

SUIVI DE LA TACHE URBAINE A SAINT DENIS DE LA REUNION : APPORTS DE LA MISSION PLEIADES

Thibault Catry¹, Alain Besnard²

1: SEAS-OI, UMR 228 Espace-Dev (UM2, UR, UAG, IRD), Saint-Pierre, La Réunion, thibault.catry@ird.fr

2: DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) de La Réunion, Saint-Denis, La Réunion

Résumé

Avec plus de 800 000 habitants sur un territoire de 2500 km², la Réunion connaît depuis une vingtaine d'années une urbanisation importante induisant des pressions foncières sur les espaces agricoles et naturels. Ce phénomène s'inscrit dans une problématique plus large d'aménagement du territoire insulaire contraint, dans un contexte de changement climatique où les enjeux de l'occupation de l'espace sont importants. La croissance urbaine représentant une menace pour les espaces naturels protégés de La Réunion, son évolution doit être suivie dans le temps. La DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) de La Réunion et ses partenaires réalisent depuis 1997, un suivi de l'évolution de la tâche urbaine à La Réunion. Ces cartes, réalisées à partir des ortho-photos de l'IGN (Institut Géographique National) sont mises à jour tous les 4 à 5 ans. L'interprétation de l'évolution des zones urbaines à La Réunion à partir de ces photos aériennes est rendue possible par leur très haute résolution (20cm). Cependant, leur fréquence de mise à jour est actuellement insuffisante pour mener une étude fine de l'évolution de la croissance urbaine très rapide de La Réunion. Ainsi, des images Pléiades couvrant les principales villes de La Réunion ont été acquises dans le cadre de la Recette Thématique Utilisateurs (RTU) Pléiades. Grâce à une collaboration entre l'IRD (SEAS-OI) et la DEAL Réunion, cette étude présente les résultats préliminaires de suivi de la tâche urbaine sur la ville de Saint-Denis, obtenus à partir d'images des satellites Pléiades, pour la période 2012-2013. Les premières cartographies réalisées montrent qu'en plus de la très haute résolution spatiale fournie par les images Pléiades, l'intérêt de ces données réside dans la répétitivité des acquisitions qui permettront dans les années à venir une mise à jour annuelle des cartes d'étalement urbain à La Réunion ainsi que la modélisation de son évolution à long terme.

Mots-clés : tâche urbaine, La Réunion, Pléiades, cartographie, approche orientée objet

Abstract

With a population of more than 800 000 inhabitants gathered on a 2500km² wide territory, urban areas at La Reunion have been growing continuously in the last 20 years, putting pressure on agricultural and natural areas. Urban growth is particularly important in the coastal areas, where land planning and ground occupation are strongly constrained and influenced by climate change. Being a threat to protected areas of La Réunion, urban growth has to be monitored. The DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) and its partners follow the evolution of urban growth at La Réunion since 1997. Thanks to the very high spatial resolution (20cm) of aerial photographs provided by the IGN (Institut Géographique National), maps of urban areas are realized and updated every 4 or 5 years. However, these updates are not frequent enough to carry out a precise study of the very fast evolution of urban growth at La Reunion. As a consequence, it has been decided to use Pléiades images to monitor urban growth on the island. Scenes covering the main cities of La Reunion were in the context of the Pléiades Users Thematic Commissioning. Thanks to collaboration between the IRD (SEAS-OI) and the DEAL Reunion, this study introduces the preliminary results of this urban monitoring over the city of Saint-Denis. We used Pléiades satellite images for the 2012-2013 period. First results show that not only the very high spatial resolution but also the repetitivity of the acquisitions in time allow yearly updates of urban growth maps at La Réunion and long-term modelling of urban growth evolution in the next few years.

Keywords: urban areas, La Réunion, Pléiades, mapping, object-oriented approach

1. Introduction

Avec une population qui devrait dépasser le million d'habitants en 2030 (INSEE) sur un territoire de 2500km², la Réunion connaît depuis une vingtaine d'années une urbanisation importante induisant des pressions foncières sur les espaces agricoles et naturels (Lagabrielle et al., 2007). Ce phénomène d'urbanisation, qui touche particulièrement les zones littorales, s'inscrit dans une problématique plus large d'aménagement et de gestion du territoire insulaire contraint, dans un contexte de changement climatique où les enjeux de l'occupation de l'espace sont importants (Thinon et al., 2007; Lagabrielle et al., 2010; Martignac et al., 2011). La croissance urbaine (ou étalement urbain) représentant une menace pour les espaces naturels protégés de La Réunion, son

évolution doit être suivie dans le temps (Lajoie et Hagen-Zanker, 2007).

