au post-urbain. Théorie géographique de la métropolisation et prospective pour une habitation durable des territoires ». In Les très grandes villes dans le monde. Paulet J.-P. (Ed). Paris : CNES-SEDES.

Fleury G., Lacomme P., Tanguy A. (2006). Simulation à événements discrets : Modèles déterministes et stochastiques ; Exemples d'applications implémentées en Delphi et en C++. Paris : Eyrolles.

FLIR. (2011). http://www.flir.com/fr/

Florida R. (2002). The Rise of the Creative Class and How It's Transforming Work, Leisure and Everyday Life. New York: Basic Books.

Florida R. (2004). Richard Florida, Cities and the Creative Class. New York: Routledge.

Franklin S. E., Peddle D. R., Dechka J. A., Stenhouse G. B. (2002). "Evidential reasoning with Landsat TM, DEM, and GIS data for land cover classification in support grizzly bear habitat mapping". International journal of remote sensing, vol. 23, n°21, pp. 4633-4652.

Gadal S. & Nicolas G. (2001). Locus–object semantics in digital cartography. In M. Konecny (Ed.). GI in Europe: interoperable, interactive (pp. 574-584). Ispra, Italy: Joint research centre, European commission.

Gadal S. (1998). Automatic zoning of landscape structures by research of spatial discontinuities. In proceedings of the 94th Meeting of the Association of American geographers, Boston, USA.

Gadal S. (2000). Détection automatisée et tracé de frontières : cognitique, décision, influence des données. Décision et analyse spatiale. Géopoint 98, 12 (106-110).

Gadal S. (2000). Étude des phénomènes de métropolisation et leur télédétection. Rapport pour la Délégation générale pour l'armement, 178 pages.

Gadal S. (2001). Identification des formes spatiales de métropolisation par télédétection. Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille 1), 591 pages.

Gadal S. (2003). Identification des formes spatiales de métropolisation par télédétection. Lausanne: Eratosthène.

Gadal S. (2004). Dynamiques des objets géographiques urbains et périurbains par télédétection. (Expérimentation pour la mise à jour de bases de données géographiques et cartographiques). Rapport d'étude pour la Délégation générale pour l'armement, 239 pages + CD-ROM.

Gadal S. (2008). « Géomatiques : entre stagnations et appropriations », Géopoint 2006, Demain la Géographie. Permanences, dynamiques, mutations : Pourquoi ? Comment ?, Groupe Dupont : Avignon, pp. 281-287.

Gadal S. (2009). "Remote sensing monitoring of rural urbanisation in Jaipur region". Rural Development, vol. 4. n°1, pp. 222-225.

Gadal S. (2011). "The socio-ecological challenge of the metropolises territories: key-notes". Proceeding of Ecological Architecture 2011, KTU, 13 octobre 2011.

Gadal S. (2011). Télédétection des territoires métropolisés. Heidelberg : Editions universitaires européennes. 316 pages.

Gadal S., Dinh, V. (2007). Transformations de l'espace urbain post–soviétique (Kaunas, Lituanie) : reconnaissance et identification des objets urbains par télédétection très haute résolution, rapport de recherche pour EADS Spot Image et le Korean Aerospace Research Institute, Kompsat-2 data applicative qualification, 88 pages.

Gadal S., Gazel H., Lekaviciute J. (2006). « Conception d'un SIG d'aide à la décision pour l'optimisation de la gestion forestière », Actes du colloque Gecorev, Gestion concertée des ressources naturelles et de l'environnement: pour un dialogue entre chercheurs, société civile et décideurs, IRD.

Gadal S., Gilg J. P. (2002). "On geographical and temporal data production analysis". Proceedings of the European geographic information system seminar, University of Girona, ESRI Publications, Training & Education.

Gadal S., Jeansoulin R. (1998). Borders, frontiers and limits: Formal concepts beyond words, Proceedings of the First AGILE conference, ITC, Enschede.

Gadal S., Jeansoulin R. (2000). Borders, frontiers and limits: Some computational concepts beyond words. European journal of geography, n°125, pp. 12501-12517.

Gadal S., Maletto F. (2007). "Geo-dynamic of the spill-overs. The Franco-Italian cross border model", Proceedings of the 15th European colloquium of theoretical

and quantitative geography, Swiss national sciences foundation, Genève, pp. 169-175.

Gadal S., Nicolas G. (2000). "Locus: Fourth geographical dimension of the geomap". GeoInfo n°19, p p. 41-45.

Gadal S., Nicolas G. (2000). Locus: fourth dimension of the geomappe. Geoinfo series, Geographical domain and geographical information systems, n°19, pp. 41-46.

Gadal S., Nicolas G. (2001). "Locus-object semantics in digital cartography" in GI in Europe: interoperable, interactive, Konecny M., (Ed.), Ispra: Joint research centre, European commission, pp. 574-584. Intergraph Award.

Gadal S., Vignarath A., Carton R. (2010). Six walks to discover the Old City. Delhi : Eicher GoodEarth.

Gaussier N., Lacour C., Puissant S. (2003). "Metropolisation and territorial scales", Cities, vol. 20, n°4, pp. 253-263.

Gauthier G. (2003). « Une approche alternative en traitement d'image : la représentation par objet ». A.D.C.I.S.

GaWC. (2010). http://www.lboro.ac.uk/gawc/

Gibbons M. (Ed.) (1994). The New Production of Knowledge. Londres : Sage Publications.

Glaeser E. (2005). Review of Richard Florida's "The rise of the creative class". Regional Science and Urban Economics, vol. 35, pp. 593-596.

Glaeser E. (2004). Book Review of Richard Florida's "The Rise of the Creative Class".

Glaeser E., Saiz A. (2004). "The Rise of the Skilled City". Brookings-Wharton Papers on Urban Affairs, pp. 47-94.

Gong (1996). "Integrated analysis of spatial data from multiple sources: Using evidential reasoning and artificial intelligence and artificial neural network techniques for geological mapping". Photogrammetric engineering and remote sensing, vol. 62, n°5, pp. 513-523.

Goodchild M.F., Janelle D.G. (2010). "Toward critical spatial thinking in the social sciences and humanities". GeoJournal, vol. 75, n°1, pp. 3–13.

Gottmann J. (1961). Megalopolis, the urbanized northeastern seaboard of the United States. New York: Twentieth Century Fund.

Grady L., Polimeni J. R. (2010). Discrete calculus: Applied analysis on graphs for computational science. Heidelberg: Springer.

Grize J.B. (1969). Logique : historique, logique des classes, logique des propositions, logique des prédicats, logique modale, logique et structures. In J.

Piaget (Ed.). Logique et connaissance scientifique (pp. 135-289), Paris, Encyclopédie de la Pléiade 22.

Groom G. B., Fuller R. M., Jones A. R. (1996). "Contextual correction: Techniques for improving land cover mapping from remotely sensed images". International journal of remote sensing, vol. 17, n°1, pp. 69-89.

