Télédétection, 2005, Vol. 5, n°(1-2-3), p 19-32

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions Scientifiques GB*

DYNAMIQUE URBAINE À L'AIDE D'IMAGES RSO DE ERS ET HRV DE SPOT, ET SON IMPACT DANS LES FACTEURS D'AGGRAVATION DES RISQUES D'INONDATION EN MILIEU URBAIN : CAS DE LA VILLE DE DOUALA (CAMEROUN)

VINCENT DE PAUL ONANA[a,1], JEAN-PAUL RUDANT[b,2], JOHACHIM ETOUNA[a,3] et SOULEYE WADE[c,4]

[a] *Équipe Imagerie Spatiale, Information Géographique et Environnementale, Institut Universitaire de Technologie de l'Université de Douala, B.P. 8698, Douala, Cameroun*
Téléphone : (237) 340 24 82/340 62 79 ; télécopie : (237) 340 24 82

[b] *Laboratoire de Géomatériaux, Institut Francilien de Géosciences, Université de Marne-la-Vallée Cité Descartes, 5, boulevard Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée, cedex 2, France*
Téléphone : (331) 49 32 90 71/72 ; télécopie : (331) 49 32 91 37

[c] *Laboratoire de Télédétection Appliquée (LTA), Institut des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheik Anta DIOP de Dakar, B.P. 5396, Dakar, Sénégal*
Téléphone : (221) 825 25 30 ; télécopie : (221) 824 63 18

Courriel [1,2,3,4] *: onanav@yahoo.fr ; rudant@univ-mlv.fr ; jetouna@yahoo.fr ; wade@ird.sn*

(soumis : 24 février 2004 ; révisé : 25 mai 2004 ; accepté 16 août 2004)

Une approche d'étude de la dynamique urbaine et son impact sur les facteurs d'aggravation des risques d'inondation en milieu urbain, à l'aide des données de télédétection spatiale, est développée. Après la mise en évidence de la dynamique urbaine par fusion d'informations de quantification de la croissance urbaine, et celle des facteurs d'aggravation des risques d'inondation, une confrontation des résultats permet d'apprécier l'impact de cette dynamique sur ces facteurs. La dynamique urbaine est obtenue à l'aide d'une méthode de fusion d'attributs de changements (rapport pixel à pixel et corrélation) entre deux images RSO de ERS (1994 et 1999), basée sur la théorie des sous-ensembles flous. Une image optique multibandes HRV de SPOT-4 est utilisée comme information *a priori* (indice de discrimination ville / non-ville) pour une meilleure interprétation locale des images RSO. La dynamique urbaine est ainsi présentée à deux niveaux d'interprétation : très petits îlots (environ 40 m × 40 m) et îlots (environ 140 m × 140 m) de bâtis. Les facteurs d'aggravation des risques d'inondation proviennent d'une analyse des indices de végétation normalisé (NDVI) de deux images optiques multibandes HRV de SPOT-4 (1995 et 2001). L'approche est illustrée en s'appuyant sur les données de télédétection spatiale de la ville de Douala. Les résultats obtenus sont comparés aux zones inondées précédemment (1998 et 2000) et permettent de les justifier.

Mots-clefs : Dynamique urbaine ; risques d'inondation imagerie satellitaire ; fusion d'informations.

URBAN EXPANSION WITH THE HELP OF ERS SAR AND SPOT HRV IMAGES, AND ITS IMPACT IN WORSENING FACTORS OF FLOOD HAZARDS IN URBAN CONTEXT : CASE OF THE CITY OF DOUALA (CAMEROON)

An approach for the study of the urban expansion and its impact on worsening factors of flood hazards in urban context using remote sensing data is developed. After highlighting the urban expansion phenomenon by fusion of urban growth quantification attributes (pixel by pixel ratio and correlation), and worsening factors of flood hazards, a confrontation of resulting spatial information allows to appraise the impact of this urban expansion in these factors. The urban dynamics is obtained with the help of a fusion method of change attributes between two ERS-SAR images (1994 and 1999), based on the fuzzy subsets theory. An optical multispectral SPOT-4 HRV image is used in the method as prior information (urban / non-urban index) for a better local interpretation of SAR images. The urban dynamics is presented at two levels of interpretation : small blocks (around 40 m × 40 m) and blocks (around 140 m × 140 m) of habitations. Worsening factors of flood hazards are coming from the NDVI's analysis of two optical multispectral SPOT-4 HRV images (1995 and 2001). The approach is illustrated using remote sensing data of Douala city. The results are compared with the previous flood areas and allow to justify them.

Keywords : Urban expansion ; flood hazards ; remote sensing imagery ; information fusion.

1. INTRODUCTION

Dans cette introduction, on présente chronologiquement : les causes et effets de la dynamique urbaine dans les villes du Sud, les types de dynamique de l'occupation du sol en analyse de données spatiales, l'intérêt d'étudier particulièrement la dynamique urbaine à Douala, les données spatiales utilisées en analyse de changements, en particulier pour étudier la dynamique urbaine, les différentes approches proposées dans la littérature en matière de détection de changements, l'impact de la dynamique urbaine sur les facteurs d'aggravation des risques d'inondation dans le cas de la ville de Douala et l'approche méthodologique développée dans cet article.

1.1. Causes et effets de la dynamique urbaine dans les villes du Sud

Dans de nombreuses villes, on assiste à une croissance rapide de l'espace urbain qui est liée à la mobilité massive des populations due à la liberté d'exercer des activités commerciales de l'économie informelle. Cela conduit à des structures urbaines complexes (Haff, 2002).

L'urbanisation exerce une double pression sur l'environnement, à la fois sur les zones naturelles de la ville (espaces verts, parcs, ravins, réseaux de drainage naturel, *etc.*) et dans sa périphérie. La croissance urbaine devient alors un problème crucial dans la maîtrise de la gestion et de l'aménagement des villes qui évoluent à une vitesse annuelle exponentielle.