De nombreuses études se sont intéressées au suivi de l'étalement urbain par satellite au cours des dernières décennies. Ces études sont généralement basées sur de l'imagerie satellite optique seule (Masek et al., 2000; Mavtak et al., 2005), combinée à de l'imagerie RADAR (Corbane et al., 2008) ou à une approche SIG (Méaille et Wald, 1990; Chen et al., 2000; Durieux et al., 2008). La DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) de La Réunion et ses partenaires réalisent depuis 1997 un suivi par SIG de l'évolution de la tâche urbaine à La Réunion. Ces cartes, réalisées à partir des ortho-photos de l'IGN sont mises à jour tous les 4 à 5 ans. L'interprétation de l'évolution des zones urbaines à La Réunion à partir de ces photos aériennes est rendue possible par leur très

haute résolution (20cm). Cependant, la fréquence de mise à jour des ortho-photos est actuellement insuffisante pour mener une étude fine de l'évolution de la croissance urbaine très rapide de La Réunion. C'est pourquoi, il a été décidé de tester l'apport de l'imagerie satellite dans le suivi de l'évolution de la tâche urbaine à La Réunion. En particulier, cet article présente une des premières études de la tâche urbaine basées sur de l'imagerie Pléiades sur la ville de Saint-Denis. Ce type d'images présente l'avantage de combiner la haute répétitivité temporelle à la très haute résolution spatiale. Les nomenclatures et méthodes de caractérisation des milieux urbains classiquement utilisés par la DEAL ont été appliquées aux images Pléiades. Des classifications d'occupation du sol en zone urbaine via une approche orientée objet ont permis de produire des cartes des zones urbaines de Saint-Denis de La Réunion en 2013. Les avantages et inconvénients des données Pléiades pour les problématiques d'occupation du sol à La Réunion seront également discutés.

2. Zone d'étude

La Réunion est une île volcanique française située dans l'océan Indien, au sud-est de Madagascar. Son territoire s'étend sur environ 250 km² présente un très fort relief avec un point culminant à plus de 3000 m d'altitude et des pentes pouvant dépasser les 30° (fig. 1). Environ 40% de la surface de l'île sont classés Parc National depuis 2007 et au Patrimoine mondial de l'Unesco depuis 2010 (fig. 2 et 3).

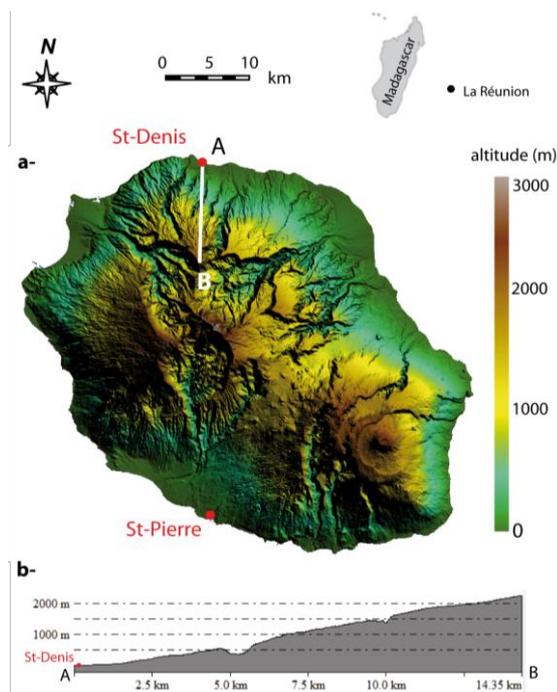


Figure 1 : a- Morphologie de l'île de La Réunion (MNT IGN, résolution 25 m), b- profil topographique AB sur la zone de Saint-Denis.

La commune de Saint-Denis, chef-lieu de La Réunion, est située au Nord de l'île et s'étend sur environ 143km²

(fig. 3). Elle est caractérisée par un relief accidenté et atteint une altitude d'environ 2200 m (fig. 1b).

3. Evolution de la tâche urbaine entre 1997 et 2008

Les études menées par la DEAL Réunion et l'AGORAH (Agence pour l'Observation de la Réunion, de l'Aménagement et de l'Habitat) à partir des BD TOPO[®] IGN 1997 et 2008 via une approche SIG, ont montré qu'en 2008, les zones urbanisées représentaient 27380 ha de la surface totale de La Réunion, contre 21061 ha en 1997 (fig. 2), soit une augmentation de 27% de la superficie occupée par des zones urbaines à La Réunion entre 1997 et 2008 (Rivière et al., 2010).

