



**HAL**  
open science

## Cartographie et évaluation multi-échelle de l'étalement urbain à l'aide d'images Spot XS : Exemple du Mans (Ouest-France)

Moise Tsayem Demaze, Alain Trebouet

► **To cite this version:**

Moise Tsayem Demaze, Alain Trebouet. Cartographie et évaluation multi-échelle de l'étalement urbain à l'aide d'images Spot XS : Exemple du Mans (Ouest-France). Cartographie et évaluation multi-échelle de l'étalement urbain à l'aide d'images Spot XS : Exemple du Mans (Ouest-France), Nov 2008, Tananarive, Madagascar. halshs-00457689

**HAL Id: halshs-00457689**

**<https://shs.hal.science/halshs-00457689>**

Submitted on 18 Feb 2010

**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.

# **Cartographie et évaluation multi-échelle de l'étalement urbain à l'aide d'images Spot XS : Exemple du Mans (Ouest-France)<sup>1</sup>**

Moise TSAYEM DEMAZE et Alain TREBOUET  
UMR CNRS ESO-GREGUM, Université du Maine,  
Avenue O. Messiaen 72085 Le Mans cedex 09,  
Moise.Tsayem\_Demaze@univ-lemans.fr

## **Résumé**

Les recherches sur l'étalement urbain posent la question de la cartographie, de l'évaluation et du suivi spatio-temporel des villes. Elles interpellent la télédétection car celle-ci fournit en continu des images qui permettent de caractériser les territoires et leur évolution. Nous avons utilisé deux images satellites Spot XS de 1993 et de 2006 pour cartographier les modes d'occupation du sol et pour évaluer l'emprise et l'évolution du bâti dans le contexte géographique régional de l'Ouest de la France à travers l'exemple du Mans. Des classifications supervisées ont été appliquées à ces images suivant une approche multi-échelle qui distingue trois niveaux scalaires : l'agglomération urbaine, la communauté urbaine et la ville intra muros. Les résultats indiquent que l'étalement urbain décroît lorsqu'on passe du niveau de l'agglomération au niveau de la ville. De 1993 à 2006, les surfaces bâties ont augmenté au total de 49% (+2 439 ha) dans l'agglomération urbaine, de 22% (+1 168 ha) dans la communauté urbaine, de 6% (+233 ha) dans la ville du Mans intra muros. Ces résultats montrent qu'au niveau de la ville, le phénomène d'étalement urbain est caractérisé par la densification du bâti dans le peu d'espaces non bâtis encore disponibles, tandis qu'aux niveaux de l'agglomération et de la communauté urbaine, l'étalement urbain se déroule par de nouvelles constructions et par le mitage des espaces constructibles situés dans les communes périphériques de la ville du Mans.

**Mots-clés** : télédétection, Spot XS, étalement urbain, cartographie urbaine, Le Mans.

---

<sup>1</sup> Cet article est issu d'une communication présentée au colloque « Télédétection et gestion de l'environnement » organisé à Madagascar en novembre 2008 par le réseau télédétection de l'Agence Universitaire de la Francophonie et par l'université de Tananarive.

## **Introduction**

La nécessité de cartographier et de caractériser les modes d'occupation du sol en milieu urbain connaît un intérêt croissant dans le cadre des recherches relatives au développement urbain durable. Dans cette optique, la télédétection à haute résolution spatiale est utilisée pour évaluer l'étalement urbain, c'est à dire la manière dont la ville est structurée (étendue ou assise territoriale) et évolue soit en se densifiant par l'augmentation du bâti, soit en grignotant les espaces périphériques (extension urbaine, périurbanisation). Le caractère multi-date des images satellites permet de mettre en évidence les changements et d'analyser les dynamiques urbaines et péri-urbaines (Ding et al., 2007 ; Hu et Lo, 2007 ; Chi et al., 2007 ; Masek et al., 2000).

Du fait de la faible résolution des images, c'est généralement la tache urbaine qui est détectée globalement et analysée essentiellement à l'aide d'images Landsat TM (Sietchiping, 2003 ; Bianchin et al., 2004 ; Chopin et Mering, 2004 ; Gar-On Yeh et al., 2001 ; Xian et al., 2008 ; Xu, 2007). L'évolution technologique des capteurs depuis les années 90 a engendré des progrès en matière de résolutions spatiale, spectrale et radiométrique. Suite à la disponibilité des données à haute résolution, les images Spot (XS et P) et Landsat ETM+ sont de plus en plus utilisées en télédétection urbaine (Skupinski et al., 2009 ; Faure et al., 2004 ; Lacroix et al., 2005 ; Ackermann et al., 2003 ; Deng et al., 2009 ; Durieux et al., 2008 ; Park et Stenstrom, 2008 ; Assako Assako, 2000). Ces images à haute résolution spatiale permettent d'optimiser la cartographie et l'analyse des composantes du milieu urbain : tissus urbains, espaces verts urbains, surfaces bâties, type de quartiers, etc. Les méthodes mises en œuvre comprennent les classifications supervisées et non supervisées (Bianchin et al., 2004 ; Chopin et Mering, 2004 ; Assako Assako, 2000), les classifications par approche orientée-objet ou segmentation géographique (Puissant et Weber, 2004 ; Jacquin et al., 2008 ; Durieux et al., 2008), l'extraction automatique ou semi-automatique à partir des règles de type expert, d'indices ou de critères de texture (Ackermann et al., 2004 ; Faure et al., 2004 ; Wentz et al., 2008 ; Xu, 2007 ; Corbane et al., 2008).

