



HAL
open science

Qualifier les espaces urbains à Dakar, Sénégal : résultats préliminaires de l'approche croisée entre télédétection et données censitaires spatialisées

Marion Borderon, Sébastien Oliveau, Vanessa Machault, Cécile Vignolles,
Jean-Pierre Lacaux, Alphousseyni Ndonky

► To cite this version:

Marion Borderon, Sébastien Oliveau, Vanessa Machault, Cécile Vignolles, Jean-Pierre Lacaux, et al.. Qualifier les espaces urbains à Dakar, Sénégal : résultats préliminaires de l'approche croisée entre télédétection et données censitaires spatialisées. *Cybergeographe : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2014, 670, pp.16. 10.4000/cybergeographe.26250 . halshs-00980371

HAL Id: halshs-00980371

<https://shs.hal.science/halshs-00980371>

Submitted on 14 Dec 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Qualifier les espaces urbains à Dakar, Sénégal

Résultats préliminaires de l'approche croisée entre télédétection et données censitaires spatialisées

Marion Borderon, Sébastien Oliveau, Vanessa Machault, Cécile Vignolles, Jean-Pierre Lacaux et Alphousseyni N'Donky

Nous tenons à remercier les organisateurs du colloque « images et villes » qui s'est tenu à Paris les 12 et 13 décembre 2011 pour cette belle opportunité de discussion et leur retour sur cet article. Cet article s'intègre dans la continuité des travaux entrepris grâce au programme ANR ACTUPALU (07-SEST-001). Nous remercions donc particulièrement Jean-Yves Le Hesran et Richard Lalou pour leur soutien. Les commentaires de Frédéric Audard ont grandement contribué à l'amélioration de cet article. Nous remercions également le programme ISIS du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) pour l'accès aux images SPOT-5.

Dakar : travailler avec des données imparfaites

- 1 Une des caractéristiques dominantes des pays les moins développés est la difficulté à disposer de données statistiques de bonne qualité sur la population, et plus encore si l'on souhaite que cette information soit spatialisée. Néanmoins, il existe çà et là des sources qui peuvent être exploitées et ouvrent de nouveaux horizons à la recherche. Le Sénégal n'échappe pas à cette règle et travailler sur l'agglomération dakaroise nécessite donc quelques efforts méthodologiques si l'on veut s'extraire de l'étude fragmentée de quelques quartiers.
- 2 Les recensements sont, dans ce cadre, des ressources souvent utiles. L'expérience montre qu'un investissement dans leur exploration, leur mise en espace (via l'intégration dans des systèmes d'information géographique) et leur analyse peut enrichir la compréhension et la description de divers phénomènes (Merchant *et al.*, 2011 ; Guilmoto *et al.*, 2002). En outre, les données issues de l'imagerie satellite sont de plus en plus aisément disponibles à des résolutions spectrales, spatiales et temporelles pouvant satisfaire les besoins

d'études dans de nombreux domaines. Une exploitation pertinente de leur spécificité requiert néanmoins une technicité particulière. Les images satellites ne produisent pas directement de données socio-économiques, même si l'on peut faire un certain nombre d'extrapolations à partir de leur analyse (Dureau *et al.*, 1989).

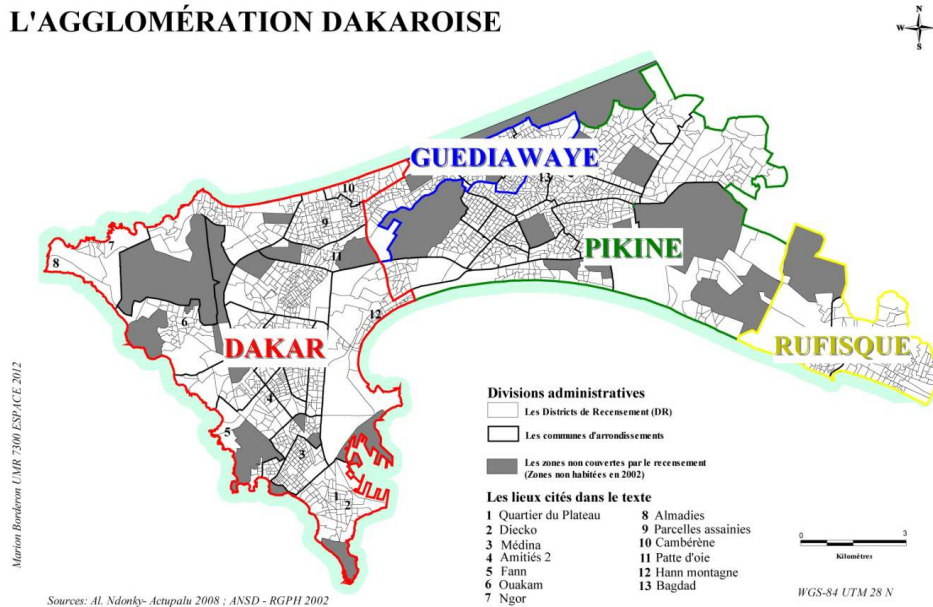
- 3 Concernant les recensements à Dakar, ils sont disponibles au format numérique et distribués par l'agence nationale de la statistique et de la démographie (ANSD) pour l'édition de 2002 (publiée en 2006) et celle de 1988 (qui est restée très peu exploitée). Son intégration dans un système d'information géographique plus large a été effectuée en 2008 dans le cadre d'un programme de recherche mené par l'IRD¹ (N'Donky, 2011). De premières exploitations ont permis de relever la qualité des données produites et leurs usages dans le cadre d'une analyse socio-spatiale de l'agglomération (Oliveau *et al.*, 2009).
- 4 Du point de vue de l'imagerie satellite, les études sont plus nombreuses. Sans revenir aux travaux à partir des photos aériennes exploitées par Vernière en 1978, on notera que des travaux importants sont aujourd'hui en cours sur la capitale dakaroise, autour des problématiques sanitaires et plus particulièrement concernant le paludisme (voir par exemple Machault *et al.*, 2012).
- 5 Dans ce cadre, ce travail se place comme une étude exploratoire sur les possibilités de qualification socio-économique des espaces urbains dakarois. La question classique et sous-jacente est de comprendre ici dans quelle mesure certaines caractéristiques morphologiques des paysages urbains sont liées à un profil économique type.
- 6 Plusieurs études sur les disparités sociales dans la capitale sénégalaise, ont déjà été réalisées sur la dernière décennie (ANSD, 2008 ; UN Habitat, 2007 ; Diaz Olvera *et al.*, 2005). Cependant ces dernières sont généralement menées à l'échelle de territoires administratifs de grande taille et de forte hétérogénéité interne. Les rares études préférant l'analyse à une échelle plus fine commencent en outre à être datées et ne couvrent pas toute l'agglomération (voire par exemple Salem, 1998). Ainsi, à la lumière des procédés méthodologiques classiques permis par nos deux sources de données, l'imagerie satellite et le recensement, nous chercherons à différencier et décrire les différents sous-espaces de ces villes hétéroclites (Dakar, Rufisque, Guédiawaye et Pikine) à l'échelle disponible la plus fine possible. L'analyse a ainsi été faite au niveau du district de recensement (DR), unité spatiale la plus fine pour laquelle les données censitaires sont disponibles. Cela permettra *de facto* de mettre en évidence des discontinuités socio-spatiales locales.