Rivière et al. (2010) ont estimé que 44% de l'extension des zones urbaines entre 1997 et 2008 concernent le Sud de La Réunion. Dans cette étude, les zones urbaines ont été classées suivant la densité du bâti, avec une zone urbaine dense, une zone urbaine étalée et une zone urbaine dispersée représentant respectivement 25, 20 et 55% de la surface totale urbanisée (fig. 3).

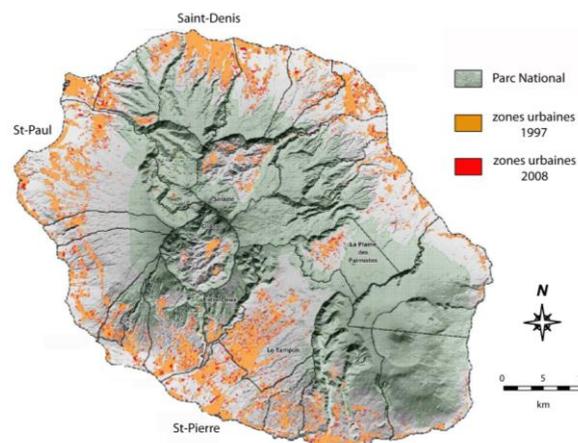


Figure 2 : Carte des zones urbaines en 1997 et 2008, et des limites du Parc National de La Réunion (d'après Rivière et al. (2010), données de la BD TOPO[®] IGN 1997 et 2008 et du Parc National de La Réunion).

Entre 1997 et 2008, la plus forte croissance a concerné les zones urbaines denses (78%), contre 25% pour les zones urbaines étalées. Les zones urbaines dispersées n'ont pas connu d'évolution durant cette période (Rivière et al., 2010). Cette croissance urbaine présente cependant une forte hétérogénéité spatiale sur le territoire de La Réunion (Rivière et al., 2010). Sur cette période, on observe une densification globale des zones urbaines à La Réunion (Croizier et al., 2008).

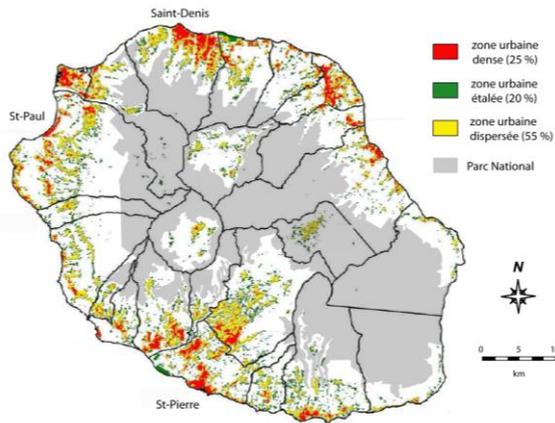


Figure 3 : Classification des 3 types de zones urbaines à La Réunion en 2008, une zone urbaine dense, une zone urbaine étalée et une zone urbaine dispersée (d'après Rivière et al., 2010, données de la BD TOPO[®] IGN 1997 et 2008 et du Parc National de La Réunion).

4. Données et méthodes

Cette étude combine SIG et télédétection pour l'analyse de l'évolution de la tâche urbaine à Saint-Denis de La Réunion entre 2008 et 2013. Pour cela, un état de référence est défini pour l'année 2008 à partir de données de bâti fournies par la BD TOPO[®] IGN (Institut Géographique National) 2008, et les photographies aériennes de la BD ORTHO[®] 2008 à 50cm de résolution (table 1).

donnée	date	résolution spatiale (m)
photo aérienne IGN (BD ORTHO [®])	2008	0,5
Pléiades	06/03/2013	0,5 (ré-échantillonnée)

Table 1 : Nature et caractéristiques des données raster utilisées dans cette étude.

Cette donnée vectorielle contient l'ensemble du bâti des zones urbaines de La Réunion en 2008, qui permet d'obtenir une carte de référence des zones urbaines de Saint-Denis pour cette année via le logiciel QGIS. Cette carte de référence sera comparée à une carte de ces mêmes zones urbaines réalisée à partir d'une image Pléiades datant du 6 mars 2013 (fig. 4). Cette image a été fournie par le CNES à la station SEAS-OI dans le cadre de la « Recette Thématique Utilisateurs » du satellite Pléiades.

