



La télédétection au service des études urbaines : expansion de la ville de Pondichéry entre 1973 et 2009

EMILIEN KIEFFER,

FACULTÉ DE GÉOGRAPHIE
EMILIEN.KIEFFER@LAPOSTE.NET

AZIZ SERRADJ,

LABORATOIRE IMAGE, VILLE, ENVIRONNEMENT,
UMR 7362 CNRS/UNISTRA
AZIZ.SERRADJ@LIVE-CNRS.UNISTRA.FR

L'étalement urbain constitue, depuis une trentaine d'années, un processus majeur dans les pays en voie de développement tels que l'Inde. Les capteurs numériques de télédétection spatiale, depuis leur apparition au cours de la décennie 1970, ont été sollicités afin de fournir des images aux résolutions spatiales et spectrales adéquates pour appréhender le phénomène d'expansion urbaine. Devenus de véritables outils de planification et d'aménagement des villes, via les nombreuses applications qui leur sont subordonnées (occupation des sols, gestion des risques, gestion des sols imperméabilisés, etc.), les données de télédétection ont encore un bel avenir devant elles. C'est justement grâce aux images satellitaires, notamment celles du programme Landsat, qu'il a été possible de réaliser une étude visant à qualifier et à quantifier l'évolution de l'étalement urbain d'une ville indienne : Pondichéry. Entre 1973 et 2009, une succession de traitements basés sur la classification supervisée « *Spectral Angle Mapper* » (ou angle spectral) a été menée afin d'extraire le bâti des clichés satellitaires successifs : entre 1988 et 2009, un phénomène d'expansion urbaine important, lié en grande partie au développement du réseau autoroutier indien, a ainsi été mis en évidence.

également des ruches de créativité, d'innovation et de pouvoir. Malheureusement, elles sont aussi bien souvent les témoins d'un clivage, encore trop présent, entre richesse et pauvreté. La ville moderne, malgré tous les avantages dont elle sait tirer parti pour attirer toujours plus de population, demeure néanmoins source de pollution, de maladies, d'instabilité politique et d'inégalités sociales.

À l'heure où l'utilisation des images satellitaires se généralise à de nombreux domaines d'activités, la télédétection est devenue, depuis une trentaine d'années, une source d'information essentielle en matière d'urbanisation. Véritable outil de planification et de rétrospective, elle a pu être utilisée dans le cas de la ville de Pondichéry (Inde) afin de déterminer l'évolution de sa Zone Morphologie Urbaine¹ entre 1973 et 2009, à partir d'images Landsat.

Introduction

Les villes constituent le principal foyer d'accueil de la croissance démographique. Depuis plusieurs décennies, la rapide expansion des grandes agglomérations de

par le monde, et les transformations des paysages urbains qu'elle engendre, font partie des défis auxquels l'Homme moderne doit faire face. Les villes sont le moteur du développement économique mondial, mais

1. « Zone Morphologie Urbaine » ou ZMU, formée par la continuité du bâti de Pondichéry (pas de coupures de plus de 200 mètres entre deux constructions) et une population minimale de 2 000 habitants. Ces seuils résultant de recommandations adoptées à l'échelle internationale (INSEE, 2013).

L'urbanisation en Inde

Pour bien appréhender le thème de l'urbanisation en Inde, il est nécessaire de comprendre comment la ville est perçue, quels sont ses mécanismes et ses dynamiques.

La structure de la ville indienne

On pourrait schématiser la structure de la ville indienne en deux modèles ségrégués : celui de la ville hindouiste, avec la répartition géographique particulière des castes et des activités, et celui de la ville coloniale, qui oppose quartiers blancs et ville indigène. À ces deux modèles se serait surimposé celui supposé égalitaire, lancé par la politique urbaine de l'Inde indépendante, donnant à l'État un rôle niveleur qu'il n'a finalement pas réussi ou voulu concrétiser. En effet, les déficiences de l'État bâtisseur, les lacunes de l'État encadreur et la puissance des lois du marché se sont combinées pour renforcer des ségrégations spatiales, traduisant des différences socio-économiques qui n'avaient en fait jamais cessé d'exister. On n'oubliera cependant pas qu'au-delà de cette hétérogénéité interne, il existe souvent un fort sentiment d'identité urbaine partagé par l'ensemble de la population ; et que, d'autre part, malgré tous les dysfonctionnements, crises et goulots d'étranglement, la ville fonctionne – mieux, elle se développe (Landy, 2002).

La montée en puissance des mégalo-poles

Par rapport à la relative stagnation coloniale, l'accélération de la croissance urbaine multiplie par 4,6 le nombre des citadins

entre 1951 et 2001. Si la part de la population urbaine dans la population totale reste modeste, il n'en reste pas moins que le nombre des villes millionnaires passe de quatre en 1951 (19 % de la population urbaine) à douze en 1981 (27 %) puis à trente-cinq en 2001 (38 %). La taille moyenne des unités urbaines passe de 22 000 habitants en 1951 à 48 000 en 1981 et 65 000 en 2001. Les quatre principales métropoles constituent les sommets d'un losange et trois sont des ports, anciens comptoirs coloniaux fondés au XV^e siècle par la Compagnie Anglaise des Indes Orientales : Mumbai, Calcutta et Madras. Seule New-Delhi est en position continentale, et son essor est lié à son inscription au cœur des riches plaines densément peuplées de l'Inde du Nord ainsi qu'à ses fonctions de capitale. En 2005, le taux d'urbanisation du pays était de 28 %, contre 11,2 % en 1921 (Bardot, 2007).

Une sur-urbanisation incontrôlée

Si depuis l'indépendance, le gouvernement indien s'est montré très volontariste en matière de politique industrielle, mais se révéla plus timide en matière de politique urbaine. Jusqu'en 1975 (au moins), on pensait planification sectorielle (agriculture, énergie, industrie) beaucoup plus que politique spatiale ; on voulait, en quelque sorte, l'industrialisation sans l'urbanisation. Malheureusement, le phénomène d'exode rural que les pays développés ont connu durant les années 1970 s'est également produit en Inde à partir des années 1980-1990, à mesure que les villes cumulaient plus d'emplois que les campagnes, notamment grâce

aux investissements étrangers dans l'industrie manufacturière ; c'est en second lieu la croissance démographique mal maîtrisée qui provoqua un bouleversement dans la répartition de la population sur le territoire indien.

Conjugué à l'exode rural, le solde naturel urbain a produit un accroissement de population dépassant les capacités d'accueil en termes de logements, d'emplois et de services. Le manque d'emplois industriels et la part importante d'un tertiaire considéré comme parasite servent à décrire ce qui est désigné comme l'hyper-urbanisation ou sur-urbanisation, c'est-à-dire un développement artificiel sans réel fondement économique. L'afflux des néo-urbains est rendu responsable de dysfonctionnement moraux : déclin de la solidarité familiale traditionnelle, délinquance des jeunes, acculturation, risques sanitaires. On décèle la répétition d'un jugement déjà porté par les hygiénistes européens sur leurs villes au siècle précédent : les quartiers insalubres et taudis concentrent l'ensemble des problèmes. Les bidonvilles, ou « *slums* », comme on les appelle en Inde, vont très rapidement constituer un type d'habitat à part entière et typique du développement incontrôlé des villes. Le manque de logements pour accueillir les nouvelles populations en situation de précarité conduit à l'implantation illégale de nombreuses constructions de fortune. Formant de véritables quartiers, les *slums* concentrent toute la misère du peuple indien : illettrisme, insalubrité, chômage et surtout inégalités sociales. Au couple d'opposition ville indigène/ ville coloniale succède ainsi celui de ville légale/ ville spontanée (Louiset, 2011).