Bien que les recherches sur l'étalement urbain soient très nombreuses, très peu d'entre elles prennent en compte l'échelle pour montrer comment le changement du niveau scalaire se traduit dans le phénomène de l'étalement urbain. Les recherches portent généralement sur un seul niveau scalaire : soit l'échelle de la ville, soit celle de la métropole urbaine, ou encore celle de la région métropolitaine. Il nous paraît important que l'ampleur de l'étalement urbain soit mesurée à différentes échelles urbaines (agglomération urbaine, communauté urbaine, ville intra muros) dans un même contexte géographique régional. L'objectif du travail présenté dans cet article est d'illustrer cette question du changement d'échelle dans la caractérisation de l'étalement urbain par télédétection. L'exemple traité porte sur Le Mans, dans la région des Pays de la Loire (Ouest de la France). Cet exemple est analysé à partir des traitements simples et facilement reproductibles (classifications supervisées) effectués sur des images Spot XS suivant une approche multi-échelle qui distingue trois niveaux scalaires : l'agglomération urbaine, la communauté urbaine et la ville intra muros.

## **Données et méthodes**

Les images satellites utilisées pour cette étude sont des images Spot XS avec une résolution spatiale de 20 mètres (haute résolution spatiale). Une image Spot d'août 1993 et une autre d'août 2006, les deux étant de niveau 2B (corrigées géométriquement et radiométriquement, mises en projection cartographique, géoréférencées), ont été utilisées pour analyser l'évolution du tissu urbain. Des traitements similaires ont été appliqués à ces 2 images afin

d'extraire des informations et d'élaborer des cartes nécessaires à la caractérisation des modes d'occupation du sol et à l'évaluation de l'évolution du bâti. Ces traitements comprennent :

- L'extraction des zones d'intérêt : agglomération urbaine, communauté urbaine, ville intra muros ;
- L'analyse des compositions colorées pour déterminer les types d'occupation urbaine du sol ;
- La classification supervisée des extraits correspondant aux zones d'intérêt ;
- L'extraction des statistiques d'occupation urbaine du sol ;
- L'évaluation de l'emprise du bâti et de son évolution spatio-temporelle.

Quatre types d'occupation urbaine du sol ont été identifiés et ont fait l'objet de classifications et de cartographie :

- Le bâti dense (centres urbains, zones de services) ;
- Les grands bâtiments (zones commerciales et industrielles en périphérie urbaine) ;
- Le bâti résidentiel ;
- L'habitat desserré ou le bâti lâche (bâti récent, espaces péri-urbanisés).

Les autres classes identifiées représentent la végétation (feuillus, bois), les cultures (maïs), les sols nus, les surfaces en eau, etc.

La règle du maximum de vraisemblance a été utilisée pour les classifications. Celles-ci ont été réitérées plusieurs fois afin de les améliorer et de valider les résultats. Les parcelles d'entraînement ont été modifiées lors des itérations, de manière à obtenir un seuil de satisfaction suffisant (90% de bonne classification et un coefficient de Kappa supérieur ou égal à 0,8). D'autres méthodes (seuillage, binarisation, NDVI) ont été testées pour conforter ou pour aider à l'interprétation et à la validation des résultats des classifications supervisées. Les statistiques issues des classifications ont été utilisées pour décrire quantitativement et qualitativement l'étalement urbain à différentes échelles d'espace (agglomération urbaine, communauté urbaine, ville intra muros) et de temps (entre 1993 et 2006).

### **Principaux résultats**

Après avoir extrait l'agglomération du Mans<sup>2</sup> sur les images de 1993 et de 2006, deux cartes ont été réalisées par classification supervisée pour évaluer l'étalement urbain aux deux dates à l'échelle de l'agglomération urbaine. Les résultats montrent que la surface urbaine totale (ensemble des surfaces bâties constituées de bâtis denses, de bâtis résidentiels, de grands bâtiments et de chantiers urbains) représentait 4 919 ha en 1993 et 7 358 ha en 2006 (fig. 1). Entre les deux dates, les étendues bâties ont augmenté de 2 439 ha, soit un taux d'accroissement de 49% en 13 ans. En valeur absolue, l'augmentation la plus importante concerne le bâti résidentiel donc la surface est passée de 2 622 ha en 1993 à 4 111 ha en 2006, soit un accroissement de 1 488 ha.

---

<sup>2</sup> L'agglomération du Mans, telle que définie dans ce travail, est constituée des communes de Le Mans, Allonnes, Arnage, Changé, Coulaines, La Chapelle Saint-Aubin, Mulsanne, Rouillon, Ruaudin, Saint-Pavace, Sargé-Lès-Le Mans, Spay, Yvré l'Evêque.