Les districts censitaires, une maille nouvelle dans l'étude géographique de Dakar

- 7 L'information censitaire utilisée dans cet article est regroupée à l'échelle des districts de recensement (DR), équivalents aux « Îlots Regroupés pour l'Information Statistique » (IRIS) français, mais moins peuplés (1000 habitants en moyenne au Sénégal). Cette information couple des données caractérisant les ménages (religion, langue, emploi, statut foncier, équipement) et leur habitat (qualité de la construction, raccordement aux réseaux).
- 8 L'agglomération de Dakar rassemble les quatre communes de Dakar, Pikine, Guédiawaye et Rufisque (figure 1). En 2002, on y trouve un peu plus de 2 millions d'habitants, répartis dans 1998 DR. On notera qu'il existe un certain nombre de zones non couvertes par la

base de données. En effet, une trentaine de districts sont non habités (aéroport, forêts, parcs, dunes littorales, Niayes²) ou ont un statut particulier (camps militaires, zones industrielles).

Figure 1. Carte de situation



- 9 À partir de ces données, nous proposerons une cartographie inédite de la richesse et de la pauvreté dans l'agglomération reposant sur une sélection réalisée parmi les 130 variables disponibles.

Dakar vue du ciel : actualisation des connaissances

- 10 Le travail sur l'urbanisation dakaroise à partir d'exploration aérienne n'est pas nouveau. Que ce soit à partir de photographies aériennes ou d'images satellites, les méthodologies sont bien en place (notamment Dureau *et al.*, 1989). L'amélioration continue des capteurs et la progression des méthodes de traitement nous ont amenés à considérer cette source pour enrichir les données censitaires disponibles.
- 11 Pour cela, nous nous appuyons sur deux images SPOT-5 à 2,5 et 10 mètres de résolution spatiale, datant de 2007. Si la concordance temporelle avec les données censitaires n'est pas parfaite, le décalage n'est pas suffisamment important pour invalider les résultats. Par ailleurs, les résultats fournis par le Centre de Suivi Écologique (CSE) de Dakar³ permettent d'identifier les zones concernées par les changements les plus importants. Il s'agit avant tout du front d'urbanisation situé à l'Est.
- 12 Les images que nous utilisons ont été sélectionnées notamment pour leur faible couverture nuageuse. Néanmoins, la commune de Rufisque, à l'extrême Est de la zone d'étude, et une partie du front d'urbanisation, plus au Nord, sont partiellement masquées par les nuages. Au final, ce sont tout de même 1891 DR, soit 95 % des DR de l'agglomération, qui peuvent être retenus pour cette étude.

Du recensement à l'imagerie satellite : caractériser l'espace urbain

Cartographier la pauvreté, ou comment déterminer les caractéristiques socio-économiques des espaces

- 13 Depuis les années 1980 et les travaux d'Amartya Sen sur la pauvreté, celle-ci n'est plus considérée sous l'angle unique et réducteur des revenus, mais envisagée comme un phénomène à multiples facettes et relatif à un contexte spécifique (voir par exemple Sen, 1983). Les revenus formels déclarés sont insuffisants pour évaluer la situation économique, et cela plus encore dans les sociétés en développement. On constate donc dans la littérature un recours de plus en plus fréquent aux approches non monétaires, parmi lesquelles la mesure de la pauvreté passe par l'étude des conditions de vie des habitants (dans le contexte sénégalais, voir Minvielle *et al.*, 2005).
- 14 De même, la pauvreté est généralement envisagée au niveau de l'individu ou du ménage, mais se prête aussi à une approche plus agrégée comme le montre les travaux explorant la dimension spatiale de la pauvreté ou « poverty mapping », pour reprendre l'expression de la banque mondiale, popularisés par les recherches de Martin Ravallion (Datt & Ravallion, 1993 ; Ravallion & Wodon, 1997) et Uwe Deichmann (Deichmann, 1999 ; Lall & Deichmann, 2009).
- 15 Les recherches s'orientent donc vers des approches méthodologiques qui utilisent des variables indicatrices (proxy) des niveaux de vie et de bien-être pour évaluer le développement économique. L'exemple le plus célèbre est sans doute la mise en place par le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) de l'Indicateur de Développement Humain (IDH⁴) pour pallier les manques de l'approche en termes de Produit Intérieur Brut (PIB).
- 16 À l'échelon du ménage, on retrouve par exemple les niveaux d'éducation et de santé, la qualité de l'habitat, les biens dont disposent les individus ou encore leur profil socio-démographique (statut marital, taille du ménage, appartenance ethnique,...). Il faut ensuite réduire cette information multidimensionnelle pour pouvoir la projeter sur une carte. Nous avons choisi la classification ascendante hiérarchique (CAH), méthode robuste et éprouvée qui permet de définir des profils types et offre des interprétations discriminant bien les individus statistiques.
- 17 Cette base de données caractérisant les ménages comprend 130 variables dont 76 sont relatives à l'habitat et à l'équipement. Une sélection de variables a premièrement été opérée pour caractériser les inégalités de richesse dans l'espace étudié. La difficulté du choix réside dans la double acception que peuvent prendre les variables. Comme souvent en sciences sociales, celles-ci sont tantôt descriptives, tantôt explicatives vis-à-vis du phénomène étudié. Les corrélations sont aisées, mais les causalités plus difficiles à mettre au jour. Après différentes analyses (corrélations et analyses factorielles), ce sont 38 variables (tableau 1) qui ont été retenues pour discriminer les inégalités de richesse à l'échelle de l'agglomération. On peut distinguer quatre grandes catégories : celles qui relèvent de l'équipement collectif, de l'équipement privé, de la qualité de l'habitat et celles qui caractérisent spécifiquement le ménage. Ces variables, toutes quantitatives continues, représentent le pourcentage de ménages par DR qui sont caractéristiques par

la modalité. Soit par exemple, le pourcentage de ménages d'un même DR qui bénéficie du réseau d'égout. Considérant la nature de ces variables, nos choix d'exploration ont porté sur les ACP (Analyse en Composantes Principales) et la CAH.

Tableau 1 : Les variables censitaires sélectionnées pour l'analyse des inégalités de richesse

Équipement collectif	Équipement privé	Qualité de l'habitat	de Caractéristiques du ménage
Évacuation des eaux usées -Réseau d'égout	Éclairage -Électricité -Groupe électrogène -Bougie	Type de logements -Baraque -Case -Maison basse -Maison à étage -Appartement	Statut d'occupation -Propriétaire -Locataire
Évacuation des ordures ménagères -Camion de ramassage	Équipement en matériel électroménager -Télévision -Lecteur vidéo -Réfrigérateur/congélateur -Foyer amélioré -Climatiseur -Machine à coudre -Aucun	Qualité de l'habitat -Mur en ciment -Mur en bois -Mur en banco -Mur en paille -Toit en ciment -Toit en bois -Toit en banco -Toit en paille -Sol en carrelage -Sol en ciment -Sol en terre -Sol en sable	Ressources -Analphabète -A déjà sauté un repas ⁵ -A déjà sauté des soins ⁵
	Équipement en moyens de transport -Voiture -Deux-roues motorisés -Bicyclette		
	Approvisionnement en eau -Robinet intérieur		

¹⁸ La CAH donne des résultats très lisibles concernant les inégalités de richesse dans la ville (voir figure 2). La catégorie des DR les plus aisés regroupe les ménages les mieux équipés (surreprésentation des climatisations et automobiles), les mieux insérés (taux d'activités supérieurs) et qui occupent des appartements⁶, dont ils ne sont pas propriétaires⁷. À l'opposé, les plus pauvres (pauvres et très pauvres) se caractérisent par un sous-équipement marqué. La différence entre les pauvres qui occupent la commune de Dakar et les très pauvres, situés à l'est de l'agglomération, est surtout basée sur l'accès à l'emploi et aux aménités urbaines. La catégorie moyenne correspond au profil type de la

Capitale, il s'agit donc de populations pauvres. Enfin, la catégorie moyenne supérieure pourrait représenter les espaces où émergerait la classe moyenne dakaroise.