La cartographie des zones urbaines de la ville de Saint-Denis en 2013 a été réalisée via une approche orientée objet, à l'aide du logiciel eCognition Developer 8.8, particulièrement adaptée à l'imagerie satellite très haute résolution (Townshend et al., 2000; Willhauck et al., 2000; Kamagata et al., 2005). La classification orientée objet utilisée est basée sur les 3 types de zones urbaines identifiés lors des travaux réalisés précédemment par la DEAL et l'AGORAH (zone urbaine dense, zone urbaine étalée et zone urbaine dispersée, Croizer et al., 2008; Rivière et al., 2010).

Une zone test a été choisie pour chaque type de zone urbaine (fig. 6), sur lesquelles une segmentation multi-résolution a été réalisée, permettant une analyse multi-échelle de l'image et l'utilisation de données de source et de nature diverses. L'occupation du sol a ensuite été classée selon 4 classes : eau, végétation, sol nu et zone urbaine (fig. 6 et 7a), à partir de règles de connaissance définies par l'utilisateur pour chaque type d'objets à classer. La segmentation et les règles de classification ont finalement été appliquées à l'ensemble de l'image.

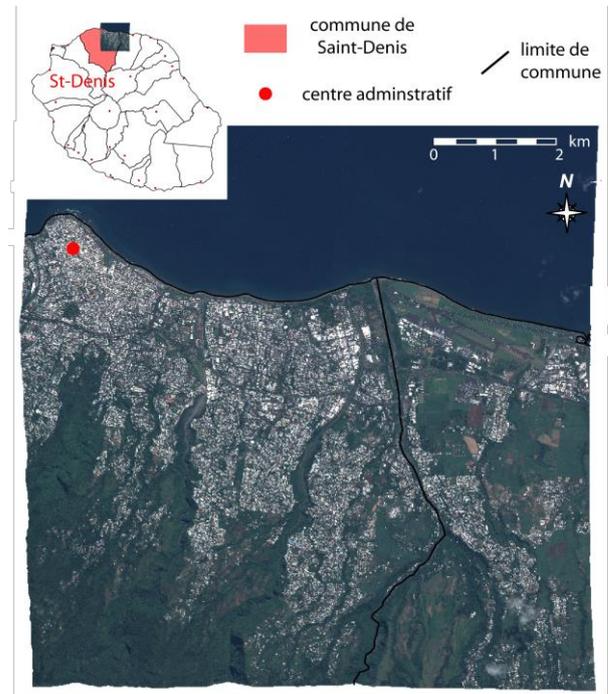


Figure 4 : Image Pléiades de la commune de Saint-Denis de La Réunion, datant du 06/03/2013. Pléiades © CNES (2013), Distribution Airbus DS /Spot Image.

5. Résultats : cartographie de l'évolution de la tâche urbaine à Saint-Denis entre 2008 et 2013 par imagerie Pléiades

Nous présentons ici une des premières études utilisant les images satellites Pléiades appliquées au suivi des zones urbaines entre 2008 et 2013 à Saint-Denis de La Réunion. L'objectif est de comparer la cartographie des zones urbaines en 2008 et 2013 afin d'estimer l'étalement urbain qui a eu lieu sur les 5 dernières années. Les données de l'IGN (BD ORTHO[®] 2008 à 50cm de résolution et BD TOPO[®] 2008) ont permis de mettre en évidence que les zones urbaines couvraient une superficie d'environ 5,8km² en 2008 (fig. 5).

Afin de réaliser la comparaison avec 2013, les zones urbaines ont été cartographiées sur l'image Pléiades du 06/03/2013 via une approche orientée objet. Dans un premier temps, cette approche a été menée sur trois zones tests, chacune étant représentative d'un type de zone urbaine identifiée dans les études précédentes à La Réunion (Croizer et al., 2008; Rivière et al., 2010; fig.6).