Une urbanisation non contrôlée entraîne une colonisation anarchique de l'espace. Une telle occupation du milieu conduit à l'exposition de certaines populations à des risques divers, d'origine naturelle ou industrielle (inondations, mouvements de masse, pollution chimique, *etc.*).

1.2. Types de dynamique en analyse de données spatiales

Les changements peuvent être appréciés à plusieurs plans lorsque l'on utilise des données spatiales, soit les :

– plan ponctuel, où on peut observer les changements de luminance ou de radiométrie de l'occupation du sol (Onana *et al.*, 2003) ;

– plan spatial, où on peut analyser les changements des états de surface (Bujor *et al.*, 2001) ;

– plan topographique, où on peut étudier les changements de relief : cas d'une étude post sismique par exemple (Takeuchi and Oguro, 2003).

1.3. Étude de la dynamique urbaine à Douala

L'étude de la dynamique urbaine trouve son importance dans la planification du développement des zones peuplées. Faisant partie de cet effort, certaines municipalités et organismes se sont engagés à contrôler la croissance urbaine, en suivant la dynamique urbaine, pour des nécessités diverses (cadastre numérique, plan d'aménagement, *etc.*). Très récemment, les autorités camerounaises ont décidé de mettre sur pied un dispositif de gestion des risques nommé : Observatoire national des risques.

Les principales villes du littoral camerounais subissent des transformations importantes du fait de leur extension très rapide. Par exemple Douala avait 187 000 habitants en 1966, environ 1,9 million d'habitants en 1987 et plus de 2,5 millions d'habitants en 2000 (Timnou, 1993). L'accroissement annuel de la population (8 % actuellement) et la pression qui en résulte sur le milieu et l'environnement urbains concernent l'ensemble de la bande littorale qui compte aujourd'hui environ un quart de la population du pays pour une superficie du dixième seulement. Dans cette situation, il est important de disposer d'un observatoire ainsi que d'instruments de suivi et d'évaluation de la région entière, afin d'être capable d'en structurer et d'en planifier le développement. L'intérêt du site de Douala est que la région a une couverture cartographique médiocre de l'environnement urbain, une forte croissance urbaine et que la ville est soumise à des inondations récurrentes.

1.4. Données utilisées

Les cartes anciennes, les photographies aériennes ou les données de télédétection spatiale sont largement utilisées pour suivre les changements des paysages à différentes échelles. Des combinaisons de ces données peuvent fournir d'importantes informations au regard des changements spatiaux en zones urbaines, afin d'enrichir les sources de données. Les archives des colloques RSUA (Remote Sensing for Urban Areas, 2003) et IGARSS (International Geoscience And Remote Sensing Symposium, 2002) fournissent une importante bibliographie sur les données utilisées pour appréhender les changements des paysages et de l'espace urbain en particulier (Favreto *et al.*, 2002 ; Akbari *et al.*, 2003 ; Esbah, 2003 ; Esbah, 2001 ; Lopez *et al.*, 2001). Ces dernières années, l'importance des technologies d'acquisition des données spatiales, en particulier les applications des données de télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) ont connu une forte progression. L'intégration de ces données dans des modèles peut aider à la formulation des politiques et pour l'élaboration des programmes d'aide à la décision. Par ailleurs, une analyse des ressources naturelles et des changements environnementaux au cours du temps est essentielle pour une compréhension de la recrudescence des problèmes environnementaux contemporains.

Toutefois, un certain nombre de problèmes persistent encore dans l'exploitation des données de télédétection pour apprécier les changements en milieu urbain. La télédétection fournit une vue synoptique de la structure urbaine et peut être utilisée pour le suivi des changements dans ces structures urbaines. Cependant, les mesures physiques, environnementales et socio-économiques des variables du milieu urbain étaient limitées dans le passé, à cause des résolutions trop grossières des capteurs de Landsat-4 et 5 et SPOT-3 (respectivement 30 à 20 m) pour identifier les structures urbaines individuelles. En dépit de ces limitations, les données satellitaires de résolution moyenne (20 m) peuvent donner des résultats satisfaisants.

Pour ce qui est de l'utilisation des images radar, l'interprétation des images RSO à haute résolution des zones urbaines peut être largement exploitée pour extraire des informations, par exemple concernant le développement urbain ou les activités anthropiques, l'analyse des types d'occupation des terres, etc. (Henderson and Xia, 1997 ; Xia and Henderson, 1997 ; Bujor *et al.*, 2001; Onana *et al.*, 2003).

1.5. Différentes approches

Plusieurs techniques pour la détection de changements ont été développées en analyse d'images et sont utilisées dans de nombreuses applications. Elles dépendent des valeurs de niveaux de gris ou des textures locales. L'étalon-nage des données est nécessaire pour améliorer la précision. Il permet de s'assurer que les différences observées sont essentiellement dues aux change-ments intervenus dans la couverture du sol et qu'il n'y a pas de différences dues seulement à l'illumination, à l'étalonnage des capteurs ainsi qu'aux conditions d'humidité du sol ou atmosphé-riques.

D'après Singh (1989), la détection de changements se base essentiellement sur deux types d'approche :

– une analyse comparative des classifications produites de manière indépendante sur chacune des images à différentes dates (c'est-à-dire une comparaison post-classification) ;

– une analyse simultanée des données multidates (c'est-à-dire une comparaison image à image 'pixel à pixel' ou une comparaison pré-classification).

Les techniques de post-classification sont les plus largement utilisées. Pourtant, un des inconvénients d'une comparaison post-classification est le fait que les changements sont souvent dépendants des résultats des différentes classifications. Par conséquent, ce groupe de méthodes est lié au schéma de classification utilisé (Esbah, 2001; Lopez *et al.*, 2001).