- 19 Au final, les profils de classe présentés correspondent bien aux résultats obtenus par d'autres travaux sur l'agglomération dakaroise (N'Donky, 2011 ; Borderon, 2013) et par d'autres enquêtes plus spécifiques sur la pauvreté (ANSD, 2008 et Minvielle et al., 2005).

Figure 2 : Profil économique des districts de recensement dakarois

Pourcentage de ménages:	Aisés	Pauvres	Moy.	T. pauvres	Moy. sup.
inalphabètes	-	+	-	+	-
éclairés à l'électricité	++	--	+	--	++
ayant un groupe électrogène	+	-	+	-	++
éclairés à la bougie	--	++	-	++	--
équipés de téléviseur	---	+	+	-	-
équipés de lecteur vidéo	+++	--	-	--	++
équipés de réfrigérateur ou de congélateur	++	--	+	--	++
équipés d'un foyer amélioré	+	-	+	-	+
équipés de climatiseur	++++	-	-	-	+
équipés de machine à coudre	+	-	-	-	+
sans équipement	--	+	-	++	--
équipés d'au moins une voiture	++++	--	-	-	++
équipés d'au moins une mobylette	++++	-	-	-	+
équipés d'au moins une bicyclette	+	-	-	-	+
évacuant leurs eaux usées par un réseau d'égout	+++	--	+	-	++
se débarassant de leurs ordures par camion de ramassage	+	--	+	-	++
propriétaires de leur logement	---	+	-	-	+
locataires de leur logement	+++	-	+	-	-
vivant dans un logement de type case	-	+	-	+	-
vivant dans un logement de type baraque	-	-	-	++++	-
vivant dans un logement de type maison basse	---	++	-	-	--
vivant dans un logement de type maison à étage	-	-	+	--	++
vivant dans un logement de type appartement	++++	-	-	-	+
vivant dans un logement avec des murs en ciment	+	+	-	---	+
vivant dans un logement avec des murs en bois	-	-	-	++++	-
vivant dans un logement avec des murs en banco	+	-	+	+	-
vivant dans un logement avec des murs en paille	-	-	-	+++	-
vivant dans un logement avec un toit en ciment	+++	--	+	--	++
vivant dans un logement avec un toit en bois	--	+++	-	-	--
vivant dans un logement avec un toit en banco	-	-	-	++++	-
vivant dans un logement avec un toit en paille	-	+	+	++	-
vivant dans un logement avec un sol en carrelage	++++	--	-	--	+++
vivant dans un logement avec un sol en ciment	---	+	+	+	--
vivant dans un logement avec un sol en banco	-	-	-	+++	-
vivant dans un logement avec un sol en sable	-	++	-	+	--
ayant sauté un repas dans les 6 mois avant le recensement	--	++	+	++	--
ayant sauté un soin dans les 6 mois avant le recensement	--	++	+	+	--
approvisionnés en eau avec robinet intérieur	+	--	+	-	++

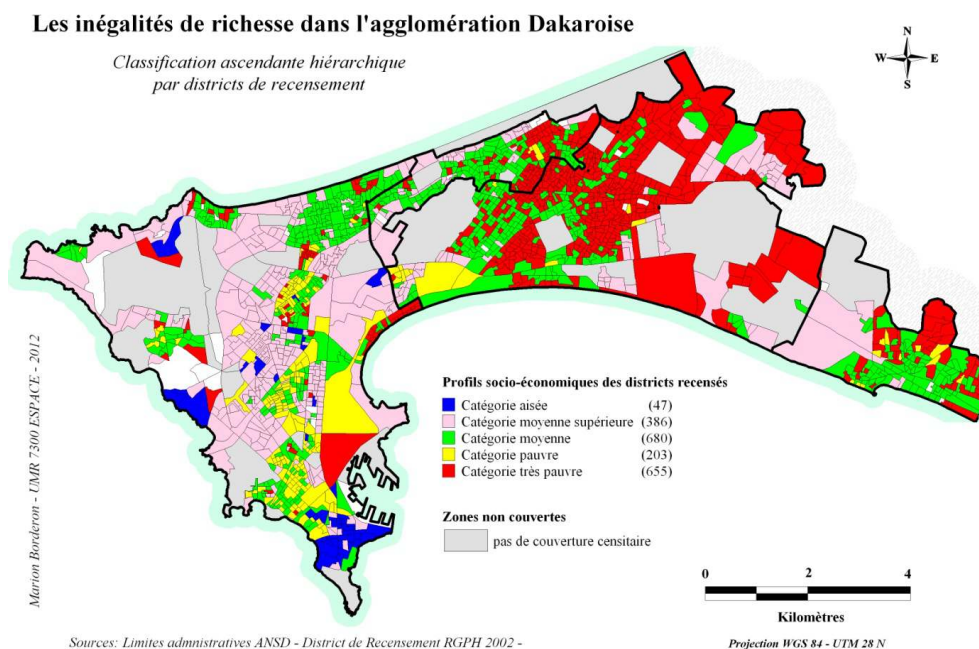
Listing CAH- Outputs - Philcarto

Interprétation des distances aux moyennes :

- Distances positives : '+' faible (0.5), '++' sensible (0.5 -> 1.0), '+++ nette (1.0 -> 1.5), '++++ forte (>1.5)
- Distances négatives : '-' faible (-0.5), '--' sensible (-0.5-> -1.0), '--- nette (-1.0 -> -1.5), '---- forte (< -1.5)

- 20 La figure 3 propose la projection cartographique des résultats de la CAH. On y retrouve les grands éléments de la géographie dakaroise, mais avec des nuances nouvelles. L'opposition est-ouest existe bien, mais elle ne se cantonne pas à une opposition entre la commune de Dakar et ce que l'on considérait auparavant comme sa banlieue (Pikine notamment) (Tall, 2009). La cartographie souligne avant tout la grande hétérogénéité de la capitale que ce soit entre l'est et l'ouest de la ville ou à des échelles plus fines, comme au centre historique de Dakar, où la pauvreté de Medina reste accrochée au pied de la richesse du Plateau.

Figure 3 : Les inégalités de richesse dans l'agglomération dakaroise en 2002



Automatiser la reconnaissance de l'occupation du sol

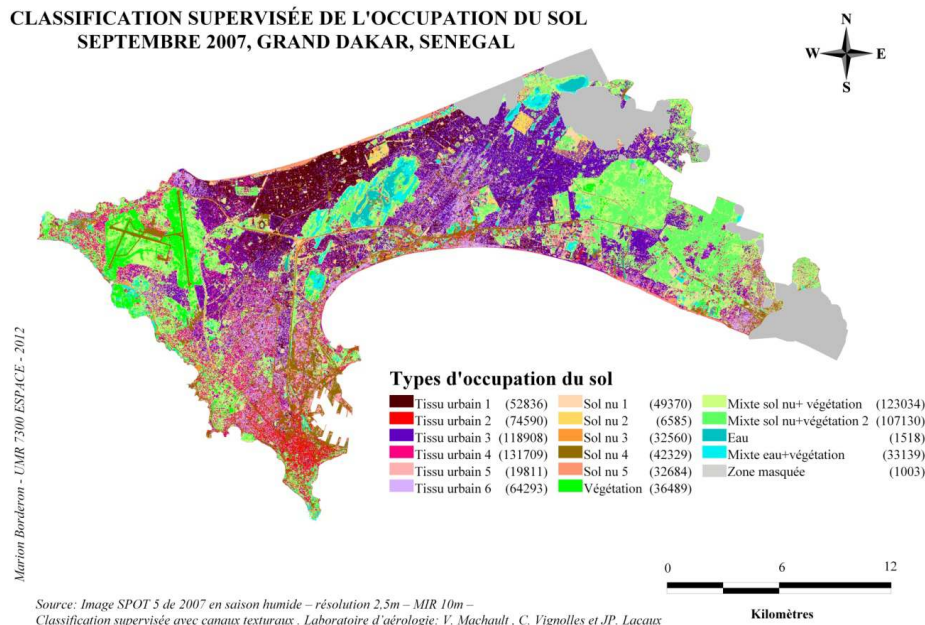
- 21 Le profil urbain de Dakar effectué par le programme des Nations Unies pour les établissements humains (UN Habitat, 2007), nous rappelle brièvement que la typologie urbaine de Dakar s'inscrit dans son histoire. Des anciens villages Lébous aux quartiers coloniaux en passant par les lotissements planifiés ou d'habitat informel sans réseau d'adduction d'eau, l'agglomération connaît des espaces aux morphologies bien différenciées. Ces divers types d'habitats présentent des caractéristiques facilement discriminables par les méthodes de télédétection, telles que le type et la densité de bâtiments ou le type de sol.
- 22 Par classification supervisée d'images satellites, avec connaissance préalable du terrain, il est possible d'identifier des trames archétypiques, dites « parcelles d'entraînement » (ou ROI pour *Region Of Interest*) qui définissent des zones de l'image appartenant chacune à un type de couvert ou d'occupation du sol. Tous les éléments d'occupation du sol sont alors intégrés dans une classe spécifique qui permet leur reconnaissance automatique sur l'ensemble de l'image. Le choix d'une classification supervisée sur les images à notre disposition (SPOT-5 à 2,5 et 10 mètres de résolution spatiale) nous a permis d'obtenir des résultats très pertinents, présentés dans le tableau 2. Ne souhaitant pas insister sur la technique (présentée de façon plus détaillée en annexe), nous aborderons directement les résultats obtenus, présentés dans la figure 4.