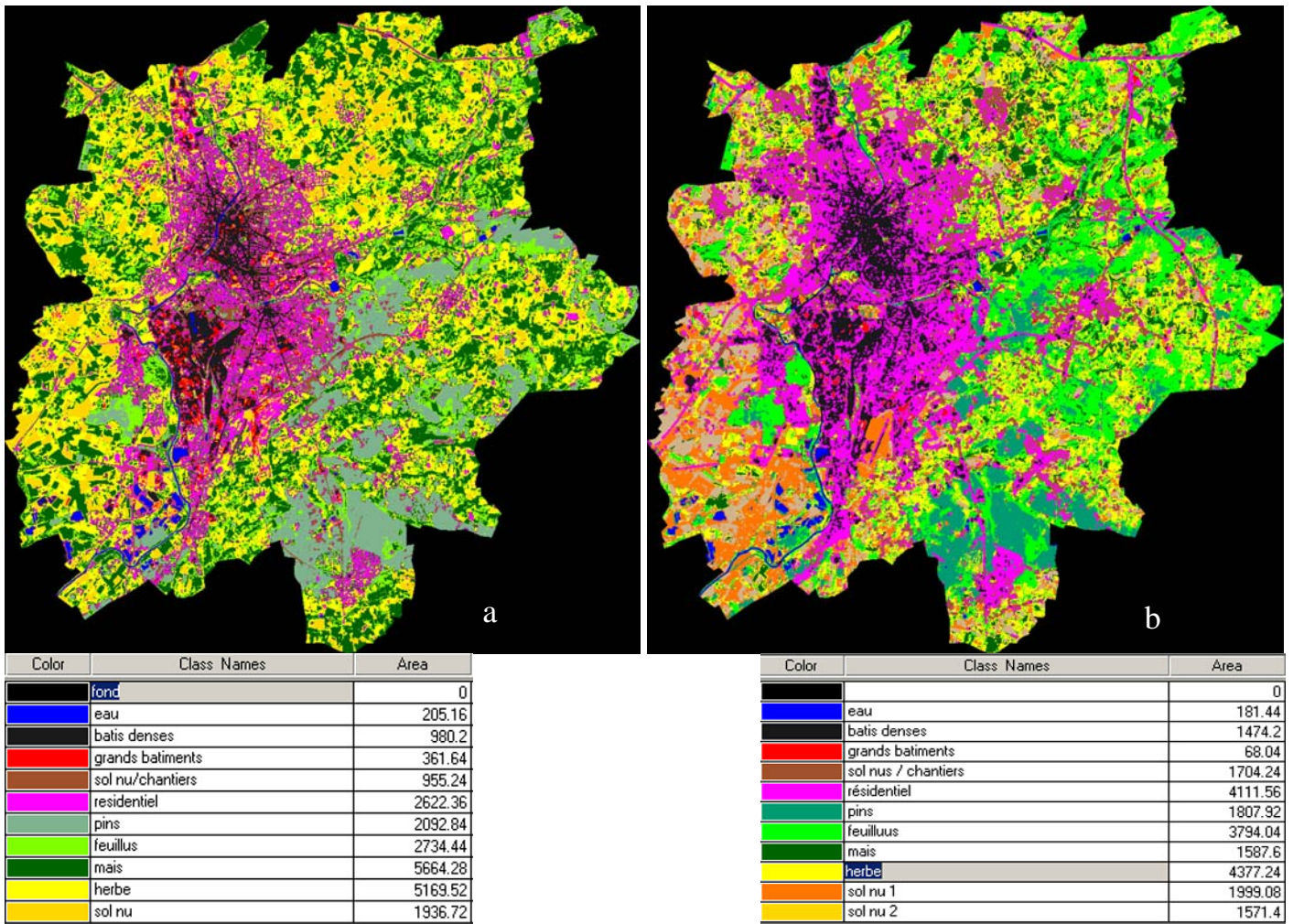


Figure 1. L'étalement urbain dans l'agglomération du Mans en 1993 (a) et en 2006 (b)

Cette augmentation du bâti résidentiel traduit l'évolution des besoins en logements de la population même si cette population n'a pas connu une hausse importante entre 1993 et 2006. D'après les données de l'INSEE, la population totale de l'ensemble des communes de cette agglomération urbaine était de 197 000 personnes en 1990, 201 000 personnes en 1999 et 198 000 personnes en 2006. L'augmentation des surfaces bâties semble donc correspondre non pas à une importante croissance démographique, mais davantage à l'essor de l'habitat individuel de type lotissements et pavillons. Le bâti s'est disséminé surtout à la périphérie de la commune du Mans, tant sur le flanc Ouest (où l'étalement urbain s'est traduit par l'augmentation de la surface bâtie dans les communes de Rouillon, Allonnes, La Chapelle Saint-Aubin) que sur le flanc Est (où la surface bâtie s'est accrue dans les communes de Changé, Ruaudin et Mulsanne). La rocade routière, et notamment la section Est construite au début des années 2000, a accompagné cet étalement urbain en facilitant les déplacements dans l'agglomération urbaine et en particulier entre la commune du Mans et les communes périphériques.

Un seuillage radiométrique a été appliqué à la bande spectrale du proche infrarouge (bande 3) des deux extraits d'images représentant l'agglomération urbaine. Cette méthode a permis d'extraire le bâti et d'élaborer une image binaire qui permet de comparer les surfaces bâties dans l'agglomération en 1993 et en 2006 (fig. 2). Les résultats font état d'une surface urbaine

(ou tache urbaine) de 3 964 ha en 1993 et 5 849 ha en 2006, soit une augmentation de 1 885 ha entre les deux dates. Par rapport à la classification supervisée qui exploite l'ensemble des bandes spectrales des images, le seuillage sous-estime les surfaces urbaines en raison du fait qu'une seule bande spectrale est utilisée. Puisque cette sous-estimation s'applique aux deux images, acquises dans des conditions bioclimatiques similaires (en août), il n'est pas aberrant de comparer les statistiques dans une optique d'évaluation de l'évolution des surfaces urbaines. Cette comparaison indique une augmentation de 47% de la surface bâtie entre 1993 et 2006, soit un résultat quasiment égal à celui obtenu par les classifications supervisées (49%).