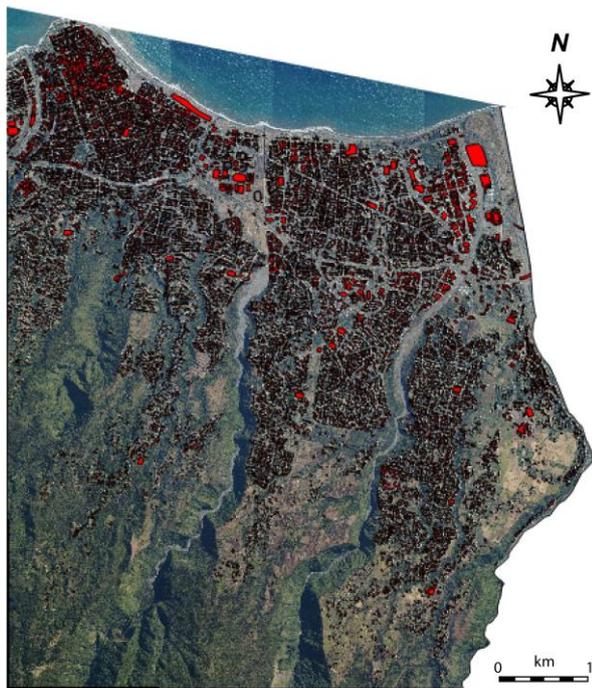


Figure 5 : Cartographie des zones urbaines (en rouge) de la ville de Saint-Denis de La Réunion en 2008, réalisée à partir de la BD ORTHO® et BD TOPO® 2008 (IGN), sur une emprise d'image correspondant à l'emprise de l'image Pléiades du 06/03/2013.

L'étude des zones urbaines denses comme le centre ville de Saint-Denis a permis de montrer que ce type de zone urbaine est caractérisé par un bâti de forte densité et un manque d'espace disponible pour de nouvelles constructions (fig. 6a). Dans ces zones, qui occupent le littoral de La Réunion, la densité et la superficie occupée par le bâti sont restées stables entre 2008 et 2013. Pour ce qui est des zones urbaines étalées, la figure 6b montre qu'elles correspondent principalement à des zones situées à mi-pente et à des altitudes comprises entre 100 et 500 m. Contrairement aux zones urbaines denses, il s'agit de zones où de l'espace reste disponible pour le développement urbain et où la surface et la densité du bâti ont été fortement modifiées entre 2008 et 2013 (fig. 6b). Enfin, les zones urbaines dispersées, concentrées à une altitude supérieure à 500 m, sont des zones où l'espace est principalement occupé par des terrains végétalisés ou agricoles. Dans ces zones, l'étalement urbain est très faible, et les seuls changements observés entre 2008 et 2013 concernent du bâti non-permanent (fig. 6c).

Cette cartographie a ensuite été généralisée à l'ensemble de la commune de Saint-Denis (fig. 7). Ainsi, la superficie couverte par des zones urbaines à Saint-Denis en 2013 a été évaluée à 6,9km², soit une augmentation de 19% par rapport à 2008. A titre de comparaison, cette croissance urbaine était de 27% entre 2003 et 2008 sur l'ensemble de La Réunion (Rivière et al., 2010). Il semblerait donc qu'une tendance au ralentissement de la croissance urbaine se dégage à La Réunion sur les 5 dernières années.

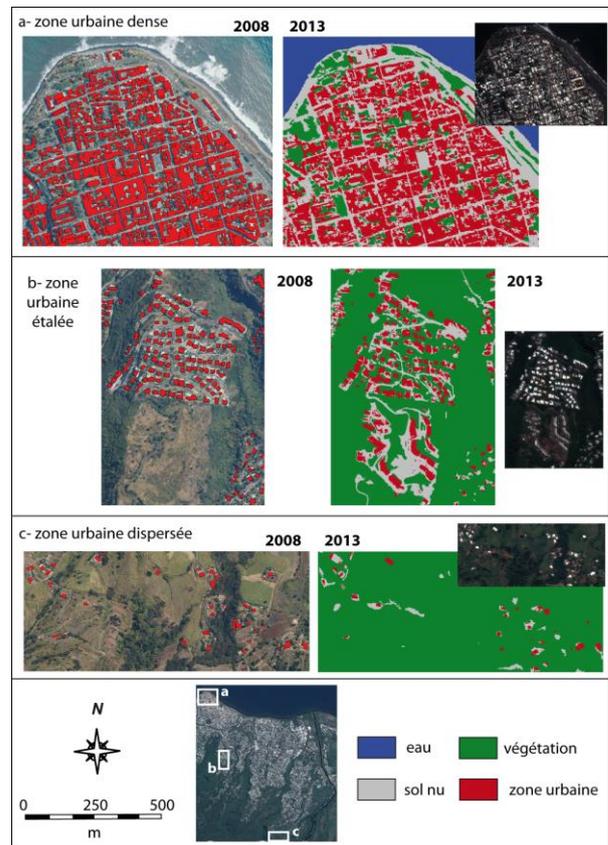


Figure 6 : Cartographie par approche orientée-objet des 3 types de zones urbaines identifiés à Saint-Denis de La Réunion en 2013, à partir d'une image Pléiades datant du 06/03/2013 : a- zone urbaine dense, b- zone urbaine étalée et c- zone urbaine dispersée. Pléiades © CNES (2013), Distribution Airbus DS /Spot Image.