Tableau 2 : Caractéristiques des types de tissus urbains de l'agglomération dakaraise

Nom du tissu urbain	Description	Photographie	Diagramme	Caractéristiques	Photographie
Tissu 1	Quartier résidentiel de haute densité, avec des immeubles à plusieurs étages et des rues étroites.			Quartier résidentiel de haute densité, avec des immeubles à plusieurs étages et des rues étroites.	
Tissu 2	Quartier résidentiel de moyenne densité, avec des immeubles à deux ou trois étages et des rues plus larges.			Quartier résidentiel de moyenne densité, avec des immeubles à deux ou trois étages et des rues plus larges.	
Tissu 3	Quartier résidentiel de faible densité, avec des immeubles à un ou deux étages et des rues larges.			Quartier résidentiel de faible densité, avec des immeubles à un ou deux étages et des rues larges.	
Tissu 4	Quartier résidentiel de très faible densité, avec des immeubles à un étage et des rues très larges.			Quartier résidentiel de très faible densité, avec des immeubles à un étage et des rues très larges.	
Tissu 5	Quartier résidentiel de très faible densité, avec des immeubles à un étage et des rues très larges.			Quartier résidentiel de très faible densité, avec des immeubles à un étage et des rues très larges.	
Tissu 6	Quartier résidentiel de très faible densité, avec des immeubles à un étage et des rues très larges.			Quartier résidentiel de très faible densité, avec des immeubles à un étage et des rues très larges.	

Source : Image SPOT 5 de 2007 en saison humide - résolution 2,5m - MIR 10m - Classification supervisée avec canaux texturaux. Laboratoire d'aérodologie. V. Machault, C. Vignolles et JP. Lacaux

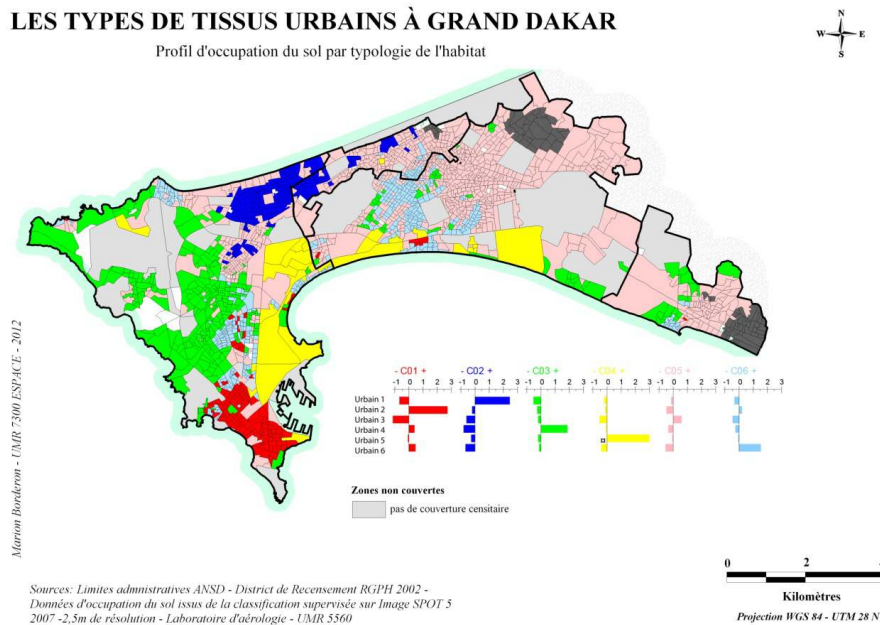
Figure 4 : L'occupation du sol à Dakar, une cartographie par télédétection



23 On distingue différents types de couvert et d'occupation du sol dans la figure 4⁸. Comparée à la figure 3, cette cartographie nous montre que les DR habités sont très fortement urbanisés. Pour aller plus loin, nous avons donc caractérisé chaque DR en fonction du type d'occupation du sol. Là encore, nous avons eu recours à une CAH. Elle aurait pu porter sur les 16 types d'occupation du sol identifiés, mais seules les 6 classes

d'urbain étaient réellement discriminantes. Il en résulte une typologie qui reprend grossièrement les profils de la classification supervisée (voir figure 5).

Figure 5 : Profils types des tissus urbains des districts de recensements



- 24 Sur la figure 5, la fragmentation spatiale est moins marquée que sur la figure 3. Les disparités d'occupation du sol ne sont pas aussi marquées que les disparités socio-économiques. Agréger les informations d'occupation du sol à l'échelle du DR lisse l'information et donne la tendance majoritaire du type de tissus urbains présent dans cette entité spatiale. Par conséquent, certaines subtilités de l'hétérogénéité socio-spatiale de la zone d'étude sont ainsi moins visibles. Les quartiers du Plateau par exemple semblent plus uniformément contenir le type de tissu 'urbain 2'. Quel lien entre tissu urbain et niveau de richesse ?
- 25 Au-delà de l'accroissement des connaissances sur l'environnement dakarais, ces deux typologies permettent de se demander si certains tissus urbains correspondent à un niveau de richesse particulier. Nous disposons désormais pour l'ensemble de l'agglomération dakaraise d'une information à l'échelle des DR qui nous indique leur niveau de richesse et le type de tissu urbain qui les caractérise. Nous savons par ailleurs qu'il existe souvent un lien entre les deux, et faisons donc l'hypothèse qu'il est possible de le mettre en évidence. L'idée sous-jacente est de pouvoir mesurer la corrélation entre les trames urbaines reconnues par télédétection et les caractéristiques économiques des espaces, le bâti constituant alors le lien entre l'information spatiale et la signification sociale des objets identifiés.

Mesure de la relation

- 26 Afin de croiser des produits issus de l'analyse des données des deux sources précédentes, nous nous sommes tournés vers un test de Chi², qui permet de tester l'indépendance entre deux variables de type qualitatif. Il s'agit de regarder quel lien existe entre

l'appartenance d'un DR à une classe de richesse définie par l'analyse des données censitaires et l'appartenance de ce même DR à une classe de profil urbain définie par le biais de la télédétection.