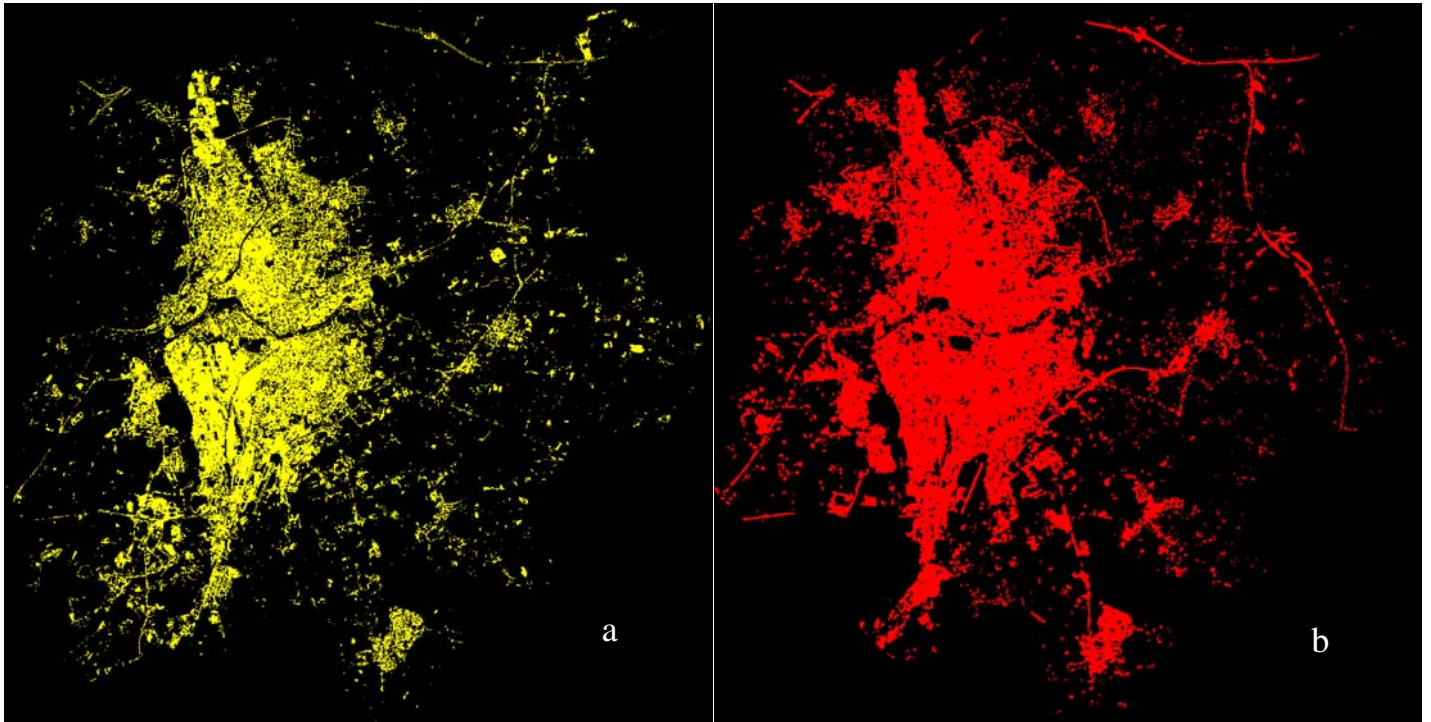


Figure 2. La tache urbaine de l'agglomération du Mans en 1993 (a) et en 2006 (b) extraite par seuillage et binarisation

La fusion des deux taches urbaines fournit une carte qui permet de localiser simultanément le bâti en 1993 et en 2006, ce qui facilite la comparaison visuelle et le repérage des endroits où il y a eu changement d'occupation du sol en termes d'urbanisation, synonyme d'augmentation du bâti et d'étalement urbain mis en évidence à l'aide de l'image de 2006 par comparaison rétrospective avec l'image de 1993. Cette fusion a été superposée au NDVI<sup>3</sup>. La carte obtenue (fig. 3) conforte l'interprétation des classifications supervisées, car elle montre aussi qu'en 2006, par rapport à 1993, le bâti s'est ajouté et s'est densifié à la périphérie de la ville du Mans. Cette carte révèle une déprise urbaine de la commune de Spay, seule commune à l'abri de l'étalement urbain qui se déroule dans l'ensemble de l'agglomération urbaine (fig. 3).

---

<sup>3</sup> Le NDVI (indice de végétation normalisé) est la différence de réflectance entre les bandes spectrales du proche infrarouge (bande 3) et du rouge (bande 2) ; plus la couleur tend vers le blanc, plus il y a présence de végétation et donc absence du bâti.