Groupe Vinci, 2010, L'attractivité des villes, rapport d'étude, Paris : La Fabrique de la Cité.

Haralick R., M. (1978). "Structural pattern recognition, homomorphisms, and arrangements". Pattern Recognition, vol. 10, n°3, pp. 223-236.

Harris P. M., Ventura S. J. (1995). «The integration of geographic data with remotely sensed imagery to improve classification in an urban area". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n°61, pp. 993-998.

Hawking S., Mlodinow L. (2010). The Grand design. Londre : Bantam Press. 238 pages.

Helmer E. H., Brown S., Cohen W. B. (2000). "Mapping montane tropical forest successional stage and land use with multi-date Landsat imagery". International journal of remote sensing, vol. 70, n°11, pp. 1353-1364.

Hospers G. J., Pen C. J. (2008). "A view on creative cities beyond the hype". Creativity and Innovation Management, vol. 17, n°4, pp. 259-270.

Imhoff M. L., Lawrence W. T., Stutzer D. C., Elvidge C. D. (1997). A Technique for Using Composite DMSP/OLS "City Lights" Satellite Data to Accurately Map Urban Areas. Remote Sensing of Environment, vol. 61, p. 361-370.

Joshi K. N., Suthar C. R. (2002). "Changing urban land use and its impact on the environment (A case study of Jaipur city)", ACRS 2002 proceedings. Available at http://www.GISdevelopment.net

Jourdan S. (2008). « Richard Florida, Cities and the creative class ». Méditerranée, n°111.

Kavzoglu T., Mather P. M. (2004). "The use of backpropagating artificial neural networks in land cover classification". International Journal of Remote Sensing, n°24 pp. 4907-4938.

Keet M. (2006). Introduction to whole-part relations: mereology, conceptual modeling and mathematical aspects. KRBD research center technical reports, Free University of Bozen – Bolzano, 32 pages.

Kerkmann J. (2003). Meteosat Second Generation: Meteorological Use the Seviri IR3.9 Channel, EUMETSAT.

Kesteman J.-P. (2004). « L'un, le multiple et le complexe. L'université et la transdisciplinarité ». A contrario, vol. 2, n°1, pp. 89-108.

Korzybski A. (1998). Une carte n'est pas le territoire : Prolégomènes aux systèmes non aristotéliciens et à la sémantique générale. Paris: Eclat.

Kumar B., (1998). Urbanization and land use conflict at urban fringes. New Delhi: ABD Publications.

Kwan M-P., Lee J. (2005). "Emergency response after 9/11: The potential of real-time 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments". Computers, Environment and Urban Systems, vol. 29, n°2, pp. 93-113.

Lazdinis M., Carver A., Lazdinis I., Paulikas V. (2009). "From union to union : forest governance in a post-soviet political system". Environmental Sciences & Politicy, vol. 12, pp. 309-320.

Lee J. S. (1980). "Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-2, n°2, pp. 165-168.

Lefèvre H. (2010). « Habitat y sociedad », Séminaire de la faculté de géographie de l'université de Barcelone, 26 novembre 2010

Lekaviciute J., Gadal S. (2009). "Forest cover changes between 1974 – 2005 in the Lithuanian coastal region", Rural Development, vol. 4, n°1, pp. 241-246.

Lévine M. (2004). « La classe créative et la prospérité urbaine : mythes et réalités».

Lézoray O., Grady L. (2011). Image Processing and Analysis with Graphs: Theory and Practice. New York: CRC Press.

Lieske R. W. (1981). "DMSP primary sensor data acquisition". Proceedings of the International Telemetring Conference, n°17, pp. 1013-1020.

Lo C. P. (2002) "Urban indicators of China from radiance-calibrated digital DMSP-OLS nighttime images". Annals of the Association of American Geographers, vol. 92, n°2, pp. 225-240.

Lopes A., Touzi R., Nezry E. (1990). Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, n°. 6, pp. 992-1000.

Lorenzen M., Vaarst Andersen K. (2009). Centrality and creativity: does Richard Florida's creative class offer new insights into urban hierarchy? Economic Geography, vol. 85, n°4, pp. 363-390.

Loveland T. R., Belward A. S. (1997). "The IGBP-DIS global 1km land cover data set, DISCover: First results". International Journal of Remote Sensing, vol. 18, n°15. pp.3289-3295,

Lucas R. (1988). "On the Mechanics of Economic Development". Journal of Monetary Economics, n°22, pp. 3-42.

Lunetta R, Congalton R., Fenstermaker L., Jensen J., McGwire K., Tinney L. (1991). "Remote sensing and Geographic Information System data integration: error sources and research issues". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 57, n°6, pp. 677-687.

Malinverni E. S., Di Gioia F. (2002). "3D image models in a dynamic environmental GIS". International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIV-5/W10.

Marcus S., Nicolas G. (1999). Logique Tout–Partie. In Géographie(s) et langage(s) G. Nicolas (Ed.). Sion : Société scientifique Eratosthène et Institut universitaire Kurt Bösch. Pp. 335-344.

Maselli F., Rodolfi A., Bottai L. (2000). "Classification of Mediterranean vegetation by TM and ancillary data for the evaluation of fire risk". International journal of remote sensing, vol. 21, n°17, pp. 3303-3313.

Maselli, F., A. Rodolfi, L. Bottai, S. Romanelli, and C. Conese. 2000. Classification of Mediterranean vegetation by TM and ancillary data for the evaluation of fire risk. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, n°17, pp. 3303-3313.

Mesev (1997). "Remote sensing of urban systems: hierarchical integration with GIS". Computer, environment and urban systems, vol. 21,n°3-4, pp. 175-187.

Mesev V. (1998). Measurement and analysis of urban morphology and land use. End of Award Report on ESRC Research Fellowship No. H53627501295, 32 pp, ESRC and British Library Document Supply Centre.

Mesev V. (2004). "The use of census data for urban image classification". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 64, n°5, pp. 431–438.

Mesev V. (2007). "The use of census data in urban image classification". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n°64, pp. 431-438.

Mesev V. (Ed.) (2007). Integration of GIS and remote sensing. Chichester: Wikey, 296 pages.

Mesev V. (Ed.). (2003). Remotely sensed cities. Londre : Taylor & Francis. 378 pages.

Mesev V., Walrath A. (2007). "GIS and remote sensing integration: in search of a definition". In Integration of GIS and remote sensing. Mesev V. (Ed.) (2007). Chichester: Wikey, 296 pages.

Michalakis M., Nicolas G. (1986). Le cadavre exquis de la centralité. Eratosthène–Sphragide, n°1, pp. 38-87.

Mignot P. (1995). « Méthodes de classifications ». In Analyse d'images : filtrages et segmentations. Cocquerez J. P., Philipp S. (Eds.). Paris : Masson.