Au lieu de classifier deux ou plusieurs images et ensuite de comparer les résultats, les techniques de pré-classification travaillent simultanément sur des images à des dates différentes. La pré-classification donne à l'interprétation un résultat délicat, puisque les données originales sont combinées et, par conséquent, l'interprétation devient également plus complexe (Bujor *et al.*, 2001 ; Onana *et al.*, 2003). Souvent, les outils d'interprétation (telles que les cartes) ne sont pas disponibles, en particulier les anciennes éditions.

En ce qui concerne les techniques de détection des changements proprement dites, s'appuyant sur l'une ou l'autre approche susmentionnée, plusieurs exemples de détection des changements en régions rurales et en régions naturelles, comme la forêt, ont été étudiés. Les études concernant les changements en milieu urbain prennent de l'importance dans la communauté des chercheurs depuis quelque temps. Par exemple, seulement dans les archives des colloques RSUA 2003 et IGARSS 2002, on peut trouver de nombreux articles sur le sujet (Seto and Duong, 2002 ; Saradjian and YaAllah, 2002 ; Chou *et al.*, 2002 ; Netzband, 2002 ; Kressler *et al.*, 2002 ; Zipperer *et al.*, 2000).

Plusieurs exemples existent aussi sur la détection des changements à grande échelle (Green *et al.*, 1994 ; Hayes and Sader, 2001), mais peu de travaux ont été réalisés en utilisant les techniques de traitement numérique pour l'évaluation des changements sur des données à haute résolution, telles les photographies aériennes. Pour ce type de données, les processus d'évaluation sont caractérisés par des informations très détaillées qui, dans la plupart des applications, doivent être agrégées à certains niveaux d'interprétation. Par conséquent, la détection des changements sur les images à haute résolution doit être principalement faite par une interprétation et une comparaison avec des cartes d'occupation du sol ayant des échelles inférieures au 1 : 20 000.

En dépit du niveau d'attention qui est ainsi consacré à la détection des changements, il reste des interrogations sur la fiabilité des différentes techniques. En effet, comme l'évaluation de la précision n'est pas toujours réalisée, il est souvent difficile de faire des comparaisons.

Néanmoins, (Gamanya *et al.*, 2003) ont comparé quatre techni-ques sur des données TM de Landsat (07-1989) et ETM+ de Landsat (08-2002) : deux méthodes de différence des indices de végétation normalisés (NDVI : *normalized difference vegetation index*), une différence normalisée entre images ainsi que l'analyse en composantes principales. L'évaluation de la précision est basée sur des données de réalité de terrain de certaines zones où l'orientation spatiale et l'amplitude des changements ont été vérifiées. Un niveau élevé de précision, de l'ordre de 90,51 %, a été obtenu par la méthode de différence des NDVI. La méthode de

différence normalisée suit avec 74,42 % tandis que la méthode de classification en composantes princi-pales donne des résultats moins satisfaisants (< 40 %).

Le défi de la recherche actuelle dans ce domaine est peut-être une approche de détection de changements par objet (Lang *et al.*, 2003). Cela signifie que les changements sont extraits seulement dans des types de classes spécifiques (par exemple la croissance des zones d'habitat, la densification des zones ou alors leur fragmentation, *etc.*). En effet, pour explorer des changements dans une image entière, on est souvent plus intéressé aux changements des classes de structures spécifiques, par exemple la croissance des zones d'habitat ou la densification du réseau de voies de communication. Toutefois, si on utilise l'approche de détection des changements par pré-classification, comme la différence entre sous-images sur une image entière, il est difficile de mettre en évidence les changements dans des classes spécifiques.

Le calcul de la différence entre images (ou le gradient de la détection de changements par exemple) a souvent été utilisé pour les changements dans la couverture de végétation (par conséquent c'est une approche basée sur la comparaison des NDVI) pour des images optiques (Gamanya *et al.*, 2003).

1.6. Impact de la dynamique urbaine sur les facteurs d'aggravation des risques d'inondations : cas de la ville de Douala

Pour ce qui est de la ville de Douala, les facteurs favorables à l'expansion des crues sont, entre autres :

– un relief quasi-plat : sur les deux images RSO (figure 1a et figure 1b) on n'aperçoit pas d'ombres portées, ni de lignes de force du relief, ce qui permet d'interpréter une quasi-platitude du relief dans la zone urbaine ;

– la présence de nombreux réseaux de drainage naturel, de ravins, de zones de bas-fonds et de plans d'eau en milieu urbain ; cela se manifeste par de petites forêts-galeries dans l'image optique multibande HRV de SPOT-4 (figure 2a), notamment à droite de l'image;

– le comportement subaffleurant de la nappe phréatique, se traduisant par une saturation rapide du sol en eau après une précipitation.