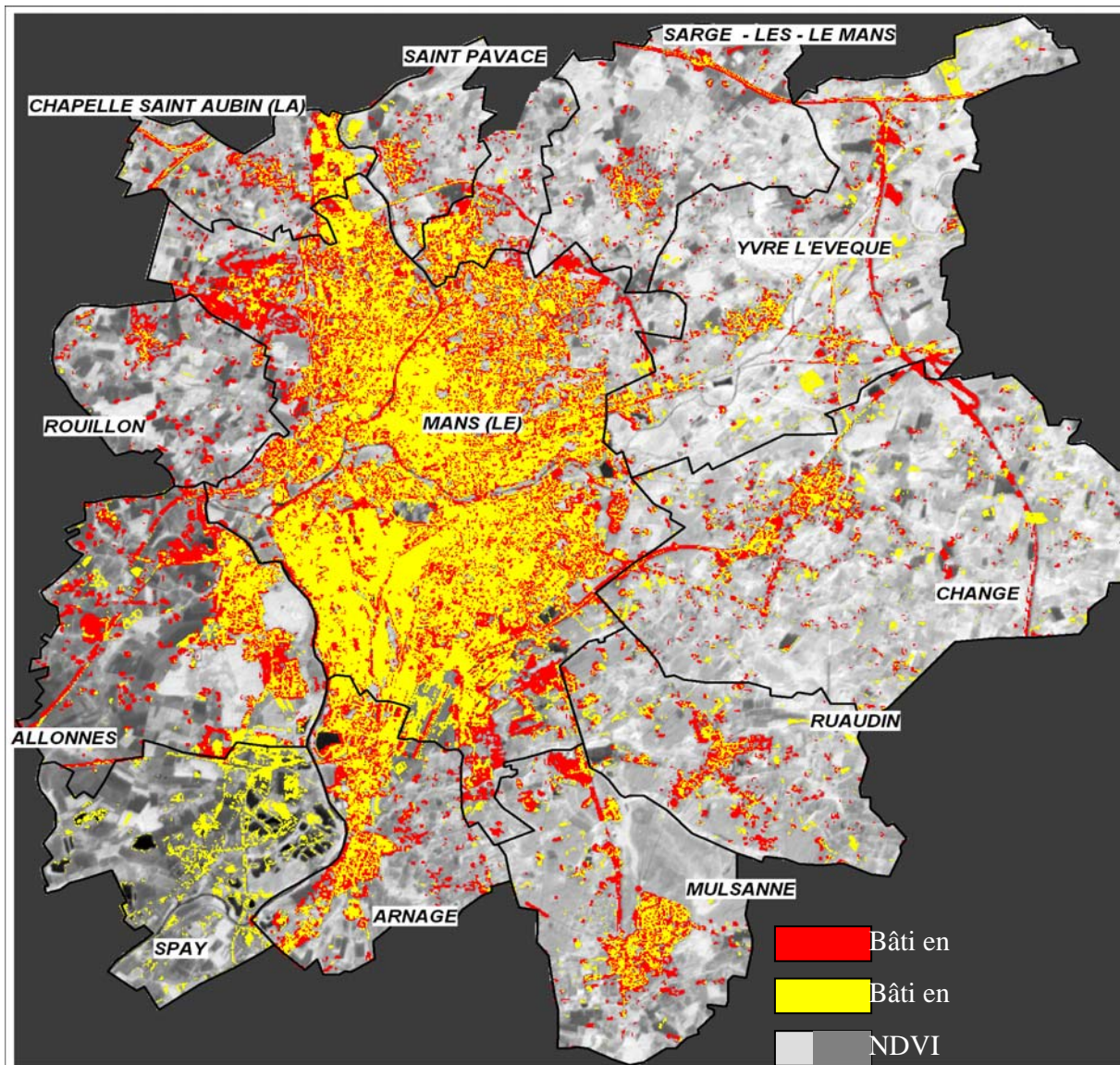


Figure 3. Extension du bâti dans l'agglomération du Mans entre 1993 et 2006

Les extraits d'images représentant la communauté urbaine en 1993 et en 2006 ont aussi fait l'objet de classifications supervisées pour cartographier et évaluer l'étalement urbain à ce niveau scalaire<sup>4</sup>. Les statistiques issues de ces classifications montrent que les surfaces bâties (grands bâtiments, bâti dense ou serré, bâti desserré) sont passées de 5 151 ha en 1993 à 6 319 ha en 2006, soit une augmentation de 1 168 ha (fig. 4). Cette augmentation des surfaces bâties concerne tous les types de bâti ; elle équivaut à un accroissement total de 22% en 13 ans. Comme à l'échelle de l'agglomération urbaine, l'augmentation des surfaces bâties à l'échelle de la communauté urbaine ne s'explique pas nécessairement par la croissance démographique, la population de la communauté urbaine étant passée de 186 000 personnes en 1990 à 188 000 personnes en 1999 et 185 000 personnes en 2006 (d'après les données de l'INSEE). Par rapport à l'agglomération urbaine, on constate que l'ampleur de l'étalement urbain diminue lorsqu'on observe ce phénomène à l'échelle de la communauté urbaine. Cette baisse

<sup>4</sup> La communauté urbaine du Mans (aussi désignée Le Mans Métropole) est constituée des communes de Le Mans, Arnage, Allonnes, Coulaines, La Chapelle Saint-Aubin, Mulsanne, Rouillon, Sargé-Lès-Le Mans, Yvré l'Évêque

s'explique par le fait que la communauté urbaine est moins étendue que l'agglomération. Constituée de communes très urbanisées autour de la ville du Mans, la communauté urbaine ne dispose pas d'une réserve d'espaces à bâtir aussi importante que celle que dispose l'agglomération urbaine. Cette tendance à la baisse de l'ampleur de l'étalement urbain s'observe aussi logiquement lorsqu'on passe de l'échelle de la communauté urbaine à l'échelle de la ville du Mans intra muros (tabl. 1).