Pondichéry, riche de son territoire et de son histoire

Pour comprendre le territoire étudié et répondre à la problématique, il est également nécessaire de recueillir certaines caractéristiques physiques et humaines de la ville de Pondichéry.

Géographie

Le long de la côte Sud-Est de l'Inde, située à une distance de 180 km au Sud de Madras, au bord de la Baie du Bengale, dans l'État du Tamil Nadu, Pondichéry, chef-lieu du territoire d'union du même nom, est une région fascinante en raison de sa beauté et de la diversité de son patri-

plaine, sur le bassin versant de la rivière Gingee, dont les inondations produisent des terres extrêmement fertiles. Malgré cela, le district de Pondichéry est entièrement dépourvu de zones forestières.

De type tropical à longue saison sèche (où les précipitations sont inférieures à deux fois la température : de janvier à juillet), le climat de Pondichéry est caractérisé par des températures moyennes annuelles de 28 °C pour des précipitations annuelles totales de 1 427,4 mm. La part la plus importante des épisodes pluviométriques ayant lieu à l'automne².

Économie

La haute fertilité des sols apportée par les inondations régulières des rivières environnantes et le climat tropical qui règne dans la région favorisent la croissance de nombreuses cultures agricoles et maraichères telles que le riz, les arachides, les noix de coco, piments et d'autres légumes. Ainsi, l'agriculture fait partie des principales sources de revenus pour les populations locales, au même titre que la pêche, le tourisme et l'industrie (produits chimiques, textiles, métaux et produits alimentaires finis) (MapsOfIndia, 2013).

Populations

Au dernier recensement Indien datant de 2011, Pondichéry dénombrait plus de 675 000 habitants, avec un taux d'alphabétisation moyen de 76 %, supérieur à la moyenne nationale (59,5 %).

La majorité des Pondichéryens parle le tamoul, le télougou ou le

malayalam (India Census, 2011). La communauté française de Pondichéry, ainsi qu'un certain nombre d'institutions françaises comme le consulat, l'Institut français, l'Alliance française et le Lycée français continuent d'employer la langue de Molière, héritée des colons du XVII^e siècle. Il y existe également une importante communauté d'Indiens d'autres États de l'Inde, notamment du Bengale-Occidental, du Gujarat et Orissa. En termes de religions, Hindouisme, Christianisme et Islam coexistent sans difficultés.

La télédétection pour l'étude des zones urbaines

Avec les récentes innovations en matière de techniques d'observation de la Terre (capteurs, satellites, données), la télédétection « urbaine » ou les « applications urbaines de la télédétection » ont rapidement gagné en popularité auprès des urbanistes et plus généralement des administrations chargées de l'aménagement des territoires. En effet, la télédétection permet d'augmenter notre compréhension des zones urbaines de différentes manières, bien que le réel potentiel de cette technique soit souvent contesté par la complexité de l'environnement urbain lui-même (Xiaojun, 2011).

En Amérique du Nord

Différentes méthodes existent d'ores et déjà, dont une utilisant les images du satellite *Landsat TM*³ dans le but d'établir une classification de l'occupation du sol à Ottawa et Calgary (Ontario, Canada). Cette approche consiste, dans un



Figure 1 : Situation de la ville de Pondichéry dans le sous-continent indien.

moine naturel (voir localisation sur la figure 1). Elle couvre une superficie de 480 km² répartie sur quatre régions jouissant du statut de district. Pondichéry et ses territoires sont situés en

² Source : <http://nom-des-nuages.perso.sfr.fr/ombrothermique/>

³ Thematic Mapper : capteur fournissant de l'information permettant de réaliser des cartes thématiques.

premier temps, à produire deux produits de couverture terrestre indépendants mais rudimentaires, l'un fondé sur le profil spectral au niveau du pixel, et l'autre sur les segments délimitant des objets. Ces classifications sont ensuite fusionnées par une approche à base de règles pour générer un produit final qui améliore la précision des classes. Cette dernière est respectivement de l'ordre de 78 % et 73 % pour les classes urbaines « *habitation* » et « *commercial/industriel* ». La capacité du capteur de Landsat TM à détecter les zones résidentielles de faible densité est évaluée à partir des données de logement et de population provenant de photographies aériennes et du recensement canadien de 2001. Pour des densités de population supérieures à 3 000 habitants/km², la fraction de pixels étiquetés « *résidentiel* » reste constante en raison de l'incapacité du capteur à distinguer les immeubles d'appartements de grandes hauteurs des structures commerciales et/ou industrielles (Guindon *et al.*, 2004).

Une autre étude visait à explorer les méthodes d'analyse spatiale pour identifier les tendances générales et les motifs plus subtils des changements fonciers urbains dans la région métropolitaine de Kansas City aux États-Unis, à l'aide d'images *Landsat*. Ces dernières ont été utilisées pour générer des séries chronologiques de données d'occupation du sol au cours des trente dernières années. Les données de télédétection et les connaissances de terrain ont permis de caractériser les tendances à long terme et les motifs de l'étalement urbain. L'analyse des changements de la couverture terrestre de la métropole, du comté et de la ville révèlent qu'au

cours des trois dernières décennies, l'augmentation significative des terrains bâtis dans la zone d'étude empiétait principalement sur la couverture végétale non forestière. L'hétérogénéité spatiale et temporelle de ces changements a permis d'identifier des zones rapides et lentes d'expansions « *tentaculaires* ». Les résultats de l'analyse suggèrent qu'au niveau métropolitain ce sont à la fois les aires de végétation non forestière et de forêts qui ont été les plus fragmentées par le développement urbain, alors que les grands îlots boisés ont été moins touchés. Les statistiques montrent que cet effet sur le paysage affecte modérément le comté, et qu'il n'est que faiblement identifiable au niveau de la ville ; cela suggère un effet d'échelle que de grandes unités spatiales sont plus à même de mettre en évidence. L'interprétation de ces résultats permet ainsi de définir différentes étapes d'urbanisation scindées en deux directions majeures d'étalement sur l'aire métropolitaine. L'indice de consommation des terres (LCI en anglais : *Land Consumption Index*) a été conçu pour mettre en relation l'étalement urbain relevé par la télédétection avec les changements dans les types d'habitats et de constructions industrielles. Ils constituent les principaux facteurs explicatifs fournissant une mesure efficace de comparaison et de caractérisation de l'étalement urbain à travers les frontières juridiques et les périodes (Ji *et al.*, 2006).