6. Discussion et conclusion

Cette étude étant l'une des premières se basant sur de l'imagerie Pléiades, de nombreuses questions, tant techniques que méthodologiques se posaient à son commencement. Un certains nombres de travaux se sont intéressés par le passé à l'utilisation des SIG, de la télédétection ou des deux approches combinées, pour la cartographie et le suivi de l'étalement urbain (Masek et al., 2000; Méaille et Wald, 1990; Chen et al., 2000; Mavtak et al., 2005; Durieux et al., 2008; Corbane et al., 2008). Durieux et al. (2008) ont montré que l'utilisation des données optique SPOT 5 à 2,5 m de résolution à La Réunion permettait de mettre en place un suivi dans le temps de l'étalement urbain. Cependant, la résolution spatiale de 2,5 m des images SPOT 5 est insuffisante, par rapport à la résolution spatiale des photographies aériennes (entre 20 et 50cm), pour permettre de détecter finement le nombre et la structure des bâtiments. Dans notre étude, les photographies aériennes de la BD ORTHO® 2008 et l'image Pléiades de 2013 possèdent toutes les deux une résolution spatiale de 50cm. Cette résolution s'avère parfaitement adaptée au type de surveillance de la tâche urbaine dans son ensemble que nous mettons en place en collaboration avec la DEAL Réunion et l'AGORAH. La classification que nous avons réalisée sur l'image Pléiades du 06/03/2013 de

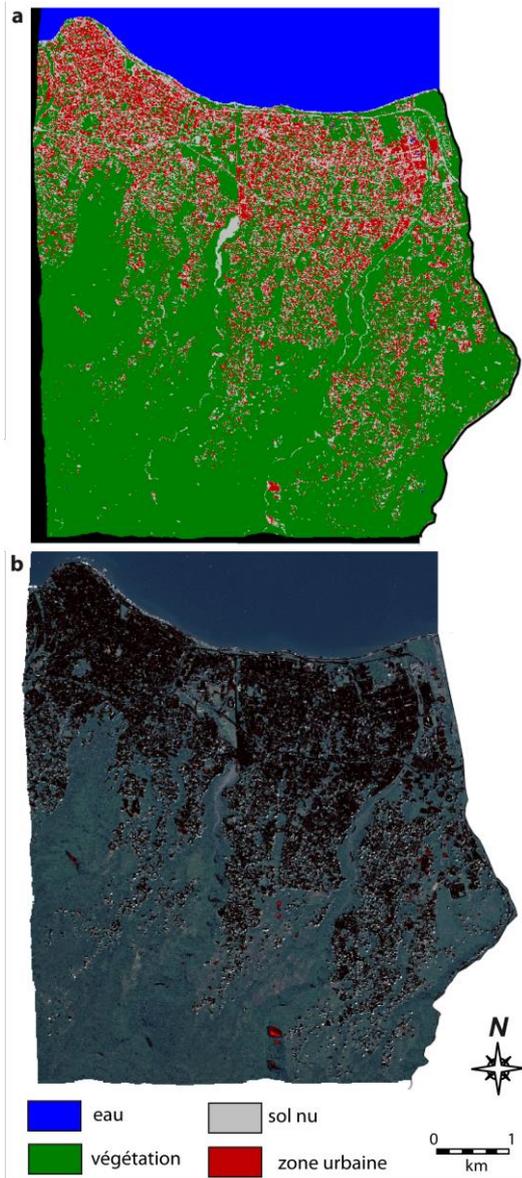


Figure 7 : Cartographie des zones urbaines (en rouge) en 2013 à Saint-Denis de La Réunion : a- résultat de la classification orientée objet et b- superposition de la classe « zone urbaine » sur l'image Pléiades du 06/03/2013. Pléiades © CNES (2013), Distribution Airbus DS /Spot Image.