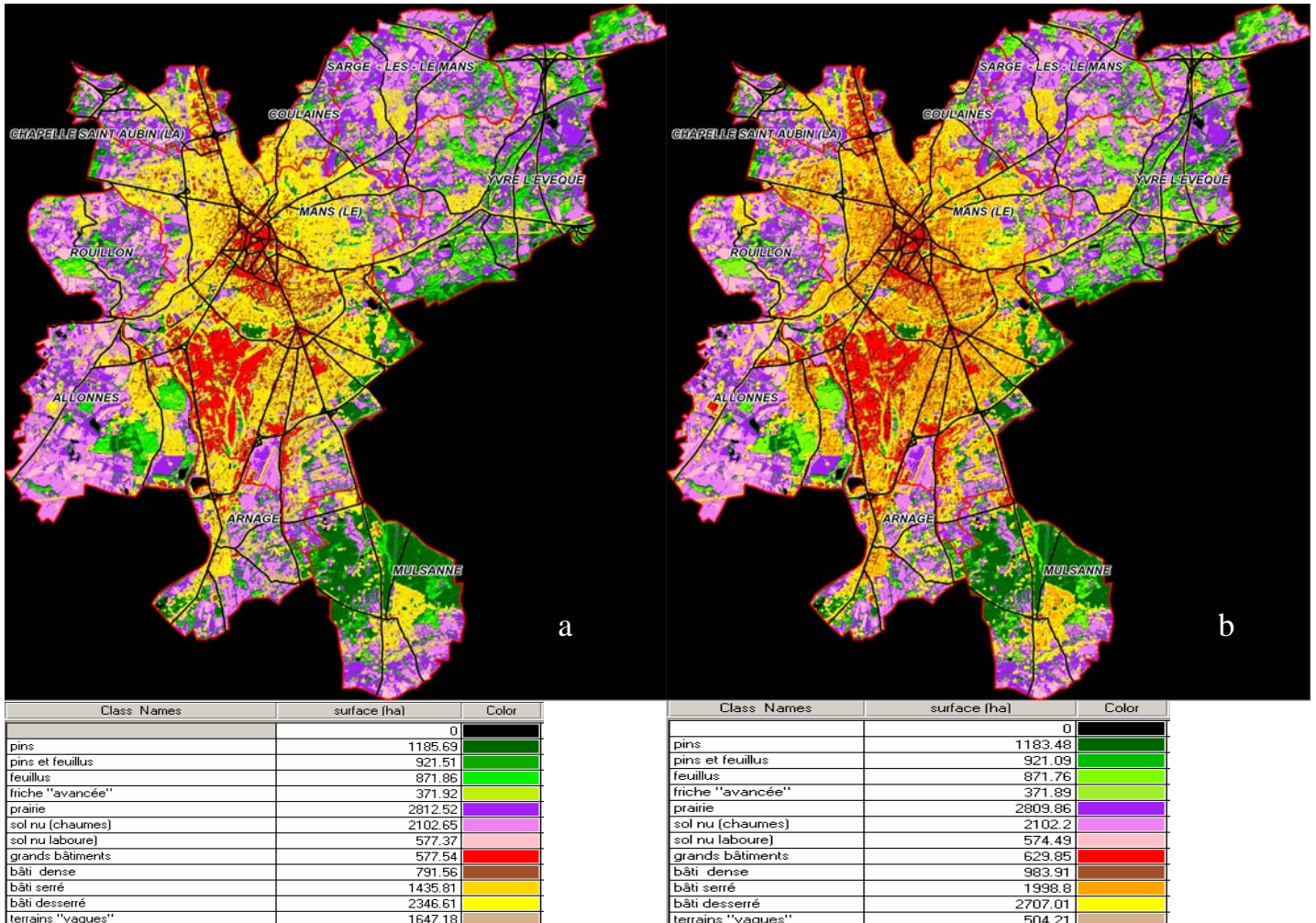


Figure 4. L'étalement urbain dans la communauté urbaine du Mans en 1993 (a) et en 2006 (b)

Les classifications supervisées des extraits d'images représentant uniquement la ville du Mans (fig. 5) indiquent que la surface bâtie est passée de 3 840 ha en 1993 à 4 073 ha en 2006, soit une augmentation de 233 ha, ce qui correspond à un accroissement total de 6% (tabl. 1). L'augmentation des surfaces bâties concerne surtout les grands bâtiments et le bâti dense. Cette augmentation s'est déroulée essentiellement au Sud de la ville (autour du circuit Bugatti) et au Nord-Ouest (Université, Ribay). Même si elle s'explique par l'augmentation des logements, elle ne traduit pas une augmentation de la population du Mans. D'après les données de l'INSEE, le nombre de logements dans la ville du Mans a augmenté de 5% (+3 629 logements) entre 1999 et 2006, alors que la population de la ville est passée de 145 000 personnes en 1990 à 146 000 en 1999 et 144 000 en 2006. L'étalement urbain au Mans se caractérise par la densification du bâti en centre ville et autour des zones industrielles. L'habitat individuel pavillonnaire, qui se répand dans les communes périphériques, stagne



relativement dans la ville, sans doute du fait de l'exiguïté des espaces à bâtir, la ville étant déjà presque entièrement bâtie.