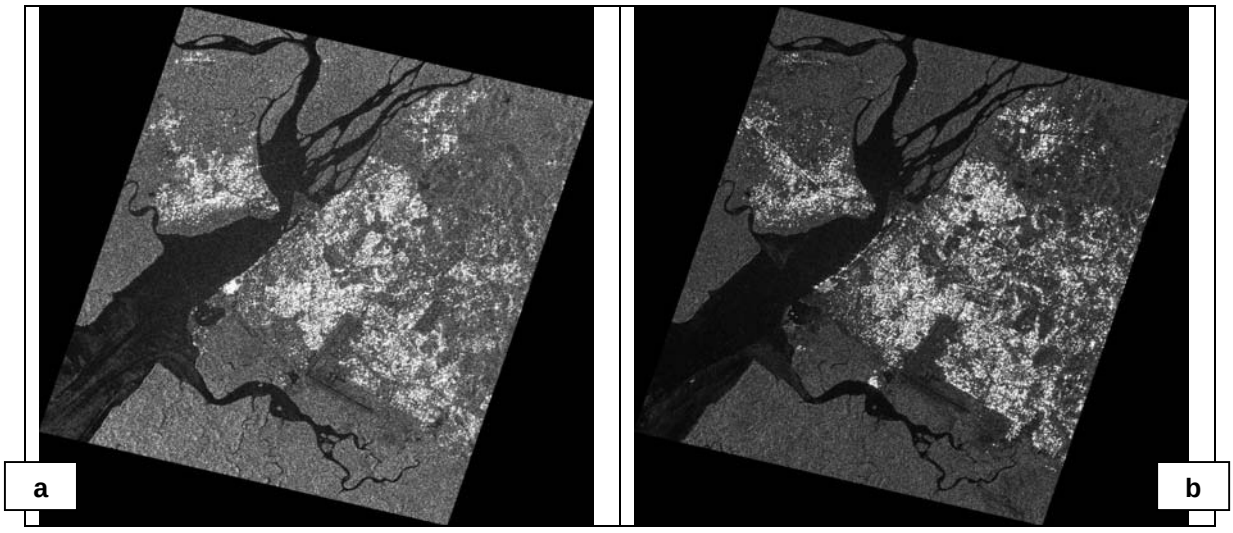
Dans cette ville, la croissance urbaine entraîne :

– une urbanisation de la plaine inondable ou des abords des cours et des plans d'eau ;

– une forte densité d'urbanisation qui génère une couverture minérale (toitures en tôle ou aluminium) importante de l'espace urbain ; cela se manifeste par des pixels très brillants dans les images RSO (figures 1a et 1b) ;

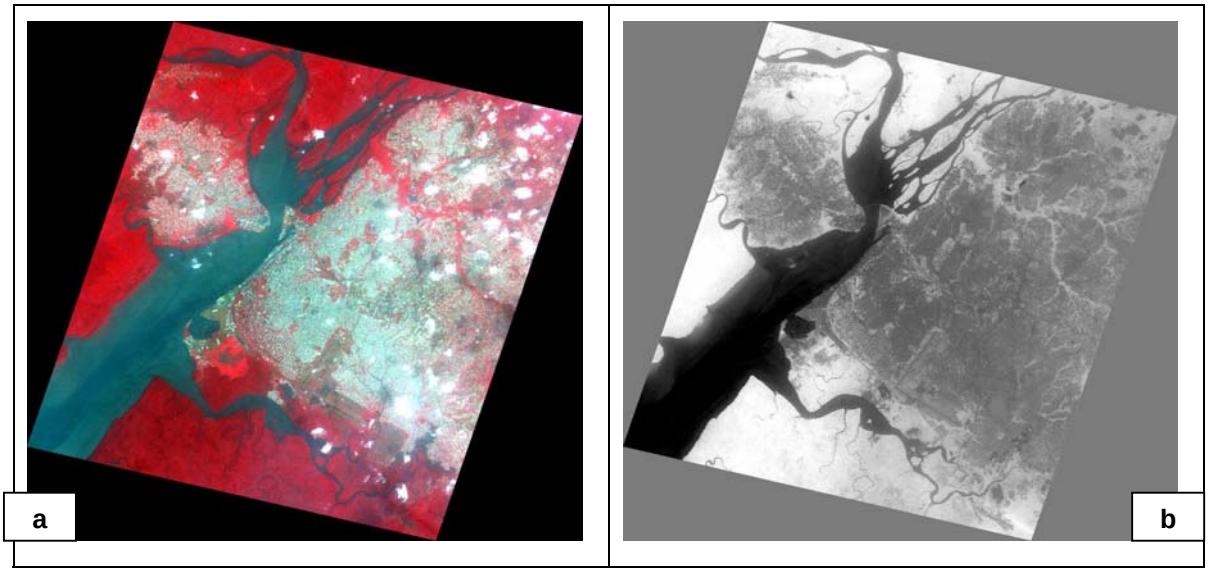
– une forte dynamique urbaine traduite par la densification ou l'agrandissement du périmètre urbain.

Ces faits permettent de conclure que, pour la ville de Douala, la croissance urbaine a aussi un impact important sur les facteurs d'aggravation des risques d'inondation.



(échelle approx. 1 : 200 000)

FIGURE 1 Images originales RSO de ERS : a) 1994; b) 1999. *Original ERS SAR images : a) 1994; b) 1999.*



(échelle approx. 1 : 200 000)

FIGURE 2 Image optique originale de HRV de SPOT-4 de 2001: a) multibandes (XS2 et XS3) ; b) l'attribut résultant du NDVI (*Normalized difference vegetation index*). *Original optic image of SPOT-4 HRV 2001 : a) Multispectral (XS2 and XS3) ; b) NDVI attribute.*

1.7. Approche pour une mise en évidence de la dynamique urbaine et son impact

La détection des changements en milieu urbain est cruciale pour prédire la croissance d'une ville et préserver les paysages avant que le développement ne prenne le dessus. Plusieurs facteurs favorisent la croissance urbaine et il n'existe pas de méthode concrète permettant de mesurer avec précision le développement urbain. Toutefois, la télédétection et les SIG sont des outils qui aident à comprendre l'évolution spatiale des derniers développements de l'environnement et à mesurer les conséquences, en augmentant la capacité d'appréciation, pour anticiper le style de développement approprié dans le futur.

Afin d'aider les planificateurs urbains dans leur stratégie et leur gestion de l'espace urbain, un besoin important de développement d'outils précis et à différentes échelles de traitement de l'information spatiale apparaît. Cela permet ainsi la compréhension des changements des types d'occupation des terres en milieu urbain et des causes liées à ces changements.

La présente approche traite de la dynamique urbaine de la ville de Douala et utilise les données de télédétection multidates. Le but de l'étude est de détecter l'amplitude spatiale des changements et les caractéristiques de cette dynamique. Par la suite, les effets des transformations sous-jacentes, c'est-à-dire l'impact de cette dynamique sur les facteurs d'aggravation des risques d'inondation en milieu urbain sont appréciés.