Miyakawa Y. (1997). "Tokyo: satellites and GIS for the New Capital". Sistema Terra, vol. 6, n°1-3.

Moriconi-Ebrard F. (1998). « La loi de la métropolisation : un modèle pour la croissance des systèmes urbains », Revue de Géographie de Lyon, vol. 73, n°1, pp.55-70.

Moriconi-Ebrard F. (2000). De Babylone à Tokyo. Les grandes agglomérations du monde. Paris : Ophrys.

Moriconi-Ebrard F. (2003). «La loi de la métropolisation et la notion de système urbain», In Géographies, formalismes, réalités, Nicolas G., Seriot P. (Eds.). Lausanne : Ératosthène pp. 65-75.

Morin E. (1997). « Sur la transdisciplinarité ». MAUSS, n°10, pp. 21-29.

Murai H., Omatu S. (1997). "Remote sensing image analysis using a neural network and knowledge-based processing". International journal or remote sensing, vol. 18, n°4, pp. 811-828.

Narumalani S., Zhou Y., Jelinski D. E. (1998). "Utilizing geometric attributes of spatial information to improve digital image classification". Remote sensing reviews, vol. 16, n°4, pp. 233-253.

Nicolas G. (1999). Exemples d'utilisation de la logique Tout/Partie. In Géographie(s) et langage(s). G. Nicolas (Ed.). Sion : Société scientifique Eratosthène et Institut universitaire Kurt Bösch. Pp. 345-349.

Nicolas G. (2001). La logique Tout/Partie carrefour des géographies et de la cartographie. In Quatrième rencontres Théo Quant. Besançon, France: Presses universitaires de Franche-Comté. Pp. 7-17.

Nicolas G. (2009). Walter Christaller from "exquisite corpse" to "corpse resuscitated". S.A.P.I.EN.S., vol. 2, n°2.

Nicolas G., Marcus S. (1999). « "Logique Tout / Partie », in Géographie(s) et langages(s), Nicolas G. (Ed.) Sion : Eratosthène - Sphragide 6, pp. 335-349.

Nicolas G., Marcus S. (2003). Géospatiologie. In GéoPonts 2000 Nicolas, Seriot, P. (Eds.), Sion : Société scientifique Eratosthène et Institut universitaire Kurt Bösch, pp. 76-96.

Nicolas–O G. (1984). L'espace originel. Axiomatisation de la géographie, Berne: Peter Lang, 317 pages.

Nicolescu B. (1997). Évolution transdisciplinaire de l'Université. Document de synthèse, Rencontres Transdisciplinaires n° 9-10. Paris : UNESCO.

Niebergall S., Löw A., Mauser (2006). "Vulnerability in megacities: Identification of urban structures in Delhi / India using very high-resolution remote sensing images". Proceeding of 1st EARSeL Workshop of the GIS Urban Remote Sensing, Humboldt-Universität zu Berlin, 2-3 mars 2006.

Oetter D. R., Cohen W. B., Berterretche M. (2000). "Land cover mapping in an agricultural setting using multi-seasonal Thematic Mapper data". Remote sensing of environment, vol. 76, n°2, pp. 139-155.

Ogrosky, C.E. (1975). « Population estimates from satellite imagery ». Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, n°41, 707-712.

Outtara A., Gadal S., Martensson U. (2011). Linked demographic and urban growth. Rapport de recherche interne, GIS Centrum, Université de Lund, 19 pages.

Ouzounis G. K., Soille P. (2011). “Pattern spectra from partition pyramids and hierarchies”. In Mathematical morphology and its applications to image and signal processing. Soille P., Pesaresi M., Ouzounis G. K. (Eds.). Heidelberg: Springer. Pp. 108-119.

Pal N. R., Laha A., Das J. (2005). “Designing fuzzy rule based classifier using self-organizing feature map for analysis of multispectral satellite images”. International Journal of Remote Sensing, n°26, pp. 2219-2240.

Pant S. K., Pandey J. (2004). Social development in rural India. Jaipur: Rawal Publications.

Perret B., Lefèvre S., Collet C. (2011). Toward a new axiomatic for hyper-connections. In Mathematical morphology and its applications to image and signal processing.

Pesaresi M. (1995). "Morphology and texture for the settlement structural description". Proceedings of the ESF-GISDATA Specialist Meeting on Remote Sensing and Urban Change, Strasbourg, 7-11 June 1995.

Pesaresi M. (1995). "Morphology and texture for the settlement structural description", Proceedings of the ESF-GISDATA Specialist Meeting on Remote Sensing and Urban Change, Strasbourg, 7-11 juin 1995.

Piaget J. (1972). Problèmes de psychologie génétique. L’enfant et la réalité. Paris: Denoël et Gonthier, 174 pages.

Pickles J. (1997). The social implications of geographic information systems. New York : The Guilford Press.

Podobnikar T. (2010). “Methods for visual quality assessment of a digital terrain model”. S.A.P.I.EN.S., vol. 2, n°2.

Podobnikar T. (2010). “Methods for visual quality assessment of a digital terrain model”, vol. 2, n°2, pp.

Puissant A. (2003). Information géographique et images à très haute résolution. Utilité et applications en milieu urbain. Thèse de doctorat, Université Strasbourg 1.

Puissant A., Weber C. (2003). « Les images à très haute résolution, une source d’information géographique en milieu urbain ? ». L’espace géographique, Tome 32, n°4, pp. 345-356.

Pumain D., Saint-Julien Th. (2004). L'analyse spatiale. Localisations dans l'espace. Paris: Armand Colins.

Qi X., Chopping M. (2007). “Expansion of urban area in the Yellow River zone, inner Mongolia autonomous region, China from DMSP OLS nighttime lights data”. Proceedings of the IGARSS 2007 conference, Sensing and Understanding our Planet, Barcelona, Spain, 23-27 July 2007.

Rahman A. (2007). “Application of remote sensing and GIS technique for urban environmental management and sustainable development of Delhi, India”, In Applied remote sensing for urban, planning, governance and sustainability. Netzband M., Stefanov W. L., Redman C. (Eds.). Berlin: Springer.

Rakodi C. (Ed). (1997). The Urban Challenge in Africa. Growth and Management. Tokyo : United Nations University Press.

Ramesh B., Krishnan N. (1991). “Application of remote sensing for analysis of urban fringe dynamics – case study of Jaipur”. India, ACRS 1991 proceedings. http://www.GISdevelopment.net

Richards J. A. (1999). Remote Sensing Digital Image Analysis, Springer-Verlag, 240 pages.

Riu L. (2008). “Urban heritage conservation by GIS under urban renewal”. Proceedings of the 44th ISOCARP congress.

Ronse C. (2008). “Partial partitions, partial connections and connective segmentation”. Journal of Mathematical Imaging and Vision, vol. 32, n°2, pp. 97-125.

Rousseau V. (2000). Analogie et disparités du fait urbain au Maghreb. Mémoire de doctorat, Université de Provence, Aix-Marseille 1.