En Inde

Jusqu'à la fin des années 1980, l'Inde était très dépendante de la photographie aérienne pour disposer d'informations spatiales utiles à la planification urbaine. Mais depuis 1988 et le lance-

ment de son premier satellite (IRS 1A) équipé d'un capteur LISS-I d'une résolution spatiale de 72,5 mètres, l'application de données de télédétection satellitaire a connu un essor majeur. Ce capteur pouvait acquérir des données dans quatre bandes spectrales (de 450 à 860 nm) et était principalement employé pour la cartographie de l'occupation des sols et de l'étalement urbain. Les satellites IRS-1C et 1D lancés en 1995 et 1996, équipés de capteurs LISS-III et LISS-IV avec des résolutions spatiales de 23,5 mètres, ont largement contribué à l'efficacité de leur utilisation en aménagement du territoire. Depuis, une douzaine de nouveaux satellites ont été lancés par le Programme spatial indien, embarquant des capteurs passifs de résolution submétrique mais également des capteurs actifs de type radar (RISAT-1 lancé en avril 2012).

Très tôt, dans les années 1970, l'Inde avait expérimenté les images fournies par les satellites *Landsat* pour les appliquer à la planification urbaine. Bien qu'elle ait décidé de lancer ses propres satellites à la fin des années 1990, elle continue d'utiliser les données fournies par la NASA afin de compléter celles qu'elle a acquises via son programme spatial (Netzband *et al.*, 2007).

Dans un autre travail de recherche, plus proche cette fois de Pondichéry, l'étalement urbain de la ville de Ajmer (Rajasthan, Inde) a été étudié à un niveau d'échelle moyen, sur une période de 25 ans (1977-2002), afin d'en extraire les informations relatives à l'organisation et l'évolution dans sa variabilité spatiale et temporelle. Des méthodes statistiques ont été utilisées pour la classification des images de télédétection

obtenues à partir de différents capteurs (Landsat MSS, TM, ETM+ et IRS LISS-III). L'étalement urbain et ses caractéristiques spatiales et temporelles ont été calculés à partir des images satellitaires classifiées ; l'entropie de Shannon et les relevés de terrain (cartes de densité de population) ont déterminé le phénomène spatial capable de définir la forme urbaine ; il a alors été possible d'établir la relation entre l'étalement urbain et ses facteurs de causalité. Les résultats révèlent que la croissance du territoire à Ajmer (160,8 %) est trois fois plus importante que la croissance de la population (50,1 %) sur une période de 25 ans (Mahesh Kumar Jat et al., 2008).

D'une manière générale, bien qu'aucune étude n'ait été réalisée à partir d'images satellitaires sur la ville de Pondichéry concernant son évolution spatiale et temporelle, le nombre de publications qui traitent des méthodes d'analyse de l'expansion urbaine sont nombreuses. Il ne faut cependant pas négliger les travaux et recherches de terrain qui ont été regroupés dans différents ouvrages. On y retrouve différentes approches qui tentent d'expliquer les logiques d'expansion des villes en Inde (Dupont, 2002, Oliveau, 2007), ou plus globalement dans les pays du Sud (Rocheffort, 2000) : sociologiques, démographiques, historiques, etc.

Le choix des images

Les images du programme *Landsat* sont fournies gratuitement par l'USGS. De plus, grâce aux archives de données satellitaires datant du lancement de Landsat 1 (ERTS-1) en 1972, il est possible d'obtenir une

série chronologique qui s'étend jusqu'en 2013, soit plus de quarante années d'acquisition à des résolutions spatiales et spectrales différentes.

Grâce à l'application *Web « Earth Explorer »* de l'USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov>), les images satellitaires Landsat de la ville de Pondichéry ont pu être téléchargées. Ces dernières devant répondre à certains critères pour pouvoir être utilisables dans le cadre de l'étude de la ZMU :

- ▶ Une couverture nuageuse quasi-nulle au-dessus de la ville ;
- ▶ Absence d'effets instrumentaux (lignes manquantes, bruit, rayures) ;
- ▶ Absence d'effets géométriques (distorsions principalement) ;
- ▶ Une couverture végétale optimale (et en été : d'avril à juin).

La réunion simultanée de ces trois critères étant impossible, il a fallu revoir l'intervalle temporel dans lequel le choix des images devait se faire : nous avons dû étendre ce dernier aux mois de février et de septembre afin de sélectionner quatre images pertinentes en termes de qualité pour répondre au sujet : février 1973, février 1988, septembre 2000 et juillet 2009. Le climat tropical à longue saison sèche de Pondichéry assure une couverture végétale quasi-permanente tout au long de l'année, bien que le maximum végétatif soit atteint en été.

Afin de traiter les images sélectionnées, le logiciel *Envi* dans sa version 4.8 a été utilisé, ainsi que le logiciel *ArcMap* en version 10.1, utilisé pour les opérations de post-traitements et de cartographie.

Opérations de traitement

Différentes opérations de traitement des images satellitaires « brutes » sont nécessaires afin d'en extraire les informations pertinentes et utiles à la mise en évidence du phénomène d'étalement urbain.

Pré-traitements

Dans cette étude, les images *Landsat* utilisées n'ont pas nécessité de pré-traitements du type corrections radiométriques ou géométriques, dans la mesure où elles ont été sélectionnées préalablement pour leur qualité et que l'USGS procède automatiquement aux améliorations des images avant de les rendre téléchargeables. Ainsi, les étapes de correction des distorsions induites par la rotation de la Terre, sa courbure, le tangage du capteur, l'orientation et le rapport d'aspect ont été évitées.

Géoréférences et découpages

Bien que les images sélectionnées soient toutes géoréférences selon le système de projection géographique WGS 1984 Zone 44 Nord, des décalages de plusieurs centaines de mètres ont été constatés entre celles de 1973/1988 et les plus récentes, 2000 et 2009. Il a donc été nécessaire de corriger ces erreurs de coordonnées en réalisant un géoréférencement semi-automatique à l'aide de points de contrôle, l'image de septembre 2000 ayant été utilisée comme image de référence pour rectifier les projections de celles de 1973 et 1988.

Étant donné la taille importante des scènes sélectionnées (185,2 x 185,2 km), il a égale-

ment été nécessaire de réaliser une extraction de la zone d'étude.

Opérations de classification

Les réponses spectrales des objets présents sur des scènes issues de capteurs satellitaires permettent de les caractériser et donc de les regrouper selon leur appartenance à une classe d'objets déterminés, on parle alors de classification. Ici, cette dernière est nécessaire pour extraire le bâti du non-bâti sur les images satellitaires de Pondichéry.

Choix des échantillons

Pour des raisons évidentes de fiabilité et de véracité, il a été décidé d'employer uniquement des méthodes de classification supervisées, basées sur l'utilisation d'échantillons relevés par l'utilisateur. Après avoir observé les images en composition colorée infrarouge et analysé les signatures spectrales d'objets communs et caractéristiques de chacune des images, cinq types d'objets ou classes d'échantillons ont pu être dégagés : le bâti de Pondichéry, les alluvions, l'eau, la végétation et les sols nus. Un grand nombre d'échantillons a été choisi pour chaque classe, afin d'englober un maximum de pixels dont les signatures spectrales sont assimilables à ces dernières. Bien que le bâti, les sols nus et les alluvions présentent des signatures spectrales ayant des allures similaires, les modulations de leurs valeurs permettent de les différencier.