la commune de Saint-Denis a montré une précision générale d'environ 83 % pour l'ensemble des classes considérées (eau, végétation, sols nus et zone urbain, table 2). Cette résolution atteint 87,7 % (table 2) pour la classe « zone urbaine », ce qui est très satisfaisant vis-à-vis de l'objectif initial qui était la cartographie de la tâche urbaine. Quelques confusions se produisent entre sols nus et zones urbaines, du fait de la très grande variabilité des géométries, surfaces et couleurs des bâtis à Saint-Denis et à La Réunion en général. Une résolution légèrement supérieure, comme celle fournie par la BD ORTHO® 2011 (20cm) permettrait probablement de minimiser ces confusions et d'améliorer la précision de la classe « zone urbaine ». Elle rendrait également plus facile la détection des dents creuses en zones urbaines. Les confusions sont plus importantes entre les zones végétalisées et les sols nus, avec une précision de

classification plus faible. Ces confusions sont causées par notre choix de classes pour la végétation qui est assez général. En effet, la végétation arbustive est classée avec une meilleure précision que les zones herbeuses ou les savanes qui peuvent être facilement confondues avec du sol nu. De plus, il n'est pas fait de distinction entre végétation naturelle et zones agricoles, ces dernières se retrouvant à la fois dans la classe « sols nus » et dans la classe « végétation ». Ces confusions expliquent la précision générale de 83 %, mais présentent un impact faible sur la précision de la classe « zone urbaine », montrant l'intérêt de l'imagerie Pléiades pour cette thématique. Une étude plus poussée de la structure des zones urbaines pourrait toutefois tirer bénéfice d'une résolution supérieure.

<i>classes</i>	<i>précision (%)</i>
eau	100
végétation	74,6
sols nus	70,5
zone urbaine	87,7
total	83,2

Table 2 : Précision de la classification orientée objet de l'image Pléiades du 06/03/2013 de la ville de Saint-Denis, réalisée à l'aide du logiciel eCognition Developer 8.8.

L'avantage majeur de l'imagerie Pléiades par rapport aux photographies aériennes est sa répétitivité dans le temps. La fréquence d'acquisition est largement supérieure à celle des images aériennes, et permettra à l'avenir de mettre en place un suivi annuel de l'évolution de l'étalement urbain à La Réunion, ce qui est bien adapté aux dynamiques urbaines enregistrées dans l'île.

Les premiers résultats exposés dans cet article ont mis en évidence une croissance urbaine forte entre 2003 et 2013, mais un ralentissement semble s'engager sur les 5 dernières années (croissance de 27 % entre 2003 et 2008 contre 19 % entre 2008 et 2013). Face au manque d'espace actuellement disponible à La Réunion, la tendance est depuis quelques années à la densification de la tâche urbaine, ce qui pourrait expliquer le ralentissement de l'étalement urbain sur les 5 dernières années. Les travaux de Croizer et al. (2008) indiquent qu'environ 1000 hectares de dents creuses étaient disponibles en 2007 au sein de la tâche urbaine existante, autant d'espace à exploiter en priorité pour le développement urbain. Cette surface s'élevait à environ 100 ha à Saint-Denis en 2007. Ces travaux ont également montré que sur la période 1997-2006, 73% des logements autorisés (principalement collectifs) se sont insérés dans la tâche urbaine existante et 27 % en dehors. Si l'on s'intéresse à l'évolution à court terme de la tâche urbaine, les experts estiment que la moitié des dents creuses seront occupées d'ici à 2020 (Croizer et al., 2008). Ainsi, nos résultats mettent en évidence que l'évolution à court terme de la tâche urbaine à La Réunion se fera à la fois par extension (notamment dans les zones urbaines étalées, voire dispersées) et par densification de l'urbain pré-existant. Quoi qu'il en soit, il apparaît

nécessaire que l'aménagement à l'échelle du territoire réunionnais soit économe en espace du fait du territoire contraint et classé de la Réunion.

Bien qu'étant préliminaires, ces résultats illustrent parfaitement tout le potentiel de l'imagerie satellite, et de l'imagerie Pléiades en particulier pour le suivi de l'étalement urbain à La Réunion. L'utilisation de la donnée Pléiades dans cette étude n'a pas souffert du relief très accidenté de La Réunion, et a permis de caractériser l'évolution des zones urbaines sur la ville de Saint-Denis de la Réunion entre 2008 et 2013, où les zones urbaines denses et dispersées montrent une grande stabilité d'extension et de densité. Les zones urbaines étalées sont les plus soumises au changement au cours de cette période, de l'espace étant disponible pour favoriser le développement urbain. L'exemple de la commune de Saint-Denis est ici utilisé pour présenter la finalité de cette étude qui est le développement d'une méthode opérationnelle (semi-automatique) de cartographie de l'étalement urbain avec mise à jour annuelle sur l'ensemble du territoire de La Réunion. Il s'agit d'une thématique identifiée comme prioritaire dans le Schéma d'Aménagement Régional adopté en 2011, dans la mesure où la compétition entre zones urbaines et espaces naturels protégés et agricoles est une clé du développement futur de La Réunion.