Savage M., Warde A. (1993). *Urban Sociology, Capitalism and Modernity*. Londres : MacMillan.

Saxon E. C., Parris T., Elvidge C. D. (1997). "Satellite Surveillance of National C02 Emissions from Fossil Fuels," Harvard Institute for International Development (Harvard University), Development Discussion Paper n° 608.

Serra J. (1998). “Connectivity on complete lattices”. Journal of Mathematical Imaging and Vision, vol. 22, pp. 231-251.

Serra J. (2006). “A lattice approach to image segmentation”. Journal of Mathematical Imaging and Vision, vol. 30, n°2, pp. 269-282.

Šeselgis K., Diciuviene M., Kleinas M., Daunoravicius Z. (1981). “Experience in the implementation of the unified system of settlement of the Lithuanian SSR”. Geograficheskiye osnovy formirovaniya system rasseleniya, pp. 42-49

Shi R., Liu M. (2007). GIS-based impact assessment model in urban historic culture heritage protection and planning. Proceedings of the XXI International CIPA Symposium, 01-06 octobre 2007, Athènes, Grèce.

Simons P. (1987). Parts: a study in ontology. London: Oxford University Press.

Singh L. R. (Ed.). (1987). Regional planning and rural development. Allahabad: Thinker’s Library.

Small C., Balstad-Miller R. (1999). “Digital cities II: Monitoring the urban environment from a space”. Proceedings of the Internation symposium on digital Earth “Towards digital Earth”. Sciences press.

Small C., Pozzi F., Elvidge C. D. (2005). Spatial analysis of global urban extent from DMSP-OLS nighttime lights. Remote Sensing of Environment vol. 96, pp. 277-291.

Smith B. (1996). Mereotopology : A theory of parts and boundaries. Data and Knowledge Engineering, vol. 20, n°3, pp. 287-303.

Smith B. (1997). Boundaries : an essay in mereotopology 1. In Philosophy of Roderick Chisholm (Library of Living Philosophers). Hahn L. (Ed.), LaSalle: Open Court, pp. 534-561.

Smith B. (1999). "Agglomeration". in Spatial Information Theory. Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science. Freksa C., David M. M. (Eds.). Berlin : Springer, Lecture Notes in Computer Science 1661, pp. 267–282.

Smith B. (2001). "Fiat Objects", Topoi, vol. 20, n°2, pp. 131–148.

Smith B., Mark D. M. (1998). Ontology and geographic kinds. In T. K. Poiker & Chrisman N. (Eds.), Proceedings. 8th International Symposium on Spatial Data Handling (SDH'98) Vancouver : International Geographical Union. Pp. 308-320.

Smith B., Varzi A. (2000). "Fiat and bona fide boundaries". Philosophy and Phenomenological Research, vol. 60, n°2, pp. 401-420.

Soille, P. (2011). "Preventing chaining through transitions whilesfavouring it within homogeneous regions". In Mathematcal morphology and its applications to image and signal processing, Soille P., Pesaresi M., Ouzounis G. (Eds.). Berlin: Springer, pp. 96-107.

Solberg A. H. S., Taxt T., Jain A. (1996). "A Markov random field model for classification of multisource satellite imagery". IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 34, n°1, pp. 100-112.

Stalling C., Khorram S., Huffman R. L. (1999). "Incoporating ancillary data into a logical filter for classified satellite imagery". Geocarta international, vol. 14, n°2, pp. 42-51.

Star J., Estes J., McGuire K. (Eds). (1997). Topic in remote sensing 5: Integration of geographic information system and remote sensing. New York: Cambridge University Press.

Star J. Estes J. (1993). Remote sensing and GIS integration: Towards a prioritized research agenda. NCGIA report, 14 pages.

Stefanov W. L., Ramsey M. S., Christensen P. R. (2001). "Monitoring urban land cover change: an expert system approach to land cover classification of semi-arid to arid urban centers". Remote sensing of environment, vol. 77, n°2, pp. 173-185.

Sullivan W.T. III. (1989). “A 10-km resolution image of the entire night-time Earth based on cloud free satellite photographs in the 400-1100nm band”. International Journal of Remote Sensing, vol. 10, n°1, pp. 1-5.

Sun L., Zhang W. (2010). L’évolution urbaine de la ville de Kaunas (Lituanie). Mémoire de Master 1 SETE, OVSQ-UVSQ, 89 pages.

Sutton P. (1997). "Modeling population density with night-time satellite imagery and GIS". Computers Environment and Urban Systems, vol. 21, n°3/4, pp. 227-244.

Sutton P. (2003). “A scale-adjusted measure of “Urban Sprawl” using nighttime satellite imagery”. Remote Sensing of Environment, vol. 86, pp. 353-369.

Sutton P., Costanza R. (2002). “Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land use, and ecosystem service valuation”. Ecological Economics, vol. 41, pp. 509-527.

Sutton P., Robert D., Elvidge C., Meij H. (1997). « A Comparison of Nighttime Satellite Imagery and Population Density for Continental United States ». In Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, n° 11, pp. 1303-1313.

Thanapura P., Helder D. L., Burckhard S., Warmath E., Neill M. O., Galster D. (2007). “Mapping urban land cover using QuickBird NDVI and GIS spatial modeling for runoff coefficient determination”. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing vol. 73, n°1, pp. 57-65.

Timoulali Y., Medouri A. (2000). Principes, méthodes et applications de la télédétection. Rabat : ISESCO, 86 pages.

Tobler W. R. (1979). “Smooth Pycnophylatic Interpolation for Geographical Regions”. Journal of American Statistical Association, n°784, pp. 519-530.

Treitz P. M., Howard P. J., Gong P. (1992). “Application of satellite and GIS technologies for land-cover and land-use mapping at the rural-urban fringe: A case study”. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, n°58, pp. 439-448.

Tso B. C. K., Mather P. M. (1999). “Classification of multisource remote sensing imagery using a genetic algorithm and Markov random field”. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 37, n°11, pp. 1255-1260.

UNDP. (2011). http://hdr.undp.org/fr/statistiques/

Vaitekūnas S. (1987). “Development of the settlement system in the Lithuania: results, problems, and prospects”. Soviet Geography, volume XXVIII, In Geografijos Erdvėse, monografija, 2006, Klaipeda: Klaipėdos universiteto leidykla, pp. 194-212.

Vanagas J. (2002). “Duobės kelje I Lietuvos territorini suklestéjima”. Versol Zinios, n°12.

Vanagas J., Krišjane Z., Noorkoiv R., Staniūnas E. (2002). "Planning urban systems in Soviet times and in the era of transition: the case of Estonia, Latvia and Lithuania". Geographia Polonica , vol. 75, n°2, pp. 75-101.

Vanagas J., Neniskis E. (2000). "Lietuvos miestu potencialas baltijos juros region urbanistiniame kontekste". Urbanistika ir architektura, t. 24, n°2, pp. 47-59.