En raison des écarts temporels qui séparent chaque image et des différences au niveau de l'occupation du sol que cela engendre (sols nus devenus sols cultivés ou inversement, étendues d'eau asséchées, mouvements des alluvions, etc.)

les mêmes échantillons n'ont pas pu être utilisés sur l'ensemble de la série. Il a donc fallu en créer de nouveaux pour chaque image, en respectant au maximum leur localisation sur les précédentes images et la pertinence des pixels qu'ils englobent.

De plus, d'autres séries d'échantillons ont dû être créées pour chaque image, afin de servir de références permettant d'estimer la qualité de la classification par une analyse quantitative réalisée à l'aide de la matrice de confusion.

Choix de la méthode de classification et description

Chaque méthode étant différente dans sa manière d'appréhender la classification de l'image, dans un premier temps ont été testées celles qui sont le plus fréquemment utilisées : maximum de vraisemblance, distance de Mahalanobis ; les résultats n'étant malheureusement pas à la hauteur des attentes, la réflexion s'est donc portée sur les mécanismes qui les composent. En effet, ces deux méthodes assignent chaque pixel à une classe en fonction de la distance qui sépare ce pixel du groupe de référence (distance de Mahalanobis) ou de la probabilité de lui ressembler (maximum de vraisemblance). Ces méthodes ne s'appuyant donc pas sur la valeur de chaque pixel mais sur les ensembles formés par les échantillons, une méthode de classification plus précise a été choisie : le *Spectral Angle Mapper* (SAM). Les différentes étapes relatives au processus de validation de la méthode SAM sont résumées sur la figure 3.

La classification SAM est une méthode automatisée permettant de comparer directement les signatures spectrales des

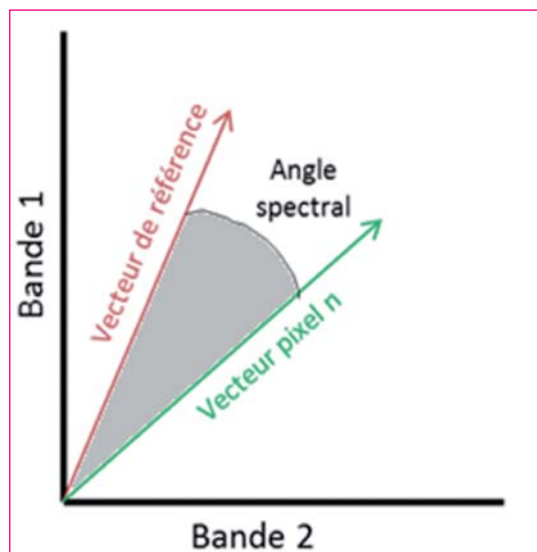


Figure 2 : Schéma explicatif de l'algorithme *Spectral angle mapper*.

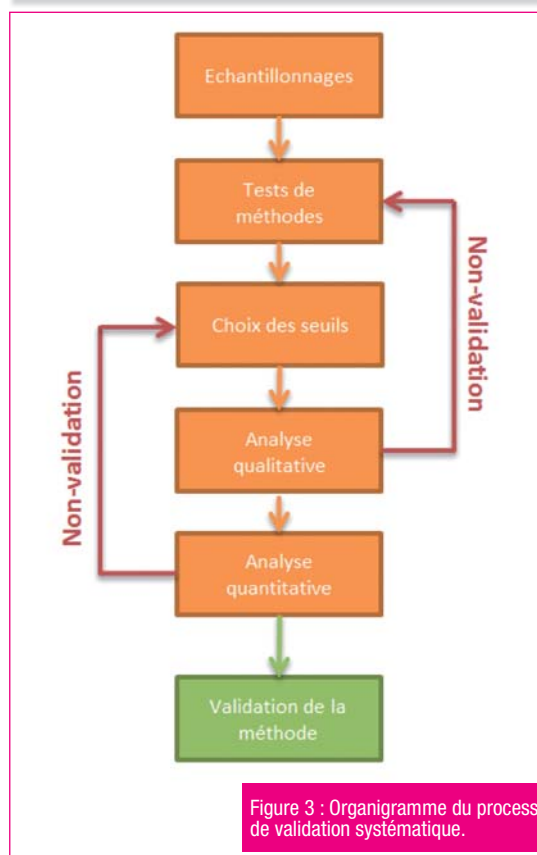


Figure 3 : Organigramme du processus de validation systématique.

pixels d'une image à une librairie spectrale connue (généralement déterministe et établie dans un laboratoire ou sur le terrain avec un spectromètre) ou à des échantillons prélevés sur l'image en question. Elle compare l'angle entre le vecteur du spectre de l'échantillon et le vecteur de chaque pixel dans

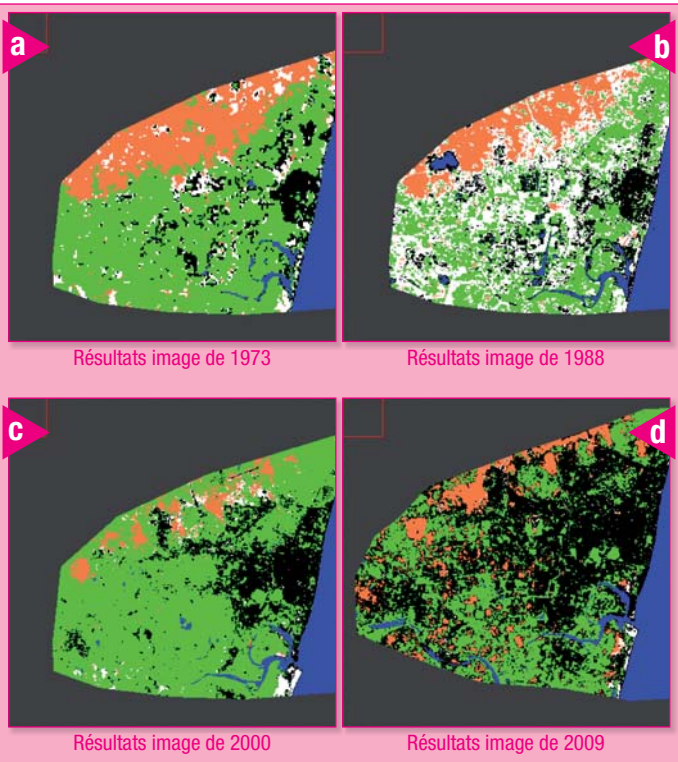


Figure 4 : Résultats de la classification SAM.

l'espace à n-dimensions que représente la signature spectrale de l'image. Les plus petits angles correspondent à une ressemblance étroite entre le pixel et le spectre de référence. Les signatures spectrales de pixels ayant des valeurs supérieures au seuil d'angle maximal spécifié en radians ne sont pas classées. Cette méthode est peu sensible à l'éclairement car elle utilise seulement la direction du vecteur et non sa longueur comme le montre la figure 2). Le résultat de la classification SAM est une image montrant la meilleure correspondance pour chaque pixel avec l'échantillon de référence compte tenu de l'angle formé par les vecteurs de leurs signatures spectrales (Kruse et al., 1993).