Tableau 3 : Classification croisée des districts de recensement en fonction de leur appartenance aux classes de richesse/pauvreté et à leur profil urbain

Type d'urbain	Classe 1 <i>Urbain 2</i>	Classe 2 <i>Urbain 1</i>	Classe 3 <i>Urbain 4</i>	Classe 4 <i>Urbain 5</i>	Classe 5 <i>Urbain 3</i>	Classe 6 <i>Urbain 6</i>	Total
Richesse	<i>dominant</i>	<i>dominant</i>	<i>dominant</i>	<i>dominant</i>	<i>légèrement dominant</i>	<i>dominant</i>	
Aisés	30	0	8	2	4	3	47
Moyens supérieurs	20	29	159	12	135	29	384
Moyens	50	132	57	6	282	125	652
Pauvres	54	20	14	4	48	61	201
Très pauvres	2	18	34	8	400	145	607
Total	156	199	272	32	869	363	1891

Tableau 4 : Tableau du Chi² (en gras : contributions significatives. En bleu : résidus positifs, en rouge, résidus négatifs)

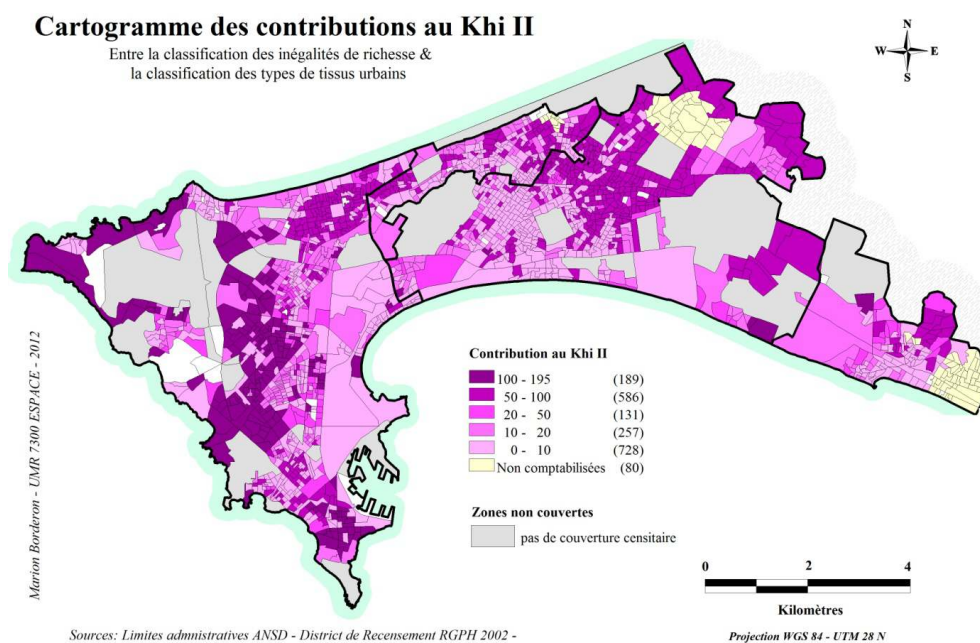
Type d'urbain	Classe 1 <i>Urbain 2</i>	Classe 2 <i>Urbain 1</i>	Classe 3 <i>Urbain 4</i>	Classe 4 <i>Urbain 5</i>	Classe 5 <i>Urbain 3</i>	Classe 6 <i>Urbain 6</i>	Total
Richesse	<i>dominant</i>	<i>dominant</i>	<i>dominant</i>	<i>dominant</i>	<i>légèrement dominant</i>	<i>dominant</i>	
Aisés	176,02	4,02	0,23	4,95	14,34	1,83	171,66
Moyens supérieurs	4,31	27,12	194,94	3,22	9,74	4,66	201,37
Moyens	0,27	0,00	14,43	58,56	1,04	2,30	76,59
Pauvres	84,44	13,02	7,69	0,07	21,31	0,11	126,63
Très pauvres	46,16	6,96	32,55	32,95	52,54	0,50	243,99
Total	311,18	51,13	249,84	99,74	98,97	9,39	820,24

- 27 La forte valeur du Chi² observé (820,24), largement supérieur au Chi² théorique (45,33 pour p=0.001), confirme que les deux typologies ne sont pas indépendantes. Le résultat

du test de Tschuprow, qui mesure l'intensité du lien entre les deux objets, vient mettre en perspective le Chi². Cette intensité est de 32 %. L'analyse du tableau 4 nous indique quelles sont les contributions les plus importantes au Chi², autrement dit, quels sont les cas de figure où la dépendance entre un type socio-économique de DR et un profil urbain spécifique est la plus forte ou la plus opposée. La distribution des contributions au Chi² montre que 8 cas contribuent significativement au Chi² (en gras), partagés entre 5 associations positives entre les variables (en bleu) et 3 associations négatives (en rouge).

- 28 Une cartographie de la contribution au Chi² permet de spatialiser cette information (figure 6). Cette cartographie permet de décrire les espaces qui sont reconnus par un type d'occupation du sol qui fait écho à un ou des profils socio-économiques des habitants. Il est ainsi présenté ici les districts de recensement qui sont les plus représentatifs de ces corrélations (il convient donc de comparer cette carte avec les figures 3 et 5). Les individus de la classe supérieure (contribution au Chi² de 100 à 195) sont ceux dont le profil « inégalités de richesse » et « tissus urbains » sont les plus corrélés. À l'inverse, il ressort que les DR de l'Ouest de Pikine et ceux de Dakar à proximité de la Patte d'oie n'ont pas un profil urbain type qui nous renseignerait sur la nature de la population résidente¹⁰.

Figure 6 : Cartographie des contributions au Chi²



Des espaces socialement différenciés

- 29 La lecture du tableau 4 nous confirme que la dépendance entre le type socio-économique des districts de recensement et leur profil urbain est forte et identifie des liens marqués entre chaque catégorie. Ainsi, les DR les plus riches sont très majoritairement de type "urbain 2 dominant" (voir le tableau 2 pour le détail des types urbains). Néanmoins, ce type d'urbain est aussi partagé par des DR pauvres¹¹, mais exclus au contraire les DR les plus pauvres. Les DR "moyens supérieurs" sont caractérisés avant tout par des types urbains 4 dominants (et dans une moindre mesure par des types urbains 5), qui s'y

identifient pleinement. Les DR "moyens" sont plus souvent présents dans des espaces urbains de type 5. Les DR "pauvres" sont associés type urbain 2 (qui restent cependant plus associés aux DR "aisés"). Enfin les DR les plus pauvres sont associés au type urbain 3, et montre une association négative avec les types urbains 2, 4 et 5.

- 30 On peut donc associer à chaque profil socio-économique un type urbain particulier, même si les DR aisés et pauvres partagent le même type d'espace. À l'inverse, 2 types urbains ne sont associés à aucun profil socio-économique particulier. Le type urbain 5 dominant a été décrit comme ne ressemblant morphologiquement pas à du bâti résidentiel, nous ne sommes donc pas surpris de ne pas y trouver de type socio-économique particulier. Le type urbain 6 dominant est quant à lui mal identifié morphologiquement (pas de reconnaissance aisée de la voirie, impression d'îlots denses composés de maisons agglomérées).
- 31 De cette description ressort le constat que l'espace urbain dakarois est très fragmenté socio-économiquement, et que cela se voit dans la morphologie urbaine. Néanmoins, à cette hétérogénéité globale s'ajoute une hétérogénéité plus locale qui fait se juxtaposer des populations très pauvres à des populations plus riches. Ainsi, il est possible d'associer des profils socio-économiques à des types urbains, mais la réciproque est moins vraie.