Varzi A. (1996). Parts, wholes, and part-whole relations: the prospects of mereotopology. Data and Knowledge Engineering, vol. 20, n°3, pp. 259-286.

Varzi A. (1997). Boundaries, continuity, and contact. Noûs, vol. 31, n°1, pp. 26-58.

Varzi A. (2007). Spatial reasoning and ontology: parts, wholes, and locations. In Aiello, M., Pratt-Hartmann, I., van Benthem, J. (Eds.), Handbook of Spatial Logics. Berlin: Springer. Pp. 945-1038

Velasco-Forero S., Angulo J. (2011). "Mathematical morphology of vector images using statistical deph". In Mathematical morphology and its applications to image and signal processing. Soille P., Pesaresi M., Ouzounis G. K. (Eds.). Heidelberg: Springer. Pp. 355-366.

Veltz P. (1996). Mondialisation, villes et territoires : une économie d'archipel. Paris : PUF.

Veltz P. (2005). Mondialisation, villes et territoires : une économie d'archipel. Paris : PUF. Réédition revue et augmentée.

Von Eckardt W., Gottman J. (1964). The Challenge of Megalopolis: A Graphic Presentation of the Urbanized Northeastern Seaboard of the United States, New York: Macmillan.

Weber C., Puissant A. (2003). "Urbanization pressure and modeling of urban growth: example of the Tunis Metropolitan Area". Remote sensing of environment, n°86, pp. 341-352.

Weeks J. R. (2003). "Does Night-Time Lighting Deter Crime? An Analysis of Remotely–Sensed Imagery and Crime Data". In Victor Mesev (ed.). Remotely–Sensed Cities. London: Taylor & Francis.

Weidong L., Chongping J., Xiaoyan J., Zhong J. (2005). "Relationship between NDVI and the urban heat island effect in Beijing area of China". In Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability II. Wei G., Shaw D. R. (Eds.). Proceedings of the SPIE, vol. 5884, pp. 518-529.

Welch R. (1980). Monitoring Urban Population and Energy Utilization Patterns. From Satellite Data. Remote Sensing of Environment, 9, pp. 1-9.

Weng Q. (2001). "A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang delta, China". International Journal of Remote Sensing, n°22, pp. 1999-2014.

Weng Q. (2010). Remote sensing and GIS integration. Theories, methods and applications. New York: MacGraw Hill, 433 pages.

Widlowski J. L., Lavergne T., Pinty B., Verstraete M., Gobron N. (2004). "Rayspread: A virtual laboratory for rapid BRF simulation over 3-D plant canopies". In Computational methods in transport. Graziani F. (Ed.). Berlin : Springer. Pp. 211-228.

Wilkinson G. C. (1996). "A review of current issues in the integration of GIS and remote sensing data". Internationa Journal of Geographic Information Systems, n°10, pp. 85-101.

Wilkinson M. H. F. (2011). "Hyperconnections and openings on complete lattices". In Mathematical morphology and its applications to image and signal processing. Soille P., Pesaresi M., Ouzounis G. K. (Eds.). Heidelberg: Springer. Pp. 73-84.

Williams J. (2001). GIS processing of geocoded satellite data. Chichester: Springer and Praxis Publishing, 327 pages.

Winston M., Chaffin R., Herrmann D. (1987). A Taxonomy of part-whole relations. Cognitive Science. Vol. 11,n° 4, pp. 417-444.

Wurm M., Taubenböck H., Roth A., Dech S. (2009). "Urban structuring using multisensoral remote sensing data". Proceedings of the Urban Remote Sensing Joint Event 2009, Shanghai, Chine, pp. 1-8, 20-22 mai 2009.

Zelinski W. (1979). "The hypothesis of the mobility transition. Geographical review", vol. 61, n°2.

Zelinsky W. (1971). "The Hypothesis of the Mobility Transition". Geographical Review, vol. 61, pp. 219-249.

Zelinsky W. (1979). "The Demographic transition: Changing patterns of migration", Actes de la conférence, Science au service de la vie, Institut de la vie - UIESP, pp.165-189.

Zhang Q., Wang J., Peng X., Gong P., Shi P. (2002). "Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multitemporal Landsat TM data". International Journal of Remote Sensing, n°23, pp. 3057-3078.

Zhang Y. (1999). "Optiminisation of building detection in satellite images by combining multispectral classification and texture filtering". Journal of photogrammetry and remote sensing, vol. 54, n°1, pp. 50-60.

Zhang Y., Pulliainen J., Koponen S., Hallikainen M. (2002). "Application of an empirical neural network to surface water quality estimation in the Gulf of Finland using combined optical data and microwave data". Remote sensing of environment, vol. 81, n°2-3, pp. 327-336.

Zhao N., Currit N., Samson E. (2011). "Net primary production and gross domestic product in China derived from satellite imagery". Ecological Economics, vol. 70, n°5, pp. 921-928.

Zhu Z., Kanade T. (2008). "Modeling and representations of large-scale 3D scenes". International journal of computer vision, vol. 78, n°2–3, pp. 119–120.

Zhu Q., Hu M., Huang L. (2009). “Dynamic representation of 3D house property Based on the hierarchical events”. Geomatics and Information Science, vol. 34, n°, pp. 326-330.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : premières images DMSP utilisées pour la reconnaissance des métropoles nord-américaines (1974). 26
Figure 2 : agrégation par données individuelles de base. 102
Figure 3 : agrégations successives (par emboîtement). 102
Figure 4 : organigramme méthodologique. 104
Figure 5 : Intégration des bases de données géographiques et images dans le SIG (SGIMT). 107
Figure 6 : géo–visualisation 2D de la structure urbaine de la région de Delhi en 1992 et en 2009 faite à partir des images DMSP-OLS F-10 et F-16. 109
Figure 7 : géo–visualisation 2D/3D statique de la structure urbaine de la région de Delhi en 1992 et en 2009 intégrant le poids démographique (hauteur), générée à partir de traitements effectués sur DMSP F10 et F-16, fusionnée avec la base de données des densités de population. 109
Figure 8 : organigramme méthodologique. 111
Figure 9 : thermicité du pont de Kenitra, Maroc. 116
Figure 10 : spatialisation des erreurs d'une base de données géographiques vectorielles et d'un scan Topo IGN, Landes, France. 118
Figure 11 : signatures spectrales de toitures produites à partir des images hyper–spectrales DAIS 79. 119
Figure 12 : reconnaissance de la végétation, Nouakchott, Mauritanie à partir de données multi–spectrales Kompsat-2. 121
Figure 13 : croissance urbaine de Delhi entre 1992 et 2009 (DMSP-OLS F-10 et F-16). 140
Figure 14 : images Météosat-8 sélectionnées (28 janvier 2004 à 12 heures). 142
Figure 15 : niveaux de végétalisation en 2004, 2005 et 2006. (zone d'extension du domaine bioclimatique). 144
Figure 16 : détection des territoires urbains et des conurbations (Sénégal) en 2004, 2005 et 2006 et des territoires urbains et des conurbations (Gambie, Guinée-Bissau, Guinée Conakry) en 2004, 2005 et 2006. 145
Figure 17 : organigramme méthodologique. 147
Figure 18 : résultats de filtres sur la détection et la reconnaissance des objets urbains (Nouakchott) (Conakry). 148