Afin de réaliser la classification, il a été assigné à chaque classe une valeur maximale d'angle spectral au-delà de laquelle les pixels ne

seront pas pris en considération et iront compléter une autre classe ou alimenter la classe de rejet. Après plusieurs essais, le réglage le plus pertinent (cf. section suivante) est le suivant :

- ▶ Bâti : angle spectral relativement faible de 0,08 radians permettant de ne garder que le bâti de Pondichéry dont plusieurs échantillons ont été pris ;
- ▶ Alluvions : angle spectral de 0,10 radians (valeur par défaut) ;
- ▶ Eau : angle spectral de 0,30 radians permettant d'englober la quasi-totalité des pixels correspondant à de l'eau marine, fluviale ou lacustre ;
- ▶ Végétation : angle spectral de 0,40 radians permettant d'englober tous les types de végétation (cultures, forêts, prairies), même au cœur du bâti ;
- ▶ Sols nus : angle spectral de 0,10 radians (valeur par défaut).

La figure 4 présente les résultats des classifications pour chaque image de la série. Étant donné les nombreuses zones de pixel de bâti inutilisées à l'analyse (c'est-à-dire hors de la commune de Pondichéry), il a été décidé d'employer une couche vectorielle pour masquer ces zones. Sa forme a été définie en fonction de l'extension maximale de la Zone Morphologique Urbaine de Pondichéry en 2009.

Validation systématique

Toute la démarche de prétraitement et de classification a suivi un processus systématique durant lequel la qualité des résultats a été validée qualitativement (observations) ou quantitativement (matrices de confusion, coefficients Kappa, etc.) à chaque étape. Ainsi, elle peut se résumer selon l'organigramme présenté en figure 3 ; à la suite se trouvent les matrices dont les résultats ont été

les meilleurs, validant ainsi le choix des angles spectraux optimaux.

La précision globale représente le rapport du nombre de pixels bien classés sur le nombre total de pixels. On remarque donc que 99,40 % des pixels ont été correctement classés, résultat qui se répercute dans les correspondances du tableau 1.

Le coefficient Kappa est un indice statistique variant entre 0 et 1, utilisé notamment pour évaluer le degré d'efficacité d'un modèle (en l'occurrence une classification par angle spectral) dans sa manière de classer un ensemble d'objets dans un certain nombre de classes définissant les modalités d'une variable nominale (catégories non ordonnées). Avec une valeur de 0,9920, on peut considérer que la correspondance entre les pixels d'échantillonnage et les pixels de référence est quasi-totale.

L'erreur d'excédent (commission) correspond à l'affectation de pixels d'une classe calculée par la classification à d'autres classes répertoriées selon les pixels de référence. Ici, on constate que la classe qui est la plus intéressante, à savoir le bâti, n'a subi aucune erreur d'excédent.

L'erreur de déficit (omission) correspond à l'affectation des pixels de référence à d'autres classes calculées par la classification. Ici, on constate que seulement 1,12 % de pixels correspondant au bâti ont été « oubliés ».

Pour les classifications de 1988 et 2000, là encore, les résultats de la matrice de confusion sont plutôt bons, le bâti ayant été classé de façon optimale (97,55 % et 99,69 %), avec des

Echantillons/Référence	Bâti	Alluvions	Végétation	Eau	Sols nus
Bâti	98,88	0	0	0	0
Alluvions	0,7	100	0	0	0
Végétation	0,42	0	100	0,99	0
Eau	0	0	0	99,01	0
Sols nus	0	0	0	0	100
Total	100	100	100	100	100

a/ Correspondance pixels d'échantillons/pixel de référence (%) 1973

	Commission	Omission
Bâti	0	1,12
Alluvions	14,71	0
Végétation	0,9	0
Eau	0	0,99
Sols nus	0	0

b/ Erreur de commission et d'omission (%) 1973

Tableau 1 : Résultats de la matrice de confusion, classification SAM : image de 1973.

erreurs minimales de déficit et d'excédent.

Pour la classification de 2009, les résultats de la matrice de confusion sont bons, le bâti ayant été classé de façon optimale (97,69 %), avec une erreur minimale d'excédent une erreur négligeable de déficit.

Post-classifications

Binarisation et amélioration du rendu

Puisqu'il ne faut extraire que la Zone Morphologique Urbaine de Pondichéry des classifications, il est nécessaire de regrouper ces dernières, c'est-à-dire combiner toutes les classes de non-bâti entre elles pour n'en obtenir que deux : bâti et non-bâti.

Afin d'éliminer les pixels isolés et ainsi former des ensembles compacts et homogènes de bâti et de non-bâti, un outil de traitement fréquentiel local de type majoritaire a été utilisé. Il fonctionne à partir d'une grille carrée ou

rectangulaire de dimension variable (ici une grille carrée de 3 x 3 pixels) dans laquelle la classe du pixel central est assimilée à celle des pixels les plus fréquents autour de lui.

Dans un second temps, l'outil morpho-mathématique « *Érosion et Dilatation* » a été employé. Toutes deux s'appuient sur un élément structurel, le noyau, dont la taille est définie par l'utilisateur (ici aussi une grille carrée de 3 x 3 pixels). L'érosion consiste à supprimer les ensembles de pixels plus petits que la taille du noyau ; la dilatation, quant à elle, remplit les trous formés par l'érosion ; les deux processus sont donc complémentaires et indissociables. Grâce à ces deux outils, des images de classification binaires les plus homogènes possibles ont pu être créées, comme le montrent les illustrations de la figure 5, bien que certains pixels de bâti dans le non-bâti et inversement persistent sur les images ; ils sont liés essentiellement aux artefacts, « *imperfections* » inhérentes au signal spectral.

Post-traitements

Vectorisation

Une fois que les images ont été préparées pour la représentation diachronique, elles ont pu être converties en couches vectorielles séparées : une pour le non-bâti et une pour le bâti – la plus intéressante. Cependant, malgré les efforts d'homogénéisation réalisés lors des traitements sous *Envi* et l'utilisation d'un masque pour supprimer les zones se trouvant hors de la ZMU de Pondichéry, des pixels ou ensembles de pixels de bâti isolés subsistent encore (artefacts inhérents à la télédétection). Grâce au logiciel *ArcMap*, ceux dont la superficie est inférieure à un hectare ont été supprimés. De cette manière, pour chaque année de la série, des couches vectorielles représentant la ZMU, homogènes et continues ont été obtenues. Les zones non-bâties



Figure 5 : Résultats après regroupement et amélioration.

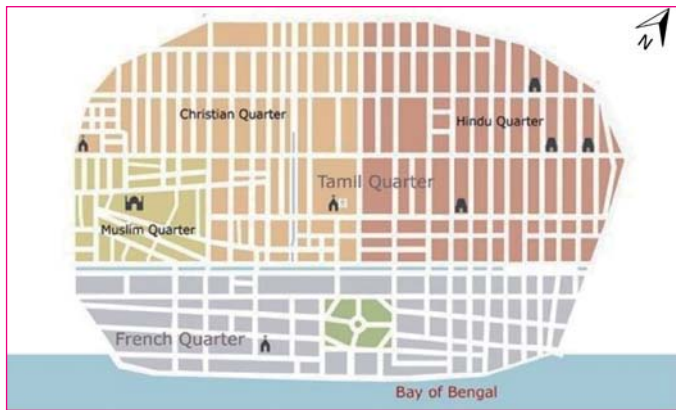


Figure 6 : Plan des quartiers de la ville neuve de Pondichéry.

situées dans cet ensemble, qui constituaient un mitage de la ZMU, ont également été supprimées et assimilées au bâti environnant si leur superficie ne dépassait pas un hectare. Les seuls trous restant représentent des grandes zones de végétation comprises dans la ZMU (parcs, forêts).