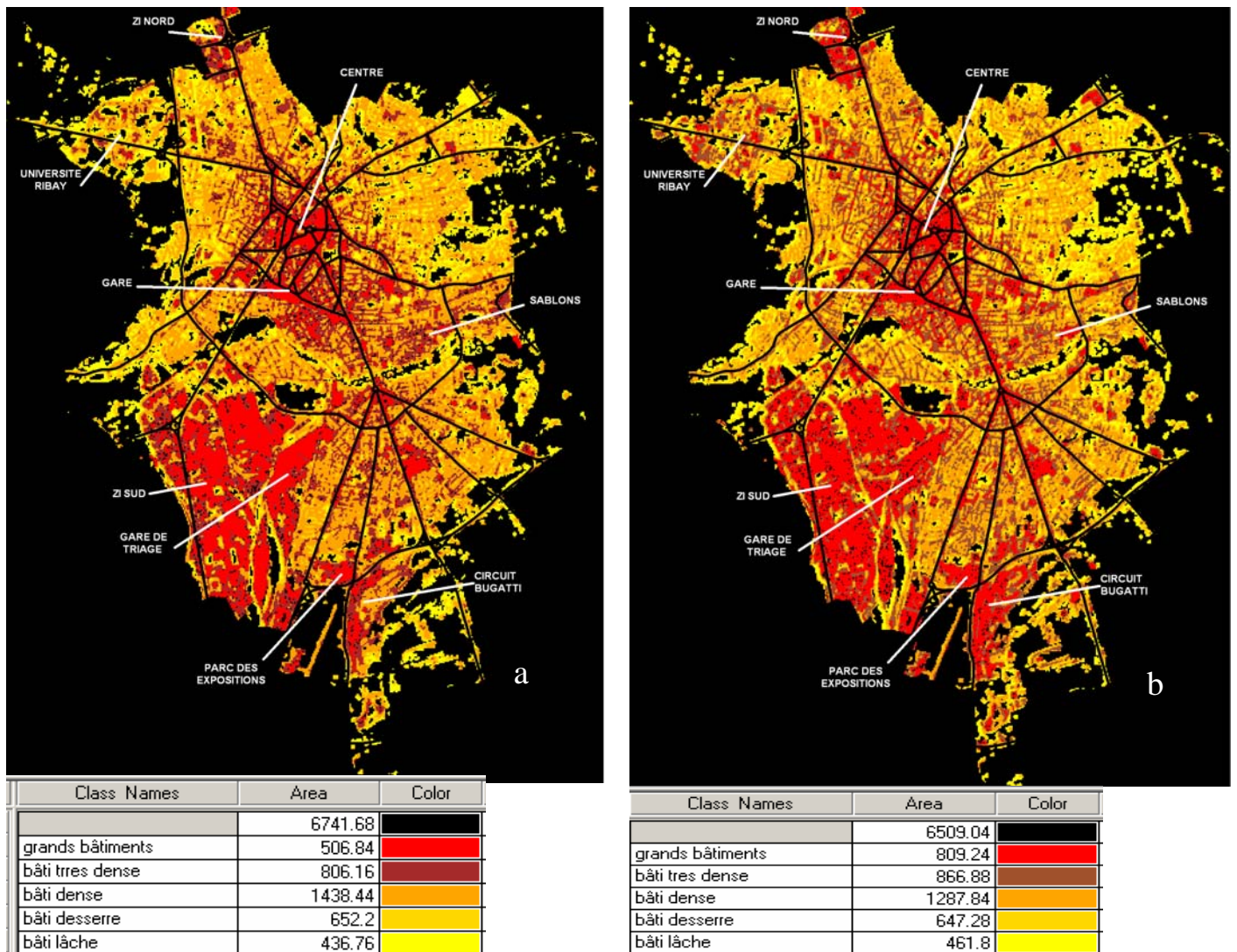


Figure 5. L'étalement urbain dans la ville du Mans en 1993 (a) et en 2006 (b)

	1993 (en ha)	2006 (en ha)	Variation absolue (en ha)	Variation relative ou taux d'accroissement (en %)
<b>Agglomération urbaine</b>	4919	7358	2439	49
<b>Communauté urbaine</b>	5151	6319	1168	22
<b>Ville intra muros</b>	3840	4073	233	6

Tableau 1. Evaluation multi-échelle des surfaces bâties entre 1993 et 2006 (d'après les classifications supervisées effectuées sur les images Spot XS)