Notre contribution part du site d'étude, qui est une ville située en zone tropicale humide, ce qui conduit à exploiter les données de télédétection RSO compte tenu de la présence presque permanente d'un couvert nuageux. L'approche de fusion d'informations développée ici est une approche qui traite les images simultanément et qui utilise une technique qui imite ce que fait le photo-interprète lors de l'analyse d'images. Enfin, le rapprochement entre la dynamique urbaine et les facteurs d'aggravation des risques d'inondation est original en matière d'application des données de télédétection spatiale. Tous ces aspects, que ce soit les types de données utilisées, l'approche développée, la technique utilisée et le rapprochement d'application, ont été jusque-là très peu explorés dans la littérature.

2. SITE D'ÉTUDE

Douala est une ville portuaire située dans le golfe de Guinée, ayant un relief presque plat (figure 3). On peut relever une absence d'activité anthropique de type cultures agricoles dans le milieu urbain, ce qui permet de s'assurer que les changements sont essentiellement dus à l'urbanisation. Comme la plupart des villes du Sud, Douala connaît une urbanisation accélérée. La zone urbaine étant pourvue d'espaces libres (réseaux de drainage naturel, ravins, zones de bas fond, *etc.*), le besoin de construire et d'autres demandes d'implantation spontanée d'habitations augmentent.

Le résultat naturel de cette transformation est l'invasion de ces espaces libres et ainsi l'augmentation de la densité humaine dans le milieu. Une autre dimension de cette transformation est que ces espaces ne sont souvent pas aménagés, ce qui expose les populations à des risques d'inondation.

Dans cet article, on présente d'abord la méthodologie développée avec les données utilisées et les pré-traitements réalisés, puis une technique de mise en évidence de la dynamique urbaine par fusion d'informations. Enfin, on traite de la mise en évidence des facteurs d'aggravation des risques d'inondation et de l'impact de la dynamique urbaine sur ces facteurs.



FIGURE 3 Carte de localisation de la zone d'étude : zone urbaine de la ville de Douala. *Localization map of studied area : city of Douala.*

3. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

La méthode est élaborée tant avec des images radar qu'optiques. La technique de mise en évidence de la croissance urbaine à l'aide des images RSO, est composée des deux étapes suivantes :

– le calcul des attributs de changements entre deux images RSO de dates différentes,

– la fusion des attributs précédemment calculés en s'appuyant sur la théorie des sous-ensembles flous (Zadeh, 1965).

Les images optiques, elles sont exploitées au moyen de l'indice de végétation normalisé (NDVI), utilisé comme indice de distinction ville/non-ville. Cet indice a une valeur élevée en zone de végétation et une valeur faible en zone de sans végétation, particulièrement en zone urbaine ayant une forte densité d'habitations. Il peut donc être utilisé comme un attribut d'interprétation de la zone urbaine.

Les attributs de changements issus des images RSO ont des valeurs élevées, moyennes ou alors faibles en fonction du degré de changements rencontré. Ce genre de comportement qualitatif des attributs de changements et d'interprétation est sémantiquement modélisé, codé et calculé avec des mots (Dubois *et al.*, 1999).

Deux classes d'attributs de changements sont exploitées en fonction de leur sensibilité ponctuelle ou spatiale :

– un attribut de changement basé sur le pixel : le rapport pixel à pixel (ARPP) entre deux images RSO, calculé sur une petite fenêtre de 3 × 3 pixels, est fusionné avec l'attribut NDVI ; ceci correspond à une estimation de la croissance urbaine à l'échelle des structures bâties sur de petits îlots (environ 40 m × 40 m) ;

– un attribut de changements basés sur la région (le voisinage d'un pixel) : un attribut de corrélation (AC) est calculé sur les voisinages de taille N × N et est fusionné avec l'attribut NDVI ; ceci conduit à une estimation de la croissance urbaine à l'échelle d'un îlot d'habitations.

Après avoir mis en évidence la dynamique urbaine, on superpose le résultat de cette dynamique avec une carte des facteurs d'aggravation des risques d'inondation. Enfin, une confrontation avec une carte des zones inondables, met en relief l'occupation humaine à risque potentiel d'inondation en milieu urbain et permet ainsi une validation qualitative du résultat prévu.

La méthode est appliquée sur des images RSO d'ERS (1994 et 1999) et HRV de SPOT-4 (2001) de la zone urbaine de la ville de Douala (tableau 1) avec, pour objectif, d'apprécier l'évolution urbaine entre 1994 et 1999 et, d'évaluer les risques encourus par les populations en période d'inondation. L'image optique HRV de 2001 est ici utilisée comme information a priori. Les images RSO ont une résolution spatiale de 12,5 m × 12,5 m et l'image optique HRV une résolution spatiale de 20 m. Toutes les images ont une taille de 1 006 colonnes × 943 lignes et ont été préalablement recalées et géoréférencées dans le système de projection cartographique UTM, WGS 84, zone Nord 32, à l'aide du logiciel commercial ENVI. Aussi, une carte des zones inondables précédentes a également été utilisée comme support de comparaison (Etouna, 2003).

TABLEAU 1 Caractéristiques des données utilisées. *Data used caractéristiques.*

Paramètres\Données	C.I.P.	Image 1	Image 2	Image 3	Image 4
Capteur, satellite		RSO de ERS-1	RSO de ERS-2	HRV de SPOT-4	HRV de SPOT-4
Date/année	2000	1994	1999	1995	2001
Résolution ou taille du pixel (m)	0,6	12,5	12,5	20	20
Mode		Ascendant	Ascendant	Descendant	Descendant

C.I.P. : Carte des inondations précédentes (Onana *et al.*)

4. MISE EN ÉVIDENCE DE LA DYNAMIQUE URBAINE PAR FUSION D'ATTRIBUTS

L'analyse des changements au moyen d'images de télédétection s'effectue en deux étapes (Leduc *et al.*, 1999) : la détection des changements et leur interprétation. L'analyse des changements conduit à utiliser au moins deux documents de dates différentes de la même zone, soit deux images d'un même capteur (par exemple : deux images RSO), deux images de capteurs différents (par exemple : une image RSO et une image optique) ou une image et une carte géographique ou une photographie aérienne.