Création de la carte finale

Afin d'étudier l'évolution de la Zone Morphologique Urbaine de

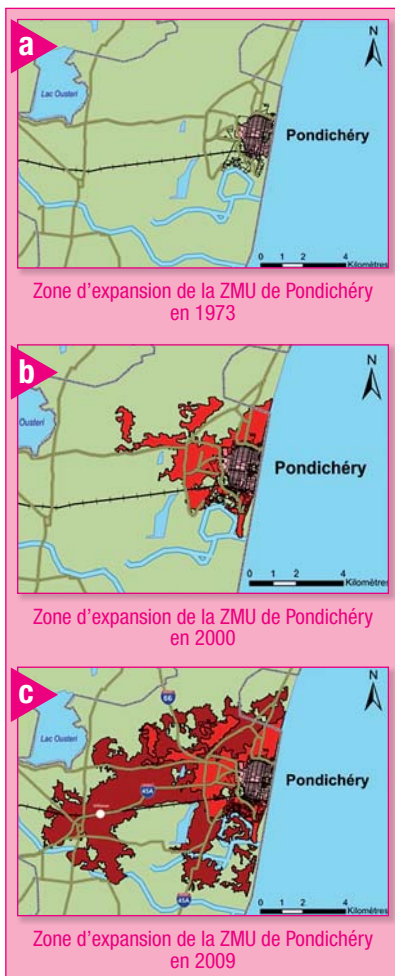


Figure 7 : Expansions successives de la ZMU de Pondichéry.

Pondichéry et de comprendre ses mécanismes, il était nécessaire d'ajouter aux couches de bâti successives un fond de carte pertinent pour l'analyse. De ce fait, une réflexion a été menée sur le type d'informations qu'il serait intéressant de voir figurer sur la carte finale. Bien souvent, les établissements humains sont régis par des contraintes ou des facteurs liés à leur environnement : topographie, hydrographie, réseau routier, réseau ferré, géologie, etc. Parmi ces items, quelques-uns ont pu être vectorisés à partir de cartes topographiques *Esri* : le réseau autoroutier et express, le réseau viarie historique du centre-ville, le réseau ferré, le réseau hydrographique important, les lacs, la ligne de cote et les limites communales de Pondichéry. Etant donné la faible élévation de la zone d'étude et les faibles variations d'altitude qui s'y produisent (variation de 68 mètres d'altitude maximum), aucune couche topographique n'y a été ajoutée.

Un dégradé de rouge a été choisi pour représenter l'expansion chronologique de la ZMU, le rose correspondant au bâti le plus ancien (1973) et le bordeaux au bâti le plus récent (2009). Afin de pouvoir appréhender la durée écoulée entre chaque nouvelle frange de la ZMU, une échelle de temps en légende a été représentée par un axe proportionnel au nombre d'années ; dix pixels correspondant à un an. Les chiffres de croissance moyenne annuelle y figurent également, en termes de pourcentages et d'hectares gagnés sur la surface de la commune (voir figure 8).

Création d'une animation diachronique

La carte, qu'elle se présente sous format papier ou numérique, est un vecteur d'information

statique. Utile pour synthétiser des phénomènes présentant une dimension spatiale, elle reste néanmoins assez peu explicite lorsqu'il s'agit de représenter des processus diachroniques. Des codes couleurs peuvent être employés, secondés par un axe chronologique, mais l'observateur reste coincé dans une seule dimension : le plan formé par la carte. Afin de s'affranchir de ce phénomène optique, les informations que l'on souhaite voir figurer sur la carte synthétique peuvent être mises en mouvement, « animées », dans le but d'offrir à l'observateur une nouvelle dimension d'analyse : le temps. Faire apparaître successivement les couches vectorielles correspondant aux extensions de la ZMU de Pondichéry entre 1973 et 2009, avec un pas de temps calé sur le nombre d'années écoulées entre chaque image de référence (0,5 secondes d'animation correspondent à une année réelle), permet de se figurer les phases plus ou moins importants de cette expansion urbaine.

Évolution de la Zone Morphologique Urbaine de Pondichéry

L'évolution de la ZMU de Pondichéry entre 1973 et 2009 a été mise en évidence grâce aux quatre images Landsat utilisées durant cette étude, chaque intervalle entre les dates d'acquisition étant caractérisé par des phénomènes plus ou moins marqués.

1973, la ville historique

En 1973, la ZMU est pratiquement équivalente à la vieille ville de Pondichéry ; elle occupe 2,42 km² de la surface communale, soit seulement 1,7% des

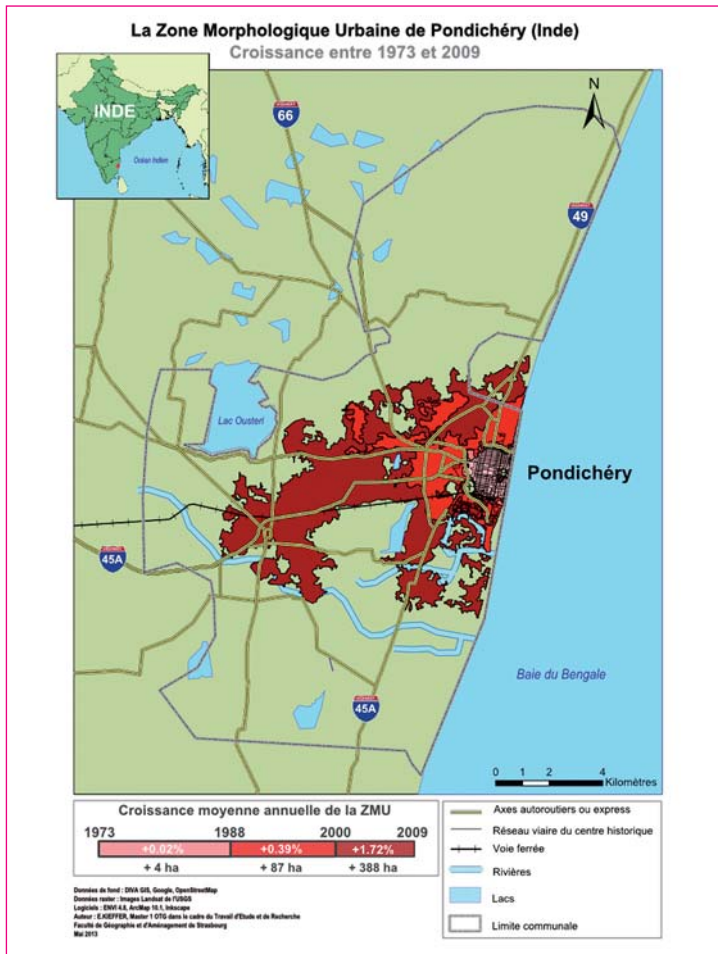


Figure 8 : Évolution de la ZMU de Pondichéry.