Des résultats encourageants

- 32 Nous concluons que l'étude croisée de la morphologie urbaine (via la télédétection) et des caractéristiques socio-économiques des espaces (grâce au recensement général de la population et de l'habitat) confirme la pertinence méthodologique de notre entreprise et valide ses hypothèses. Malgré la diversité des formes urbaines et des situations socio-économiques, nous parvenons à des résultats robustes qui mettent en évidence les liens entre profils urbains dominants et caractéristiques de richesse ou de pauvreté des districts de recensements.
- 33 À ce stade, le travail effectué a permis une exploration nouvelle et approfondie de l'espace dakarois. Un accroissement des connaissances sur ces tissus urbains dans leurs attributs physiques et sociaux sera en outre un support utile pour l'entreprise d'autres études qui nécessite la discrimination des sous-espaces urbains de l'agglomération.
- 34 On devra cependant apporter un bémol. Si l'association de profils issus de la télédétection à des profils socio-économiques s'est révélée efficace (et particulièrement sur les DR les plus pauvres), la réciproque (l'association d'un profil socio-économique à un type urbain dominant) ne l'a pas été autant. Il est ainsi difficile, nous l'avons déjà remarqué, de distinguer automatiquement districts aisés et districts pauvres. Ceci constitue une limite de cette expérience. Puisque les images satellites sont plus faciles à obtenir que les données censitaires, il eut été intéressant de pouvoir se passer des secondes à partir de l'extrapolation issue des premières.
- 35 Au-delà des limites évoquées, on peut espérer améliorer le travail dans l'avenir en utilisant de nouvelles sources de données et de nouveaux moyens de traitement. On pense en premier lieu aux apports d'autres méthodes de télédétection comme les classifications contextuelles et les analyses texturales, qui permettent de prendre en compte les structures internes des morphologies urbaines (texture, densité, taille des unités d'habitation, régularités ou désordre...) (Voir par exemple Flanders *et al.*, 2003). On envisage aussi d'autres méthodes de traitement, notamment le recours à des

classifications orientées objets (ces deux publications en sont un exemple : Ebert et Kerle, 2008 et Khormi et Kumar, 2011). En outre, la disponibilité des données censitaires à l'échelle de district, aussi fines soient-elles, pose la question de l'hétérogénéité de ces unités. Le problème du MAUP, se pose ici lorsque de très fines données issues de l'imagerie satellite sont finalement agrégées pour être comparables et comparées à celles du recensement (Openshaw, 1984). L'extraction de variables environnementales est dès lors encore plus intéressante lorsqu'elle est associée à des données d'enquêtes pour lesquelles les personnes sont spatialisées.

BIBLIOGRAPHIE

- ANSD, 2006, *Rapport National de présentation, Résultats du troisième recensement général de la population et de l'habitat - 2002*, Agence nationale de la statistique et de la démographie.
- ANSD, 2008, *Situation économique et sociale de la région de Dakar de l'année 2007*, (Rapport Final).
- Borderon M., 2013, « Why here and not there? Developing a spatial risk model for malaria in Dakar, Senegal », *Source n° 17/2013, Social Vulnerability and the United Nations University Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS)*, 108-120. <http://www.ehs.unu.edu/file/get/11051.pdf>
- Chadule, 1974, *L'analyse statistique des données en géographie*, 192 p., Masson, Paris
- Datt G., Ravallion M., 1993, « Regional Disparities, Targeting, and Poverty in India », in Lipton M., Van der Gaag J., (eds.), *Including the poor*, Banque Mondiale, 91-114.
- Deichmann U., 1999, *Geographic aspects of inequality and poverty*, texte pour le site Internet de la banque mondiale, non publié.
(http://siteresources.worldbank.org/INTPGI/Resources/Pro-Poor-Growth/5319_povmap.pdf)
- Diaz Olvera L., Plat D., Pochet P., 2005, « Marche à pied, pauvreté et ségrégation dans les villes d'Afrique de l'ouest. Le cas de Dakar. » In Buisson M. A., Mignot D. (Eds), *Concentration économique et ségrégation spatiale*, Bruxelles, de Boeck, coll. Economie Société Région, 245-261.
- Dureau, F., Barbary, O., Michel, A., Lortic, B., 1989, *Sondages aréolaires sur image satellite pour des enquêtes socio-démographiques en milieu urbain*, manuel de formation, Coll. Didactiques, ORSTOM, Paris.
- Ebert, A., & Kerle, N., 2008, « Urban social vulnerability assessment using object-oriented analysis of remote sensing and gis data. a case study for Tegucigalpa, Honduras. » *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, No.37, 1307-1312.
- Flanders D., Hall-Beyer M., and Pereverzoff J., 2003, « Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut-block delineation and feature extraction », *Can. J. Remote Sensing*, vol. 29, No. 4, 441-452.
- Guilmoto C.Z., Oliveau S., Vingadassamy S., 2002, « Un système d'information géographique en Inde du Sud : Théorie, mise en œuvre et applications thématiques », *Espace, Populations et sociétés*, Lille, 147-163.

Khormi, H. M., & Kumar, L., 2011, « Modeling dengue fever risk based on socioeconomic parameters, nationality and age groups: GIS and remote sensing based case study » *Science of the Total Environment*, vol. 409, No.22, 4713-4719.

Lall S.V., Deichmann U., 2009, *Density and Disasters. Economics of Urban Hazard Risk*, World Bank Policy research working paper, No.5161.
(http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2009/12/29/000158349_20091229205549/Rendered/PDF/WPS5161.pdf)

Machault V., Vignolles C., Pages F., Gadiaga L., Tourre M.Y., Gaye A., Sokhna C., Trape J.F., Lacaux J.P., Rogier C., 2012, « Risk mapping of *Anopheles gambiae* s.l. densities using remotely-sensed environmental and meteorological data in an urban area: Dakar, Senegal. », *PLoS One*. 2012, vol. 11, No.7. <http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0050674>

Mennis J., 2003, « Generating Surface Models of Population Using Dasymetric Mapping », *The Professional Geographer*, vol. 55, 31-42.

Merchant, E.R. Deane G.D., Gutmann M.P., 2011, *Navigating Time and Space in Population Studies*, Springer.

Minvielle J.-P., Diop A.F., Niang A., 2005, *La pauvreté au Sénégal : des statistiques à la réalité*, Karthala.

N'Donky A., 2011, *Contextes spatiaux et recours aux soins en cas de fièvre chez l'enfant de 2 à 10 ans dans l'agglomération de Dakar*, thèse de doctorat en géographie de l'Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal, non publié.

Oliveau S., Audard F., Bonnefoy J.-L., N'Donky A., 2009, « Retour sur une expérience d'échantillonnage spatial. Choix de lieux d'enquête dans l'agglomération dakaraise », *colloque Théoquant*, 04-06 mars 2009, Besançon.

Openshaw, S., 1984, *The Modifiable Areal Unit Problem*. Norwich: Geo Books. ISBN 0-86094-134-5.

Ravallion M., Wodon Q., 1997, *Poor areas, or only poor people?* Policy research working paper, No.1798.

Sen A., 1983, « Poor, Relatively Speaking », *Oxford Economic Papers, New Series*, vol. 35, No.2, 153-169.

Tall S. M., 2009, *Investir dans la ville africaine - Les émigrés et l'habitat à Dakar*, Paris, Karthala.

Un-Habitat, 2007, « Senegal: Profil Urbain de Dakar » in *Rapid Urban Sector Profiling for Sustainability (RUSPS)*, Regional Office for Africa and the Arab States.

Vernière M., 1978, « Méthode de mesure quantitative de la croissance urbaine dans l'espace et dans le temps. Exemple d'une banlieue de Dakar (Sénégal) », *Photo-interprétation*, No.1, 34-55.