En pratique, certaines difficultés sont spécifiques à l'analyse de changements au moyen d'images RSO : le chatoiement qui rend difficile et délicat la détection automatique de changements (White, 1991 ; Rignot and Van Zyl, 1993), l'étalonnage des données et le recalage (la superposition des images) des informations géographiques contenues dans les images (Oliver and Quegan, 2004). Par ailleurs, dans les zones urbaines, il est bien connu que la plupart des structures et des objets que l'on trouve dans les images proviennent du phénomène de réflexion des angles des entités bâties (Lee, 2001a ; Schiavon and Solimini, 2000). En effet, les pixels brillants provenant des réflecteurs des objets construits obscurcissent les structures naturelles voisines, conduisant à une perte d'informations significative. La grande dynamique des niveaux de réponses est la source de dégradation des caractéristiques des images RSO en milieu urbain. Toutefois, une méthode pour améliorer les performances de la détection des cibles brillantes a été proposée par Lee (2001b) ; cette méthode supprime les pixels très brillants dans les images RSO en zone urbaine en adaptant la dynamique radiométrique des pixels environnants.

En supposant que l'étalonnage et le recalage des données RSO sont satisfaisants, nous proposons une nouvelle approche d'estimation de la croissance urbaine par fusion des attributs de changements (Bujor *et al.*, 2001) provenant de deux images RSO, avec un indice de distinction ville/non-ville (appelé ici attribut d'interprétation) calculé à partir d'une image optique multibandes. Après observation d'un changement donné, pour avoir la certitude que ce dernier a bien lieu en milieu urbain, une information complémentaire est nécessaire. Ainsi, une image optique est utilisée dans cette approche comme information *a priori* pour améliorer l'interprétation locale de la zone urbaine, et ce afin détecter la répartition des changements et les caractéristiques de la dynamique sous-jacente.

La technique proposée s'effectue en deux étapes. Dans une première étape, les attributs de changements entre les deux images RSO, et l'indice de distinction ville/non-ville sont calculés. Deux classes d'attributs de changements sont ainsi calculées, en fonction de leur sensibilité radiométrique ou spatiale :

– un attribut de changements basé sur la radiométrie : le rapport pixel à pixel classique (ARPP) entre deux images RSO ;

– un attribut de changements basé sur le voisinage d'un pixel : la corrélation entre deux images RSO (AC).

La seconde étape met en œuvre une stratégie de fusion des attributs précédents au moyen de la théorie des sous-ensembles flous (Zadeh, 1965). Cette approche permet de coder et de calculer aisément avec des mots (Dubois *et al.*, 1999) la connaissance de l'expert. Une classification floue utilisant une base de connaissance (base de règles) de l'expert sur l'interprétation des données est finalement réalisée pour obtenir le degré d'appartenance dans deux classes de sortie du résultat recherché : « pas-de-croissance » et « croissance. »

4.1. Calcul des attributs de la dynamique urbaine

Dans cette étude, deux échelles de la dynamique urbaine sont observées :

– micro-échelle : échelle fine correspondant à la résolution originelle des images RSO (compatible avec l'échelle de petits îlots d'habitations) pour laquelle l'attribut du rapport pixel à pixel ARPP est combiné à celui du NDVI ;

– macro-échelle : échelle relativement grossière (compatible avec celle d'un îlot d'habitations) pour laquelle l'attribut de corrélation AC entre deux

images RSO est calculé relativement à un voisinage (sur N × N pixels) est combiné avec celui du NDVI.

4.1.1. Quantification de la croissance urbaine

Nous nous proposons de quantifier la croissance urbaine à deux échelles (micro et macro) à travers deux attributs. Soit σ_1 et σ_2, les intensités respectives de deux images RSO I1 et I2.

Pour la micro-échelle, l'attribut ARPP entre deux images RSO est calculé après un moyennage de chacune sur une fenêtre de 3 × 3 pixels afin d'atténuer l'effet du chatoiement. Puis, une normalisation est finalement effectuée (Touzi *et al.*, 1988) :

$$r = \min\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right) \in [0,1] \qquad (1)$$

où r est la mesure du gradient temporal entre les deux images I1 et I2.

Pour la macro-échelle, à l'instar de la corrélation calculée sur deux images RSO complexes, nous définissons l'attribut AC par :

$$AC = \frac{E[\sigma_1\sigma_2]}{\sqrt{E[\sigma_1^2]}\sqrt{E[\sigma_2^2]}} \qquad (2)$$

où E[X] désigne l'espérance mathématique de X. En pratique, la relation suivante est utilisée, dans l'optique d'estimer l'attribut AC :

$$\widehat{AC} = \frac{\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L} \sigma_{1i}\,\sigma_{2i}}{\sqrt{\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L} \sigma_{1i}^2}\cdot\sqrt{\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L} \sigma_{2i}^2}} \in [0,1] \quad (3)$$

où L désigne la taille de l'échantillon d'entrée utilisée pour estimer AC*.

4.1.2. Attribut de distinction ville/non-ville

Dans la méthode, une image optique multibande est utilisée comme information a priori, pour une interprétation localisée des images RSO en zone urbaine. Ainsi, l'indice de végétation normalisé (NDVI) est calculé à cet effet. L'attribut résultant est défini par :

$$NDVI = \frac{X_2 - X_3}{X_2 + X_3} \in [-1,1] \qquad (4)$$

où X_2 et X_3 représentent, respectivement, les bandes rouge et infrarouge du capteur HRV.