226 km², comme le montre la figure 7a. Organisée en damiers comme une ville neuve française, cette dernière présente également la morphologie de la ville indienne coloniale. Le tracé régulier des rues, perpendiculaires ou parallèles au rivage est un type d'organisation spatiale rare en Inde puisqu'il s'agit d'un état d'esprit cartésien à la mode au XVIII^e siècle en Europe. Comme on peut l'observer sur la figure 6, la ville dite « blanche », en référence au quartier français à l'Est, est séparée de la ville « noire », à l'Ouest, par un canal. Malgré cette bipolarité, la forme globale de la ville et l'harmonie architecturale qui y réside maintient une certaine homogénéité entre les quartiers, mais participe également à leur unité en les enfermant dans une

même enceinte. « On retrouve les éléments d'une ville française dans cette ville indienne : la promenade au bord de mer, un espace ouvert pour le marché au centre, une église près du marché (en l'occurrence la cathédrale ici), les axes principaux menant vers le marché, et des îlots de maisons carrés ou rectangulaires » (Quella-Villéger, 2013).

Entre 1973 et 1988, la ZMU s'étend timidement à l'Ouest, au-delà du boulevard d'enceinte, à raison de quatre hectares en moyenne par an, soit 0,02 % de croissance annuelle (voir tableau

	1973	1988	2000	2009
Superficie de la ZMU (ha)	272	276	363	751
Part de la ZMU sur l'ensemble du district (%)	1,7	1,72	2,11	3,83
Croissance moyenne annuelle (ha)			4	87
Croissance moyenne annuelle (%)		0,02	0,39	1,72

Tableau 2 : Croissance de la ZMU de Pondichéry entre 1973 et 2009 en chiffres.

2). Malgré tout, les prémices de la croissance urbaine de Pondichéry sont lancées.

2000, la ville s'étend au-delà des boulevards d'enceinte

Entre 1988 et 2000, on constate une nette progression de la ZMU dans toutes les directions autour de la ville historique (hormis à l'Est, littoral obligeant) : la continuité du bâti gagne en moyenne 87 hectares par année soit une croissance annuelle de 0,39 % par rapport à 1988 (voir tableau 2). L'urbanisation gagne des secteurs où se trouvaient déjà, depuis quelques années, des routes express, formant une ceinture autour de la vieille ville et permettant de rejoindre rapidement en parcourant les deux kilomètres qui la séparent de la frange extrême Ouest de la ZMU (voir figure 7b).

2009, les corridors urbains favorisent l'expansion

Sous l'ancien premier ministre Atal Bihari Vajpayee, l'Inde a lancé un vaste programme de modernisation de son réseau routier, appelé « National Highway Development Project » (NHDP). Les autoroutes n°66 et 45A qui rejoignent Pondichéry ont été construites durant la phase III-A de ce projet et leur réalisation s'est achevée en 2009 (NHA, 2013). Si l'autoroute 66 n'a pas favorisé énormément l'expansion de la ZMU au Nord-Ouest de la vieille ville, il en est tout autrement à l'Ouest. En effet, l'autoroute 45A, véritable corridor urbain, a considérablement développé le bâti qui s'est installé progressivement selon un axe Est-Ouest (voir figure 7c). Epaulé par une voie ferrée d'origine coloniale dont la premi-

ère gare se trouve à Villianur et des lignes de transport en commun empruntant les routes express, ce nouveau tronçon rapide a permis la création de nouveaux quartiers, facilement connectés au centre de Pondichéry comme au reste du district ou même de l'État.

Au centre de Pondichéry, l'autoroute 45A bifurque vers le Sud et traverse les deux estuaires. De ce fait, l'expansion de la ZMU s'est également réalisée selon un axe Nord-Sud. Des quartiers ont vu le jour entre les estuaires, espace autrefois enclavé. Ils forment des entités à part entière, au même titre que tous ceux implantés après 1988, disposant chacun de structures administratives (écoles, collèges, lycées, départements de l'Université), de loisirs et sanitaires (hôpitaux, cliniques). D'après les travaux de R. Ramachandran en 1989, cette périphérie de la vieille ville est appelée « *frange urbaine* » car elle a toutes les apparences de la ville, avec ses zones résidentielles, ses centres commerciaux, etc. Cependant, les réseaux sont encore plus déficients qu'au centre (adduction d'eau, évacuation des eaux usées et des ordures), le parcellaire et la voirie mal dessinés car insuffisamment planifiés, et l'habitat illégal important. Les villages originels ont perdu leur fonction agricole pour une fonction résidentielle qui peut apporter une certaine richesse à ceux de leurs habitants qui ont les moyens de proposer des logements en location, tandis que les autres se trouvent dans une situation parfois dramatique. Au sein de ces « *villages urbains* » voisinent donc maisons traditionnelles aux toits de chaume et petits immeubles à un ou deux étages, paysans logeurs, citadins locataires et ouvrier agricoles réduits au chômage. Sur la période 2000-

2009, l'expansion de la ZMU est telle que la croissance annuelle moyenne est presque cinq fois supérieure à celle constatée sur la période 1988-2000, avec 1,72 % de terres non-bâties transformées en bâti, soit près de 388 hectares par an (voir tableau 2). Ainsi, selon les données de recensement, Pondichéry est passée d'une population de près de 220 000 habitants en 2001 à plus de 675 000 en 2011, soit une croissance supérieure à 300 % en dix ans.

Au même titre que la majorité des processus d'étalement urbain de par le monde, celui de Pondichéry s'est fait aux dépens de terres autrefois agricoles comme en témoignent les images satellitaires de 1973, 1988 et 2000. Cependant, il semblerait qu'une zone ait été épargnée, située entre l'expansion Ouest et Sud du la ZMU. Cela pourrait s'expliquer par la présence d'un lac utilisé à des fins d'irrigation, pour des terres probablement à hauts rendements agricoles, ou des productions maraichères.

Conclusion

L'Inde, au même titre qu'une grande partie de l'Asie des moussons, se caractérise par une urbanisation paradoxale : très limitée si l'on prend en compte l'ensemble de la population (seulement 28 % de la population indienne était urbaine en 2001), très développée au contraire si l'on prend en compte les chiffres absolus : la ville apparaît alors comme un élément fondamental de la civilisation indienne, avec des agglomérations énormes (trois mégapoles atteignent ou dépassent dix millions d'habitants) et une tradition urbaine ancienne. Cependant, l'Inde est confrontée depuis les années 1980-1990

à un exode rural massif dont la principale conséquence a été une croissance urbaine rapide et incontrôlée. Dans un contexte international où de plus en plus d'entreprises et d'industries viennent s'installer en Inde, créant ainsi de nombreux emplois en ville ou en périphérie, mais également une pression foncière importante, l'Etat indien a dû commencer à réfléchir à des solutions pour contrer cette sur-urbanisation non-planifiée et reprendre les rênes de l'aménagement urbain.