ANNEXES

Méthodologie détaillée pour le traitement des images

Images et canaux utilisés

Deux scènes SPOT-View issues du satellite SPOT-5 ont été acquises le 26 septembre 2007, en niveau de prétraitement 3 (ou orthoimages). La projection cartographique était UTM zone 28, WGS 84. La première image était composée de 4 bandes spectrales à 10 mètres de

résolution spatiale, dans les longueurs d'onde vert, rouge, proche infrarouge et moyen infrarouge et la seconde de 3 bandes à 2,5 mètres de résolution spatiale (vert, rouge, proche infrarouge). La précision de localisation de ce type d'image est de l'ordre de 10 mètres. Ces images couvraient une large partie de la presque-île du Cap Vert.

La bande moyen infrarouge à 10 mètres a été ré-échantillonnée à 2,5 mètres puis a été ajoutée à l'image à 2,5 mètres pour créer une image à 4 bandes de 2,5 mètres de résolution spatiale. Un masque couvrant la mer, les nuages et leur ombre était digitalisé afin que ces zones soient exclues des traitements. La superficie d'étude hors de ce masque était de 178 km².

Des bandes de texture ont été calculées à partir des 4 bandes de l'image à 2,5 mètres, en se basant sur des matrices de co-occurrence. Après examen visuel des bandes résultantes, 2 d'entre elles ont été ajoutées à l'image 4 bandes : la variance et le contraste de la bande 1, calculés dans une fenêtre mobile de 5x5 pixels.

Classifications et résultats

Deux types de classification du couvert et de l'utilisation du sol étaient effectués :

- a. Classification non supervisée Isodata pour l'étape de cartographie dasymétrique.
- b. Classification supervisée Maximum Likelihood pour la recherche des associations avec les inégalités de richesse.

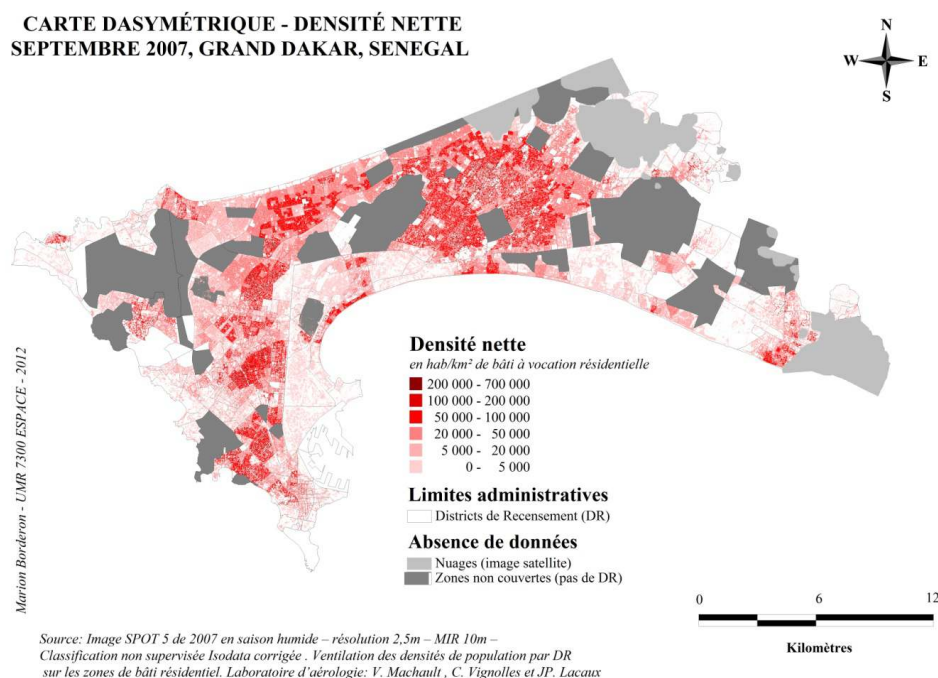
a. La classification non supervisée a été effectuée sur l'image à 4 bandes de 2,5 mètres de résolution spatiale. Elle a été paramétrée pour générer 25 classes d'utilisation du sol. Chaque pixel de l'image était donc affecté par l'algorithme à une de ces classes. À la suite de ce traitement automatique, les 25 classes étaient ré-affectées manuellement et par photo-interprétation à l'une des 2 classes suivantes : bâti ou non-bâti (sans autre distinction d'environnement ni de type d'urbain). L'image de sortie était donc une image binaire bâti/non-bâti. Le choix d'un grand nombre de classes au départ (25) permettait de limiter les confusions entre types de couvert du sol.

Le principe de la cartographie dasymétrique (Mennis, 2003) est d'ajuster les densités de population humaine au niveau des surfaces habitables uniquement. À Dakar, les densités de population sont fournies par DR. Or les DR ne sont pas couverts à 100 % par du bâti. La cartographie dasymétrique permet de recalculer les densités de population réelles, en excluant les zones de végétation, eau, sols nus, et routes.

Le calcul suivant était appliqué à tous les pixels de l'image :

Densité Nette = (Densité dans le DR x Surface bâti) / Surface du DR

Figure 7 : Les densités nettes dans l'agglomération de Dakar



Ici, il est admis que des imprécisions peuvent avoir été introduites en n'excluant pas systématiquement le bâti non résidentiel de la classe bâti.

La classification non supervisée a été privilégiée de façon à obtenir une classification pixel à pixel. Alors que le processus de classification supervisée décrit ci-dessous a été orienté pour détecter différents types de quartiers et d'urbanisation, la classification pixel à pixel donne un résultat plus « morcelé » et donc plus propice à identifier uniquement les bâtiments, sans tenir compte de leur environnement très proche (routes, chemins, cours d'eau,...).

b. La classification supervisée était effectuée sur l'image à 6 bandes, contenant les 2 bandes de texture. Ce type de classification affecte chaque pixel aux classes définies par des parcelles d'entraînement, sur une base probabiliste. Sur l'image SPOT-5 de 2007, ces parcelles étaient numérisées manuellement par photo-interprétation, en 16 différentes classes, par un opérateur ayant une bonne connaissance du terrain. Six classes d'urbain étaient définies pour représenter au mieux l'hétérogénéité du couvert dans l'agglomération (voir tableau 2), ainsi que 5 types de sols nus (y compris le goudron des routes), 3 types de végétation, mixée ou non avec du sol nu, 2 types de couvert en eau, mixé ou non avec de la végétation. Il était attendu que la présence des bandes de texture améliore la détection des différents types d'urbains, caractérisés par différentes tailles et proximité de bâtiments. En particulier, l'urbain de type « village », très dense, pourrait se confondre avec d'autres types de quartier si le caractère d'organisation du bâti était ignoré.

Suite au processus de classification, un filtre de majorité était appliqué sur l'image classée, par l'utilisation d'une fenêtre glissante de 5x5 pixels, de façon à supprimer les pixels isolés.

450 polygones d'entraînement ont été numérisés au sein des 16 classes pour une superficie totale de 1.7 km². Selon la règle généralement admise, la superficie des parcelles d'entraînement couvrirait environ 1 % de la superficie à classer. La qualité de la classification a été vérifiée par le calcul de la précision globale (Overall Accuracy) et du coefficient Kappa.

Ce dernier mesure la concordance entre le choix d'affectation des parcelles par l'algorithme issu de la classification et l'occupation du sol réelle, observée sur le terrain. Alors que la précision globale représente le pourcentage brut de pixels bien classés, le coefficient Kappa tient compte de la part aléatoire des pixels bien classés.