4.2. Stratégie de fusion des attributs

À la suite d'une analyse de l'histogramme de distribution des attributs, on peut grossièrement séparer les classes dominantes pour chacun d'entre eux, en fonction de leur dynamique. Par exemple, sur la figure 4a, on montre l'histogramme de la distribution de l'attribut AC, pour lequel les valeurs de AC supérieures à 0,8 peuvent être considérées comme étant corrélées et celles inférieures à 0,8 peu corrélées.

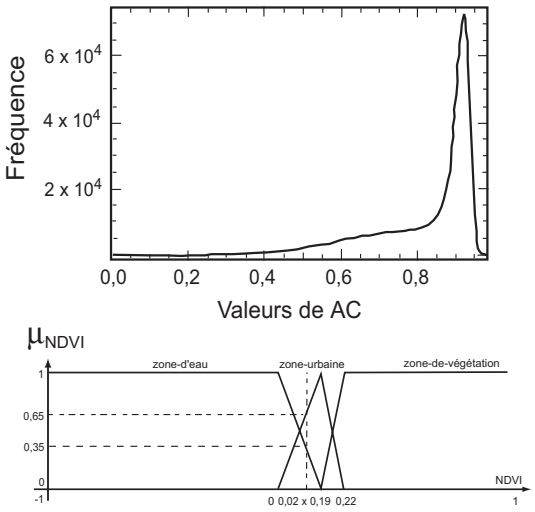


FIGURE 4 Histogramme et fonction d'appartenance : a) distribution de l'attribut AC (Attribut de corrélation); b) Fonction de degré d'appartenance pour l'attribut du NDVI. *Histogram and membership function : a) Correlation attribute distribution ; b) NDVI attribute membership degree function.*

Ainsi, chacun des attributs est décrit au moyen d'un ensemble de mots. Les termes linguistiques attribués aux différents attributs : ARPP, AC, NDVI et la sortie du résultat sont donnés par :

– L_{ARPP} = {hétérogène, homogène} (5)
– L_{AC} = {peu-corrélée, corrélée} (6)
– L_{NDVI} = {zone-d'eau, zone-urbaine, zone-de-végétation} (7)
– L_{SORTIE} = {pas-croissance, croissance} (8)

Pour chaque mot, la fonction de degré d'appartenance associée est définie en fonction des évaluations de l'interprète. Par construction, l'ensemble des fonctions de degré d'appartenance a une particularité. La somme de tous les degrés pour une entrée donnée est égale à l'unité. Par exemple, pour l'attribut du

$$NDVI : \Sigma_{\forall \ell \in L_{NDVI}} \mu_{NDVI}(x)(\ell) = 1 \quad (9).$$

Cela est dû au comportement implicite de l'interprète, qui procède intuitivement à une classification linguistique probabiliste. La description linguistique d'une valeur numérique d'un attribut est réalisée en déterminant la valeur d'appartenance pour le mot en fonction de sa fonction d'appartenance.

Par exemple, la valeur numérique x dans la figure 4b (pour les canaux utilisés X_2 et X_3 de HRV afin de calculer l'attribut du NDVI) est linguistiquement décrite par :

$$\text{NDVI}(x) = \frac{0{,}35}{\text{zone-d'eau}} + \frac{0{,}6\,5}{\text{zone-urbaine}} \qquad (10)$$

Une fois que les descriptions linguistiques floues des entrées sont établies (équations 5, 6, et 7), il est nécessaire de les combiner pour obtenir le degré d'appartenance de l'ensemble de sortie L_{SORTIE}. Ainsi, le raisonnement de l'interprète est codé dans une base de données comme un ensemble de règles de la forme : SI-ALORS. Par exemple, la règle Ri suivante permet de déterminer un pixel provenant de la croissance urbaine à une macro-échelle, c'est-à-dire à l'échelle d'un voisinage de pixels (équations 6,7et 8) : [Ri:] SI « l'attribut AC » EST « peu corrélé » ET SI « l'attribut NDVI » EST « zone urbaine » ALORS « pixel » APPARTIENT A « zone de croissance urbaine ».

L'inférence est réalisée en fonction des règles de composition (Zadeh, 1965), au moyen de l'équation :

$$\mu(S) = \perp_{\forall \ell_1, \ell_2 \in L_1, L_2} \mathrm{T}(\mathrm{T}(\mu_{A_i}(\ell_1), \mu_{A_j}(\ell_2)), \mu_{R_i}(\ell_1, \ell_2, S)) \qquad (11)$$

où ℓ_i est un mot de l'ensemble L_i, μ_{A_i} le degré d'appartenance de l'attribut A_i et S le degré d'appartenance d'un mot de la sortie, $\perp$ et T représentent la t-norme et la t-conorme respectivement.

5. IMPACT DE LA DYNAMIQUE URBAINE DANS LES FACTEURS D'AGGRAVATION DES RISQUES D'INONDATION

5.1. Facteurs d'aggravation des risques d'inondation

Dans cette section, l'objectif est de mettre en évidence les facteurs favorables aux risques d'inondation, à l'aide des images. Elle vise à appréhender les conditions physiques de la morphologie urbaine, en particulier la présence de cours d'eau, de plans d'eau et de réseaux de drainage naturel, en relevant ainsi des zones d'intérêt en matière de vulnérabilité urbaine concernant le risque d'inondation.

Le concept de risque est une notion complexe qui peut être modélisée au moyen de la combinaison de deux composantes distinctes, l'aléa et la vulnérabilité. Ce modèle convient à la plupart des risques naturels (UNDRO, 1991) d'où l'équation :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Vulnérabilité} \qquad (12)$$

L'aléa caractérise le phénomène physique (inondation, éruption volcanique, séisme, *etc.*), la vulnérabilité concerne les aspects socio-économiques de l'occupation des terres (habitations, infrastructures industrielles, voies de communication, *etc.*) éventuellement affectés par l'aléa, et * est l'opérateur de combinaison de ces composantes.