Figure 19 : résultats de filtres sur la détection et la reconnaissance des objets urbains (Dakar). 149
Figure 20 : identification des pôles secondaires sur les néo–canaux des analyses en composantes principales. 150
Figure 21 : classification 2004 : exemple d'identification des pôles secondaires en milieu tropical humide. 151
Figure 22 : classification en iso–clusters 2005 : exemple de Dakar, M'Bour-Sally (petite Côte) en milieu tropical sec, Nouakchott et Nouadhibou en milieu désertique. 152
Figure 23 : classification en iso–clusters 2006 : exemple de Bissau (milieu tropical humide) et de l'archipel du Cap-Vert (Ile de Santiago). 153
Figure 24 : changement d'occupation du sol entre 2004 et 2005, Nouakchott. 154
Figure 25 : changement d'occupation du sol entre 2005 et 2006, Dakar, petite Côte, Banjul. 155
Figure 26 : reconnaissance et identification des objets géographiques – Analyse contextuelle. 159
Figure 27 : organigramme méthodologique. 160
Figure 28 : reconnaissance des bâtiments par traitements structuraux, morphologiques et texturaux. 161
Figure 29 : numérisation interactive de la croissance urbaine de Nouadhibou (Mauritanie) entre 1985, 2000 et 2008. 161
Figure 30 : reconnaissance de la ville de Jaipur. 162
Figure 31 : classification morphologique sur une image panchromatique Spot-3. 163
Figure 32 : organigramme méthodologique. 165
Figure 33 : classifications (Maxlike-1992-Landsat-5 TM) (KNN-2001-Landsat-7 ETM+), Mumbai, Inde. 168
Figure 34 : calcul du nombre de classes (répartition statistique). 169
Figure 35 : exemples de résultats de classification automatique K–means sur des images multi–spectrales Kompsat-2 (Kaunas, Lituanie). 171
Figure 36 : création d'une base de données vectorielles du bâti. 175
Figure 37 : phases de traitement. 177
Figure 38 : répartition statistique. 181
Figure 39 : segmentation interactive (image recodée sur 64 bits). 182
Figure 40 : choix des néo–canaux de la TKL : Néo–canaux 2, 3 et 4. Filtrages directionnels et Laplaciens. Fusion. 182
Figure 41 : RSI, génération de la spatio–carte orientée objet vectorielle et de la base de données morpho–métriques orientée objet. 183
Figure 42 : reconnaissance du bâti et confusion. 186
Figure 43 : analyse des résultats issus de la TKL. 187

Figure 44 : modèle numérique d'élévation et resconstruction 190

volumique. .....
Figure 45 : image satellite d'une portion de l'espace géographique de Kaunas. 191
Figure 46 : exemple de détermination de la valeur des angles. 191
Figure 47 : projection d'un bâtiment sur un plan. 192
Figure 48 : modélisation volumique d'une portion de la ville de Kaunas. 192
Figure 49 : organigramme méthodologique. 193
Figure 50 : identification et extraction des matériaux de toiture. 195
Figure 51 : identification des matériaux de toiture. 196
Figure 52 : identification des matériaux de toiture (usines, maisons, immeubles). 196
Figure 53 : identification de toitures en zinc. 197
Figure 54 : identification des bâtiments (industriels, enfouis, etc.). 198
Figure 55 : identification du bâti et du réseau viaire. 200
Figure 56 : identification de la végétation urbaine. 201
Figure 57 : identification de la végétation urbaine en milieu désertique. 202
Figure 58 : intégration multi–données. 209
Figure 59 : intégration des données par géo-référencement. 210
Figure 60 : exemple d'alpha–connexion sur une matrice raster. 214
Figure 61 : organigramme méthodologique. 218
Figure 62 : normalisation géométrique des cartes et images satellites. .. 219
Figure 63 : visualisation de la modification du tracé hydrographique (source possible d'erreurs) lors de l'intégration des bases de données géographiques générées à partir d'images satellites et de cartes. Exemple du fleuve Niémen, Kaunas. ... 220
Figure 64 : visualisation d'une base de données géographiques intégrée. Corridor Delhi–Mumbai, Inde. 220
Figure 65 : organisation par méta–fichiers. 221
Figure 66 : organisation fonctionnelle du SGIMT. 222
Figure 67 : organisation fonctionnelle du SGIMT (suite). Décomposition du SGBD. 223
Figure 68 : organigramme méthodologique. 224
Figure 69 : extrait d'une simulation de la croissance urbaine de la région de Delhi entre 2002 et 2006, Inde. 232
Figure 70 : organigramme méthodologique. 233
Figure 71 : Géo–visualisation 3D de la simulation empirique de la croissance urbaine de la région d'Udaipur, Inde. 234
Figure 72 : phases de création du modèle numérique de terrain. 239
Figure 73 : génération du MNT de la région d'Udaipur (Inde). 240
Figure 74 : extrait du MNT Delhi–Mumbai, Inde (Delhi–Ahmedabad) fusionné avec le résultat de l'extraction des centres urbains à partir d'une scène DMSP-OLS en 2007. 241
Figure 75 : exemple d'erreurs. 242
Figure 76 : exemple de pixels aberrants, Kaunas, Lituanie. 242

Figure 77 : génération du MNT, Kaunas, Lituanie. 243
Figure 78 : MNT fusionné avec le résultat d'une classification de l'occupation des sols, Kaunas, Lituanie. 243
Figure 79 : un processus polarisé et spatialement discontinu. 258
Figure 80 : exemples des corridors Delhi–Mumbai et Klaïpeda–Moscou–Kiev. 260
Figure 81 : exemples d'indicateurs de l'urbanisation : exemple de marqueurs temporels des futures zones d'extension de l'urbain. 265
Figure 82 : marqueur spatial de changement (étalement urbain et réseau routier) simulé empiriquement (exemple de Jaipur, Inde). 265
Figure 83 : exemple de mesures d'élévation du niveau de vie (économique) : capacité à rénover et à acheter du pavillonnaire neuf (exemple de Kaunas, Lituanie). 267
Figure 84 : corridors d'échanges économiques en Lituanie. 269
Figure 85 : structure urbaine et territoriale de la Lituanie soviétique. ... 270
Figure 86 : reconnaissance d'un des combinats de Kaunas et des zones d'habitats HLM pour les ouvriers, ingénieurs et employés de la période soviétique. 272
Figure 87 : reconnaissance de l'évolution du dipôle Kaunas–Vilnius entre 1992-2000–2009. 272
Figure 88 : conurbation en 1991. 274
Figure 89 : baisse de la population (pic de 2010). 275
Figure 90 : structure urbaine de la Lituanie et de l'enclave de Kaliningrad en 1989. 279
Figure 91 : simulation 1989–2001. 280
Figure 92 : structure urbaine de la Lituanie et de l'enclave de Kaliningrad en 2000. 281