C'est seulement depuis le lancement du programme *Landsat* par la NASA en 1972 et par la suite celui de l'Inde (IRS) en 1988 que cette dernière a commencé à employer la télédétection spatiale comme un outil utile aux aménageurs. Globalement, la communauté scientifique mondiale a reconnu la télédétection urbaine comme une activité et une technique à part entière, acceptable pour étudier les dynamiques spatio-temporelles et les conséquences de l'urbanisation en tant que composante majeure des changements globaux (compte tenu du fait que plus de la moitié de la population humaine habite en ville et que les zones urbaines concentrent la majeure partie de la production) (Xiaojun, 2011).

C'est grâce aux images *Landsat* de 1973, 1988, 2000 et 2009, à leur classification selon le *Spectral Angle Mapper* et à l'utilisation de la géomatique, que le phénomène d'étalement urbain dont la ville de Pondichéry à fait l'objet a pu être étudié. Au même titre que bon nombre d'autres villes en Inde, elle a vu sa Zone Morphologie Urbaine (ZMU) s'étendre dès la fin des années 1980, le long des corridors urbains formés tout d'abord par les voies express entourant

le centre historique puis par les autoroutes mises en place durant le *National Highway Development Project*. Comme ailleurs, les terres agricoles ont été sacrifiées au profit de nouvelles zones de bâti, essentiellement résidentielles si l'on considère des images à plus haute résolution spatiale.

La difficulté de l'analyse résidait justement dans le fait que la résolution des images Landsat (30m) ne permettait pas de différencier les différents types de bâti qui composent la ZMU de Pondichéry via une classification, la réponse spectrale étant trop similaire entre les différents secteurs. Seule la comparaison empirique avec des images de résolution spatiale supérieure (Spot 10 m fournies par *Google Earth*) a permis de caractériser l'expansion de la ZMU comme étant une nouvelle frange urbaine de Pondichéry, essentiellement composée de zones résidentielles disposant de nombreuses infrastructures. Malgré tout, la crois-

sance démographique urbaine qu'a connue la ville durant ces deux dernières décennies a mis en défaut ses infrastructures et ses services. Ce phénomène s'est accompagné d'une irrémédiable crise du logement, d'un encombrement des rues par une mauvaise gestion des déchets, mais également une dégradation du contexte socio-économique et du cadre de vie en général.

Pourtant, Pondichéry dispose d'une capacité d'accueil croissante pour des touristes de plus en plus nombreux à vouloir visiter cette ville pleine d'histoire, créant ainsi des emplois supplémentaires pour les classes défavorisées et augmentant les revenus pour la municipalité. Ce défi que constitue le développement du tourisme à Pondichéry implique néanmoins la mise en place d'un plan visant à assainir l'environnement urbain afin d'améliorer la santé publique, la qualité de vie des populations locales et, de fait, l'attractivité pour les touristes. Dans cette optique,

entre 2002 et 2005, « *Pondichéry appuyé de l'association INTACH (Indian National Trust for Art and Cultural Heritage) a établi une double coopération décentralisée avec les villes d'Urbino en Italie et de Villeneuve-sur-Lot en France. Cette gestion décentralisée a permis un partage d'expérience sur la préservation de la qualité architecturale du patrimoine de Pondichéry et une meilleure gestion de son environnement urbain* » (ADEME, 2005).

Cet exemple de coopération internationale prouve la nécessité de gérer au mieux l'urbanisation en Inde, notamment grâce au savoir-faire occidental en la matière, pour tirer un maximum d'avantages de ce territoire riche de son patrimoine culturel et naturel. Quant à la présence française à Pondichéry, elle n'a jamais cessé de façonner son identité, et restera encore longtemps, espérons-le, une aide précieuse pour participer et guider au mieux son développement. |

Bibliographie

Barbot C. : L'Inde au miroir du monde : géopolitique, démocratie et développement de 1947 à nos jours. Ellipses, Paris, 2007, 145p.

Dupont V. : Le monde des villes, in : Population et développement en Inde. Ellipses, Paris, 2002, p.55-84

Guidon B., Zhang Y., Dillabaugh C. : Landsat urban mapping based on a combined spectral-spatial methodology, in : Remote Sensing of Environment, volume 92. Elsevier, Ottawa, 2004, p. 218-232

Ji W., Ma J., Twibell R.W., Underhill K. : Characterizing urban sprawl using multi-stage remote sensing images and landscape metrics, in : Computers, Environment and Urban Systems, volume 30. Elsevier, Kansas City, 2006, p. 861-879

Kruse F.A., Lefkoff J.B., Boardman K., Heidebrecht A.T., Shapiro P.J., Barloon, Goetz : The Spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. Remote sensing of the Environment, volume 44, 1993, p. 145-163

Louiset O., "L'oubli des villes de l'Inde : pour une géographie culturelle de la ville", Armand Colin, Paris, 2011, 295 p.

Mahesh Kumar Jat, P.K Garg, Deepak Khare : Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques, in : International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, volume 10. Elsevier, Roorke, 2008, p. 26-43

Netzband M., Stefanov W.L., Redman C. (eds.) : Applied Remote Sensing for urban Planning, Governance and Sustainability. Springer, Berlin, 2007, 278 p.

Oliveau S. : Étalement urbain et fragmentation : Chennai, un exemple en Inde du Sud, Hyper Articles en Ligne : Étalement urbain et ville fragmentée dans le monde, des théories aux faits.

Mis en ligne le 10 novembre 2007,

URL : <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/18/66/54/PDF/Orleans2007.pdf>

Ramachandran R. : Urbanisation and Urban Systems in India. Oxford University Press, 1989, 364 p.

Xiaojun Yang : Urban Remote Sensing : Monitoring, Synthesis and Modeling in the urban Environment. Willey-Blackwell, Oxford, 2011, 388 p.

India Census : Pondicherry District : 2011 census data. Population Census 2011, en ligne, consulté le 5 juin 2012, URL : <http://www.census2011.co.in/census/district/482-puducherry.html>

INSEE : Unité urbaine : définition. Institut National de la Statistique et des Études Économiques, en ligne, consulté le 30 avril 2013.

URL : <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/unite-urbaine.htm>

IRD P : Coefficient Kappa de Cohen. Institut de Recherche et de Documentation Pédagogique de Neuchâtel, en ligne, consulté le 25 mai 2013,

URL : http://www.irdp.ch/edumetrie/lexique/coef_kappa.htm

MapsOfIndia : Pondicherry Geography and History. Maps Of India : India's Number 1 Maps site, mis en ligne le 30 mai 2013, consulté le 5 juin 2013, URL :

<http://www.mapsofindia.com/pondicherry/geography-history.html>

MapsOfIndia : Pondicherry Economy, Maps Of India : India's Number 1 Maps site, en ligne, consulté le 5 juin 2013, URL : <http://business.mapsofindia.com/india-state/pondicherry-economy.html>

National Highway Authority Of India. URL : <http://www.nhai.org/>

Quella-Villéger E., L'urbanisme de Pondichéry, Partenariat dans le Sud de l'Inde, en ligne, consulté le 3 juin 2013, URL : <https://partenariat-inde.poitou-charentes.fr/l-urbanisme-de-pondichery/4.html>