L'objectif de l'étude étant dirigé vers l'identification des différents types d'urbain, la qualité de la classification supervisée a été calculée en regroupant les 4 classes contenant de la végétation (c'est-à-dire végétation seule, végétation + eau et deux classes de végétation + sol nu) ainsi que 3 classes de sol nu contenant de la terre (les classes de goudron et de sable ont été conservées). Le Coefficient Kappa a été calculé à 79 % (précision globale = 82 %). Quant à la différenciation bâti/non bâti uniquement, le Kappa était de 88 % (précision globale = 94 %). Concernant le calcul du Kappa entre les différents types d'urbains uniquement, il était de 76 % (précision globale = 82 %). Les erreurs de classification les plus importantes se situaient au niveau de l'urbain 2, qui est parfois confondu avec les urbains 5 et 6.

Ces valeurs de discrimination au niveau des tissus urbains représentent la précision sur laquelle on se base pour la suite de cette étude. Dans le futur, il est envisageable de chercher à améliorer la qualité de la différenciation des différents types d'urbain. Par exemple, la taille des bâtiments, la largeur des routes ou la distance séparant les maisons des routes ont déjà été utilisées comme des indicateurs de la qualité de l'habitat. Des images satellites à haute ou très haute résolution spatiale (env. 1 mètre) permettraient de fournir ce type d'informations.

Tous les traitements d'images ont été effectués avec le logiciel ENVI 4.7.

NOTES

1. Programme ACTUPALU, financé par l'ANR (ANR-07-SEST-001).
2. Les Niayes sont de grandes dépressions inter-dunaires remplies d'eau et/ou de végétation.
3. Il s'agit d'une cartographie de l'évolution urbaine entre 1978 et 2009. Les dates intermédiaires sont 1986, 1995 et 1999.
4. Voir la présentation sur le site du PNUD : <http://hdr.undp.org/fr/statistiques/idh/>
5. Pendant les 6 mois précédant la passation du questionnaire, faute de moyen financier.
6. Dans une ville basse, comme Dakar, le logement dans un appartement constitue un marqueur social (hyper centralité de la résidence), souvent associé à sa fonction : logement par l'employeur (voir la note 7).
7. Si la propriété évite en partie la pauvreté, elle n'est pas pour autant signe de richesse.
8. 6 profils de tissus urbains, 5 profils de sols nus, 5 profils de végétation et/ou d'occupation en eau
9. Concernant la méthodologie et l'interprétation du Chi², nous renvoyons le lecteur à l'ouvrage classique du groupe Chadule (1974).

10. On peut d'ailleurs faire l'hypothèse que cela traduit la marque des changements sociaux à l'œuvre dans ces espaces : enrichissement à Pikine, créant une mixité sociale plus importante ; rénovation urbaine autour de la patte d'Oie.

11. On se rappellera que le tableau croisé des effectifs, comme celui du Chi² doit se lire en ligne et en colonne. On peut donc y trouver une association forte, quasi-unique en ligne, mais plus partagée en colonne (ou le contraire).

RÉSUMÉS

Les études menées sur les espaces urbains nécessitent une information fine et de bonne qualité. Celle-ci a un coût qui limite sa disponibilité dans les pays les moins développés et rend les chercheurs dépendants des ressources existantes. Quelle que soit la problématique envisagée, la question des sources apparaît donc primordiale.

Avec le développement et la démocratisation des SIG et de l'imagerie satellite, un nombre important d'informations, issues de sources de plus en plus diversifiées, devient disponible. Les satellites civils d'observation de la terre qui survolent la planète depuis les années 1960-70, permettent la détection et la cartographie des différents écosystèmes.

Dans cette étude, nous envisageons d'explorer l'hétérogénéité socio-spatiale de l'agglomération dakaraise. Grande métropole africaine, Dakar possède une couverture censitaire de bonne qualité, qui a été récemment spatialisée. Nous disposons en outre d'images satellite récentes qui viennent compléter cet appareillage.

Même si des études ayant exploré le croisement de données censitaires avec de l'information satellitaire existent déjà, l'application de cette méthode à l'agglomération dakaraise permet d'étudier précisément les sous-espaces urbains de la ville. L'intérêt est d'établir des liens entre les attributs sociaux (par les données censitaires) des paysages de ces sous-espaces, et leur occupation du sol (par les variables environnementales extraites de l'imagerie satellite). Ces résultats préliminaires, présentés ici, sont la pierre angulaire d'une étude sur le paludisme urbain qui interroge les interactions entre l'espace du vecteur, l'anophèle, et celui de l'hôte, l'être humain. Or, la distribution spatiale du vecteur est étroitement liée aux attributs socio-économiques des populations. Autrement dit, cet article sert dans un premier temps à évaluer la pertinence de ces deux sources pour approcher les inégalités de richesse de la population dakaraise. Ce concept se définit synthétiquement ici par le manque de ressources matérielles des habitants, ce qui les place dans une situation précaire et instable lorsqu'ils sont soumis à une menace extérieure (exemple fréquent à Dakar : inondations, maladies,...) Ce travail permet par ailleurs d'éclairer sous un nouveau jour la géographie de l'agglomération de Dakar, à une échelle fine, voire très fine.

Studies on urban spaces require detailed information with a high quality. This has a cost that limits its availability in the less developed countries and makes researchers dependent on existing resources. Whatever the considered problem, the question of sources is essential.

With the development and democratization of GIS and satellite imagery, a large number of information from increasingly diversified sources becomes available. The civilian satellites to Earth observation flying over the planet for the years 1960-70, enable the detection and mapping of different ecosystems.

In this study, we plan to explore the Dakar metropolitan area. Big African metropolis Dakar has a

good-quality census coverage, which has recently been spatialized. We also have recent satellite images complementing this equipment.

If a study on the crossing of census data with satellite information is not a very original approach, its application to the metropolitan Dakar will investigate specifically the sub-space urban areas of the city. Interest will therefore be to establish links between social attributes (by census data), landscapes in these areas, and their occupation of the land (environmental variables extracted from satellite imagery). These preliminary results, presented here, will be the cornerstone of a study of urban malaria, which questions the interactions between the space of the vector, *Anopheles*, and that of the host, the human being. However, the spatial distribution of the vector is closely related to socio-economic attributes of populations. In other words, we wish initially to assess the relevance of these two sources in order to approach the wealth inequalities of the population of Dakar. This concept is defined synthetically by the lack of material resources of the inhabitants, which places them in a precarious and unstable situation when they are subjected to an external threat (eg floods, diseases, ...) This work will also inform the geography of the city of Dakar, at a fine scale or even very fine.

INDEX

Mots-clés : Pauvreté urbaine, télédétection, recensement, SIG, l'agglomération dakaraise

Keywords : Urban vulnerability, remote sensing, census, GIS, Dakar metropolitan area

AUTEURS

MARION BORDERON

Doctorante,
Aix Marseille Université, UMR 7300 ESPACE,
UMR 7300 ESPACE, 29 avenue R. Schuman,
13621 Aix-en-Provence Cedex 1, France
marion.borderon@univ-amu.fr

SÉBASTIEN OLIVEAU

Maître de Conférences,
Aix Marseille Université, UMR 7300 ESPACE,
sebastien.oliveau@univ-amu.fr

VANESSA MACHAULT

Chercheur en télé-épidémiologie,
Laboratoire d'Aérogéographie, Observatoire Midi-Pyrénées,
14 avenue Edouard Belin, 31400, Toulouse, France
vanessamachault@yahoo.com.br

CÉCILE VIGNOLLES

Experte en télé-épidémiologie,
Centre National d'Etudes Spatiales,
Direction de la Stratégie et des Programmes / Terre-Environnement-Climat,
18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9, France
cecile.vignolles@cnes.fr

JEAN-PIERRE LACAUX

Professeur,
Laboratoire d'Aérodologie, Observatoire Midi-Pyrénées,
jean-pierre.lacaux@medias.cnes.fr

ALPHOUSSEYNI N'DONKY

Docteur,
Université Cheikh Anta Diop/IRD, UMR 151 LPED,
Dakar, Sénégal
alphousseyni.ndonky@ird.fr