Figure 93 : densification des espaces intra–urbains et croissance urbaine. 283
Figure 94 : structure urbaine de la Lituanie et de l'enclave de Kaliningrad 1989–2001–2007. 284
Figure 95 : urbanisation, périurbanisation et diffusion de l'habitat en zone rurale (1989–2007). 286
Figure 96 : extrait de la simulation de l'urbanisation (1989–2007), axe Kaunas–Vilnius. 288
Figure 97 : exemple d'Alytus. 289
Figure 98 : développement urbain de la ville de Kaunas de 1861 à 2007. 290
Figure 99 : représentation des trois phases de développement urbain. . 292
Figure 100 : évolution démographique de Kaunas. 293
Figure 101 : évolution démographique de Klaïpeda. 294
Figure 102 : évolution démographique de l'axe Panevezys–Siauliai. 295

Figure 103 : évolution de la portion de corridor Kaunas–Vilnius–Minsk (1986-2007) (extrait du modèle de simulation). 297
Figure 104 : croissance urbaine de l'agglomération de Minsk entre 1989 et 2007. 299
Figure 105 : transformations de la structure paysagère de la région de Sovetsk–Tilsit (1988-2000-2006). 301
Figure 106 : exemple de croissance de l'urbanisation 1998 (noir) – 2000 (violet) – 2006 (orange) (Sovetsk–Tilsit). 302
Figure 107 : fragmentation du parcellaire agricole en Lituanie (Sovetsk–Tilsit). 303
Figure 108 : croissance urbaine et fragmentation du parcellaire agricole (1988–2006). 305
Figure 109 : transformation du paysage agricole et de la structure spatiale lituanienne / permanence de la structure spatiale agricole russe (1988–2006). 306
Figure 110 : structure parcellaire agricole de 2000 obtenue par reconnaissance morpho–métrique superposée sur une composition colorée Landsat-5 TM de 1988 représentant le parcellaire soviétique (exemple de la ville frontière de Kybartai). 307
Figure 111 : structures parcellaires agricoles de 2000 (rouge transparent) et de 2006 (jaune) obtenues par reconnaissance morpho–métrique superposées sur une composition colorée Landsat-5 TM de 1988 représentant le parcellaire soviétique. 308
Figure 112 : transformation du paysage agricole et de la structure spatiale polonaise / permanence de la structure spatiale agricole russe (1988–2006). 310
Figure 113 : croissance urbaine 1988–2000–2006. 311
Figure 114 : densification du réseau routier 1988–2006 (reconnu uniquement par télédétection spatiale moyenne résolution Landsat). 312
Figure 115 : croissance urbaine et croissance du couvert forestier (2000–2006). 313
Figure 116 : transformation des pratiques agricoles (1988–2006). 314
Figure 117 : modélisation de la croissance forestière. 317
Figure 118 : exploitation du parcellaire forestier. 318
Figure 119 : ensemble des coupes (marron) faites sur les parcelles forestières (vert) entre 1988 et 2006 (région de Binténai–Keleriskiai). 319
Figure 120 : exemple d'évolution du couvert forestier (vert) et de la surface des coupes (kaki). 319

Figure 121 : corridor de transport (hinterland) Delhi–Ahmedabad– 322

Bombay. .....
Figure 122 : structure spatiale de la région urbaine de Delhi en 2009. 323
Figure 123 : modélisation et simulation empirique de la croissance urbaine de la région de Delhi. 326
Figure 124 : évolution du corridor de développement Delhi–Ahmedabad–Mumbai (1990–2007). 329
Figure 125 : géo–visualisation 2D/3D du corridor Delhi–Ahmedabad–Mumbai (2000), vue Est–Nord–Est. 330
Figure 126 : simulation empirique de l'évolution de la structure territoriale (2002–2007). 331
Figure 127 : extension du bâti en 2002 (extrait du bâti d'une scène multi–spectrale Spot-4 drapé sur un SRTM 2 – vue en direction du Nord). 332
Figure 128 : évolution de l'urbanisation 1990–2007 (diachronie faite à partir de scènes Landsat-5 TM de 1990, Landsat-7 ETM + de 2001 et DMSP OLS F-15 de 2007. 332
Figure 129 : évolution de la région de Delhi (simulation). 333
Figure 130 : région urbaine métropolisée d'Ahmedabad. 333
Figure 131 : croissance de Surat entre 1990 et 2000 (reconnaissance, extraction et vectorisation des objets urbains sur des scènes multi–spectrales Landsat-5 TM et Landsat-7 ETM+. . 335
Figure 132 : croissance urbaine littorale. 336
Figure 133 : urbanisation 1990–2007. 337
Figure 134 : une croissance urbaine soutenue et polarisée (1990–2007). 338
Figure 135 : schéma de la structure urbaine 2007 fusionnée avec la base de données « routes » de la NGA. 338
Figure 136 : résultat de la reconnaissance et de l'extraction des objets bâtis. 340
Figure 137 : identification d'indicateur prédictif de l'urbanisation. 342
Figure 138 : urbanisation routière. 343
Figure 139 : géo–visualisation 3D dynamique de la simulation de la croissance urbaine de Jaipur. 344
Figure 140 : croissance urbaine de la région de Jaipur (1975–2008). 344
Figure 141 : schéma de la structure spatiale de la région urbaine de Jaipur. 345
Figure 142 : géo–visualisation 3D d'un front d'urbanisation à l'Est de Jaipur (généré à partir d'une scène multi–spectrale Kompsat-2 de 2007 et d'un MNT SRTM 2. 346
Figure 143 : croissance urbaine en zone rurale (Est de Jaipur) (résultat de l'axe 1 de la transformée de Karhunen–Loeve, Spot 3 XS, 2008). 347

Figure 144 : identification des bâtiments industriels par télédétection à

partir d'une scène multi–spectrale Kompsat-2 (haut : transformée ensembliste), (bas : extraction par segmentation structurale). On notera que les bâtiments en couleur bleue sont des bidonvilles. 348