## Conclusion

L'exemple traité dans cette contribution montre que la classification supervisée d'images satellites permet de cartographier et de mettre en évidence l'étalement urbain, tant en ce qui concerne l'étendue et la configuration spatiale de la ville à un moment, que l'évolution de cette étendue et de cette configuration spatiale durant un laps de temps. La télédétection à haute résolution spatiale (ici les images Spot) apparaît ainsi comme un outil qui aide à élaborer des documents nécessaires aux investigations en géographie urbaine. Les cartes produites à l'issue des classifications vont orienter les enquêtes de terrain destinées à mieux analyser l'étalement urbain aussi bien au niveau de l'agglomération urbaine qu'aux niveaux de la communauté urbaine et de la ville intra muros. Ces enquêtes permettront de comprendre les mécanismes et les processus de l'étalement urbain : transformation ou conversion des espaces non bâtis en espaces bâtis, densification et/ou extension urbaine, facteurs explicatifs, etc. Dans la suite de ce travail, la dimension prospective sera traitée à travers l'identification des endroits propices à l'étalement urbain et aux aménagements futurs en vue d'aider à canaliser le développement urbain dans l'agglomération et dans la communauté urbaines. Une étude similaire à celle présentée dans cette note a été entreprise pour Nantes, dans une optique de comparaison avec Le Mans, dans le contexte régional de l'Ouest de la France. Les résultats des deux études de cas alimenteront une base de données sur l'environnement urbain et seront utilisés pour la modélisation et le suivi des dynamiques environnementales urbaines du Mans et de Nantes.

## Références bibliographiques

- Ackermann G., Mering C., Quensiere J., 2003. Analysis of built-up areas extension on the Petite Côte region (Senegal) by remote sensing. *Cybergéo, Revue Européenne de Géographie*, n° 249, 15 p..
- Ackermann G., Tournaire O., Mering C., 2004. Etude de l'extension du bâti sur le littoral sénégalais à partir des paramètres texturaux de Haralick. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 173/174, p.104-112.
- Assako Assako R.J., 2000. Méthode navette image-terrain pour la réalisation des cartes d'occupation du sol en milieu urbain africain : le cas de Yaoundé (cameroun). *TELEDETECTION*, vol. 1, p. 285-303.
- Bianchin A., Bravin L., 2004. Reproductibilité des procédures d'extraction de l'espace urbain. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 173/174, p.93-103.
- Chi X., Maosong L., Cheng Z., Shuqing A., Wen Y., Jing M.C., 2007. The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China. *Landscape Ecology*, n° 22, p.925-937.
- Chopin F., Mering C., 2004. Cartographie de la densité du bâti par analyse granulométrique des images de télédétection. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 173/174, p.113-122.
- Corbane C., Faure J.-F., Baghdadi N., Villeneuve N., Petit M., 2008. Rapid Urban Mapping Using SAR/Optical Imagery Synergy. *SENSORS*, n° 8, p. 7125-7143.
- Deng J.-S., Wank K., Li J., Deng Y.-H., 2009. Urban Land Use Change Detection Using Multisensor Satellite Images. *PEDOSPHERE*, n° 19 (1), p. 96-103.
- Ding H., Wang R.C., Wu J.-P., Zhou B., Shi Z., Ding L.-X., 2007. Quantifying Land Use Change in Zhejiang Coastal Region, China Using Multi-Temporal Landsat TM/ETM+ Images. *PEDOSPHERE*, n°17(6), p. 712-720.

- 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*, n° 63, p. 399-408.
- Faure J-F., Tran A., Gardel A., Polidori L., 2004. Elaboration d'un indice de densité de population et analyse de sa distribution spatiale à Belem (Bresil) et Cayenne (Guyane Française). *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 173/174, p.135-144.
- Gar-On Yeh A., Li X., 2001. Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 67, n°1, p.83-90.
- Hu Z., Lo C.P., 2007. Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, n° 31, p. 667-688.
- Jacquin A., Misakova L., Gay M., 2008. A hybrid object-based classification approach for mapping urban sprawl in periurban environment. *Landscape and Urban Planning*, n° 84, p. 152-165.
- Lacroix V., Idrissa M., Hincq A., 2005. Spot 5 pour la détection d'urbanisation. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 178, p.3-11.
- 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*, vol. 21, n° 18, p. 3473-3486.
- Park M.H., Stenstrom M.K., 2008. Classifying environmentally significant urban land uses with satellite imagery. *Journal of Environmental Management*, n°86, p.181-192.
- Puissant A., Weber C., 2004. Démarche orientée "objets-attributs" et classification d'images THRS. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 173/174, p.123-134.
- Sietchiping R., 2003. Evolution de l'espace urbain de Yaoundé, au Cameroun, entre 1973 et 1988 par télédétection. *TELEDETECTION*, vol. 3, n° 2-3-4, p. 229-236.
- Skupinski G., Binh Tran D., Weber C., 2009. Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain – Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France). *Cybergéo, Revue Européenne de Géographie*, n° 439, 22 p.
- Wentz E.A., Nelson D., Rahman A., Stefanov W.L., Sen Roy S., 2008. Expert system classification of urban land use/cover for Delhi, India. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n°15-16, p. 4405-4427.
- Xian G., Crane M., McMahon C., 2008. Quantifying multi-temporal urban development characteristics in Las Vegas from Landsat and ASTER data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 74, n°4, p.473-481.
- Xu H., 2007. Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic-oriented index combination technique. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 73, n°12, p.1381-1391.

**Remerciements.** Ce travail a été effectué dans le cadre du projet Télédétection Urbaine Environnementale (TUE) soutenu par le Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS) dans le cadre de l'Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville (IRSTV, FRE CNRS 2488). Nous remercions le CNES qui nous a fait bénéficier du tarif ISIS pour acquérir les images Spot XS utilisées