Remerciements

Cette étude a été financée par le projet FEDER OBSAT, porté en station SEAS-OI par l'UMR Espace-Dev. Ces travaux, qui ont été valorisés lors des Pléiades Days 2014, ont bénéficié de la mise à disposition d'images Pléiades par le CNES dans le cadre de la RTU du satellite Pléiades. Nous remercions le CNES et l'IGN pour l'accès aux images et leur support technique.

Références

Catry, T., Besnard A., 2014. Satellite monitoring of urban growth at La Reunion: insights from PLEIADES imagery. Pléiades Days, Toulouse, France.

Chen S., Zeng S., Xie C., 2000. *Remote sensing and GIS for urban growth analysis in China*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66(5), 593-598.

Corbane C., Faure J. F., Baghdadi N., Villeneuve N., Petit M., 2008. *Rapid urban mapping using SAR/optical imagery synergy*. Sensors, 8(11), 7125-7143.

Croizer E., Poupard G., Beaudemoulin W., 2008. *Densification de la tâche urbaine réunionnaise, tendances actuelles et perspectives 2020*. 2007 work of « Urban extension » group. AGORAH Report.

Durieux L., Lagabrielle E., Nelson A., 2008. *A method for monitoring building construction in urban sprawl areas using object-based analysis of Spot 5 images and existing GIS data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(4), 399-408.

Kamagata N., Akamatsu Y., Mori M., Qing Li Y., Hoshinoy Y., Hara K. 2005. *Comparison of pixel-based and object-based classifications of high resolution satellite data in urban fringe areas*. In Proceedings of the 26th Asian Conference on Remote Sensing. 7-11, Hanoi, Vietnam.

Lagabrielle E., Metzger P., Martignac C., Lortic B., Durieux L., 2007. *Les dynamiques d'occupation du sol à la Réunion (1989-2002)*. Mappemonde, 86.

Lagabrielle E., Botta A., Daré W., David D., Aubert S., Fabricius C., 2010. *Modelling with stakeholders to integrate biodiversity into land-use planning—Lessons learned in Réunion Island (Western Indian Ocean)*. Environmental modelling & software, 25(11), 1413-1427.

Lajoie G., Hagen-Zanker A., 2007. *La simulation de l'étalement urbain à La Réunion: apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la prospective territoriale*. Cybergeo: European Journal of Geography, 405.

Maktav D., Erbek F. S., 2005. *Analysis of urban growth using multi-temporal satellite data in Istanbul, Turkey*. International Journal of Remote Sensing, 26(4), 797-810.

Martignac C., Metzger P., Thion P., Cheylan J.P., 2011. *Formes de la croissance urbaine et exclusion sociale à la Réunion*. Mappemonde, 102.

Masek J. G., Lindsay F. E., Goward S. N., 2000. *Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations*. International Journal of Remote Sensing, 21(18), 3473-3486.

Méaille R., Wald L., 1990. *Using geographical information system and satellite imagery within a numerical simulation of regional urban growth*. International Journal of Geographical Information System, 4(4), 445-456.

Rivière S., Pinault M., Chane See Chu O., 2010. *Caractéristiques de la tâche urbaine en 2008 et mesure des évolutions depuis 1997*. Rapport de l'AGORAH, directeur de publication : P. Jean-Pierre.

Thion P., Martignac C., Metzger P., Cheylan J.P., 2007. *Analyse géographique et modélisation des dynamiques d'urbanisation à La Réunion*. Cybergeo, 16 (389).

Townshend J. R. G., Huang C., Kalluri S. N. V., Defries R. S., Liang S., Yang K., 2000. *Beware of per-pixel characterization of land cover*. International Journal of remote sensing, 21(4), 839-843.

Willhauck G., Schneider T., De Kok R., Ammer U., 2000. *Comparison of object oriented classification techniques and standard image analysis for the use of change detection between SPOT multispectral satellite images and aerial photos*. In Proceedings of XIX ISPRS Congress, Vol. 33, 35-42.