Figure 145 : organigramme méthodologique de construction du SIG patrimoine. 355
Figure 146 : le système d'information géographique du patrimoine culturel, historique et architectural du centre de Jaipur. 356
Figure 147 : extrait de couches au format vectoriel du patrimoine culturel, historique et architectural du centre de Jaipur. 357
Figure 148 : génération d'itinéraires. 359
Figure 149 : extrait de carte d'itinéraire de visite produite à partir du SIG : parcours 1 « Face–to–Face ». 359
Figure 150 : extrait du SGIMT sur l'Afrique de l'ouest [MNT, MNB, bases de données routes (marron), BD frontières (rouge), BD villes (points)]. 363
Figure 151 : corridor Tanger–Dakar. 366
Figure 152 : croissance urbaine de Nouadhibou (1985–2008). 367
Figure 153 : croissance urbaine, croissance de la population (1985–2008). 367
Figure 154 : extrait des données géographiques, aériennes et spatiales utilisées à partir du SGIMT. 369
Figure 155 : reconnaissance de Mbour par le calcul du NDVI (Landsat-7 ETM+, 2009). 370
Figure 156 : structure urbaine en 2009 (Banjul : 2002). 373
Figure 157 : croissance de Nouakchott (1988-2008). 374
Figure 158 : croissance urbaine, croissance de la population. 375
Figure 159 : croissance urbaine littorale Dakar–Mbour (1954-2007). 375
Figure 160 : identification d'un seuil d'urbanisation. 377
Figure 161 : concomitance entre croissance urbaine et croissance démographique. 378
Figure 162 : croissance urbaine de Banjul (1998-2002). 379
Figure 163 : ségrégation socio–spatiale de Praia (générée à partir d'une scène multi–spectrale Kompsat-2 de décembre 2006). 381
Figure 164 : quartier extra–territorialité britannique de Porto de Sao Francesco (« Sambala village »). 383

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : démarche multi–niveaux, multi–capteurs. 99

Tableau 2 : résolution spatiale, échelle cartographique, niveau géographique. 101

Tableau 3 : primitives de l'image utilisées dans l'approche « région ». . 131

Tableau 4 : méthodes de segmentation. 133

Tableau 5 : niveau de détection par bande spectrale et année. 143

Tableau 6 : résultats du niveau de reconnaissance des objets géographiques. 170

Tableau 7 : caractéristiques des images Kompsat-2. 176

Tableau 8 : extrait de paramètres géométriques et physiques. 181

Tableau 9 : caractéristiques du satellite Egyptsat1. 187

Tableau 10 : apports des bases de données à la télédétection. 207

Tableau 11 : approche multi–échelles, multi–capteurs. 211

Tableau 12 : niveaux d'intégration Télédétection–SIG–Analyse spatiale. 213

Tableau 13 : niveaux d'intégration Télédétection–SIG–Analyse spatiale. 215

Tableau 14 : caractéristiques du modèle de simulation empirique. 231

Tableau 15 : tableau des MNT SRTM mosaïqués et intégrés dans le SGIMT (axe Delhi–Mumbai). 237

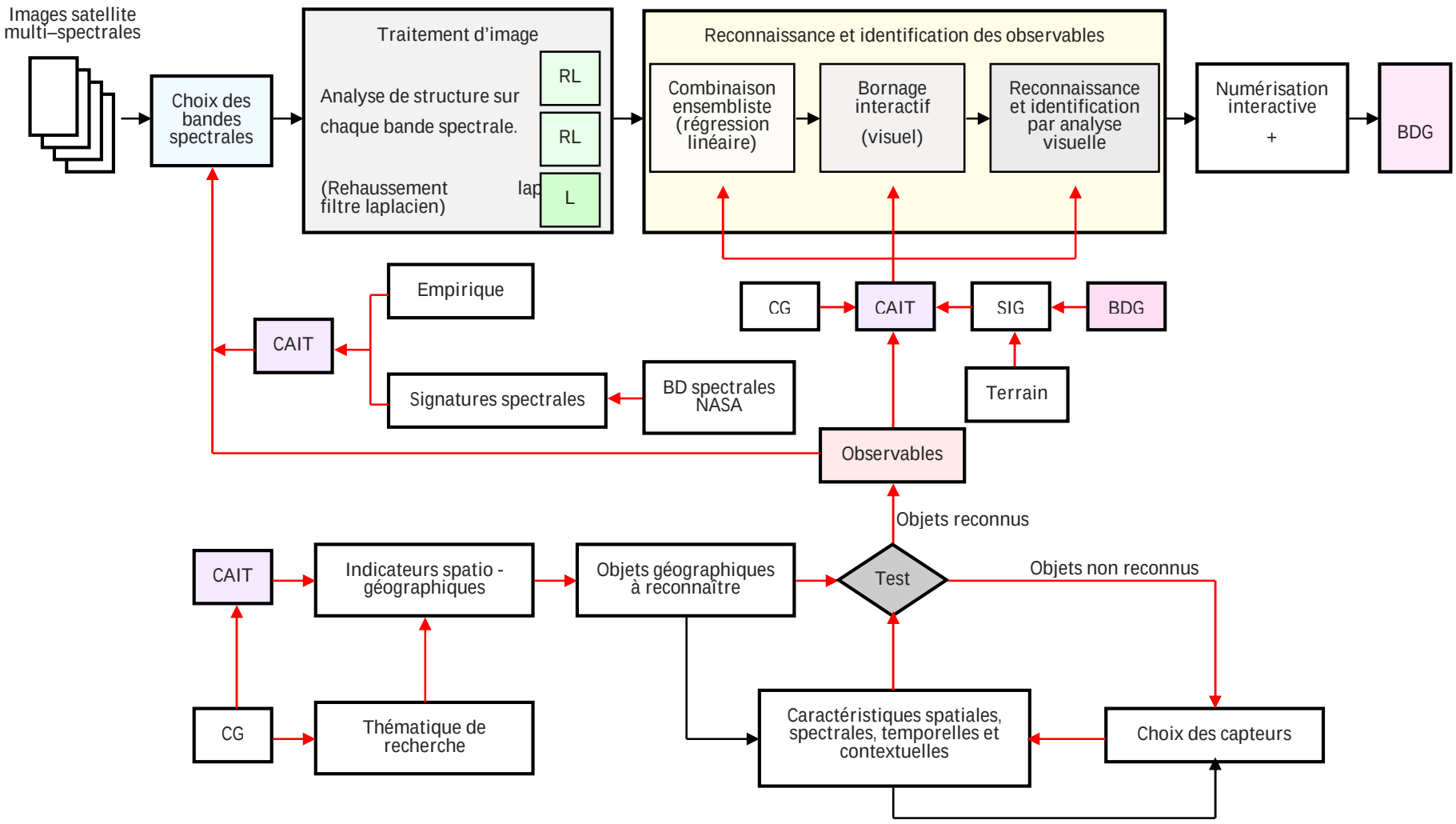
Tableau 16 : indicateurs géographiques. 263

Tableau 17 : système urbain hiérarchisé letton. 280

Tableau 18 : évolution du parcellaire agricole. 306

Tableau 19 : évolution des surfaces forestières. 321

Reconnaissance et identification des objets géographiques – Analyse contextuelle



Légende :

- BD : base de données
- BDG : base de données géographiques
- CAIT : connaissances en analyse d'images de télédétection
- CG : connaissances géographiques