La vulnérabilité urbaine vis-à-vis des risques d'inondation est fonction du mode d'occupation des terres. Elle représente le degré pour lequel les systèmes socio-économiques et les biens matériels dans les zones urbaines sont susceptibles ou résistants à l'impact des risques naturels.

Pour mettre en évidence les principaux réseaux de drainage naturel et plans d'eau en milieu urbain, nous nous sommes appuyés sur l'analyse de l'indice de végétation normalisé. Nous avons procédé par une analyse comparative des indices de végétation provenant des images optiques multi-bandes HRV de 1995 (figure 5a) et de 2001 (figure 5b), ce qui permet d'apprécier l'évolution des zones environnantes des réseaux de drainage naturel (à l'est sur les images de la figure 5).

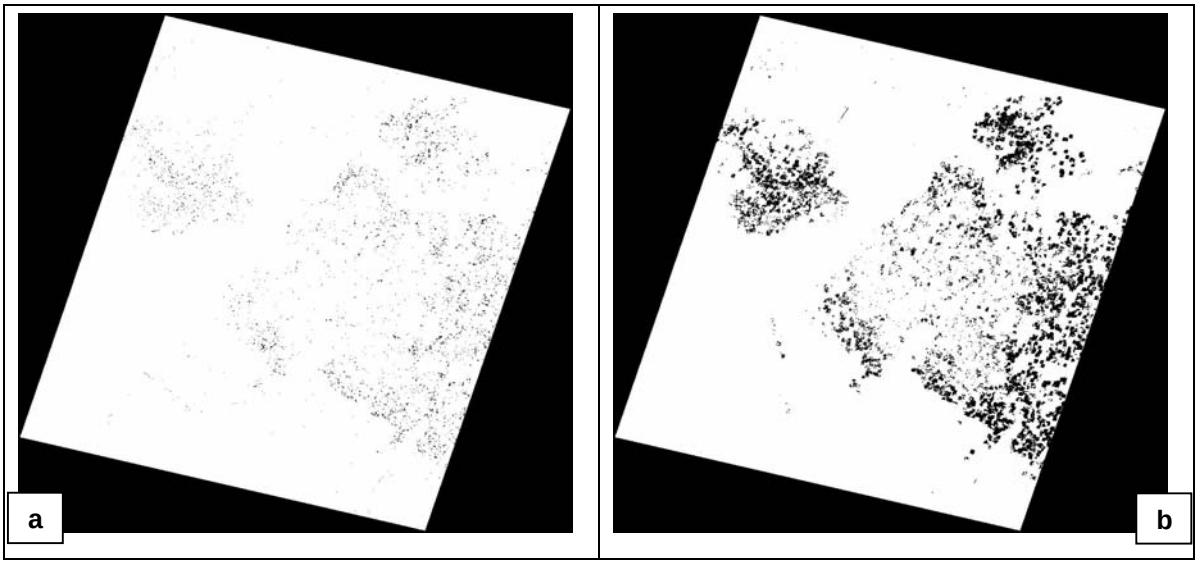
Sur la figure 5b, on peut observer une certaine érosion des réseaux de drainage naturel due à l'occupation humaine sur la zone de l'image indiquée par *R*. Ceci peut permettre de justifier le risque encouru par cette occupation humaine en cas d'inondation. On peut aussi relever la présence de plans d'eau, indiqués sur l'image par *E*, au voisinage desquels la pression de l'occupation humaine s'exerce.

5.2. Impacts de la dynamique urbaine

Une urbanisation rapide résulte de la conjonction d'au moins deux faits : la croissance de la population dans le milieu et l'absence ou la mauvaise planification des activités de développement sur le territoire. Cette urbanisation qui manque d'infrastructures, a de sérieuses implications sur les ressources de base dans le milieu. La dynamique urbaine de la ville de Douala se manifeste par une occupation spontanée de l'espace urbain, ce qui se traduit principalement par :

– un étranglement des réseaux de drainage naturel ou des cours d'eau ;

– une colonisation des berges des réseaux de drainage naturel et des environs des plans d'eau.



(échelle approx. 1 : 200 000)

FIGURE 5 Dynamique urbaine : a) échelle de petits îlots de bâtis (environ 40 m × 40 m); b) échelle d'îlots de bâtis (environ 140 m × 140 m). *Urban expansion : a) small block of habitations scale (around 40 m × 40 m); b) block of habitations scale (around 140 m × 140 m).*

6. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

6.1. Dynamique urbaine

La méthode proposée est appliquée sur deux images RSO (figure 1). Comme dans la plupart des villes du Sud aujourd'hui, la croissance urbaine est très rapide. L'objectif dans cette étude est d'apprécier globalement cette dynamique entre 1994 et 1999.

L'attribut du NDVI, correspondant à l'indice de distinction ville/non-ville, de la figure 2b montre qu'il a de faibles valeurs (pixels sombres) en zone urbaine (forte densité d'habitations) et de fortes valeurs (pixels clairs) à l'extérieur de la zone urbaine, c'est-à-dire en zone de végétation dense. Cette classification sémantique est illustrée sur la figure 4b et permet de calculer la fonction de degré d'appartenance de cet attribut.

Une sensibilité importante est également observée pour les deux autres attributs ARPP (figure 6a) et AC (figure 6b).

6.1.1. Dynamique urbaine à l'échelle de petits îlots du bâti

L'attribut ARPP est combiné avec celui du NDVI (figure 2b), pour mettre en évidence la croissance urbaine. Ceci correspond à une estimation de la croissance urbaine à une échelle comparable avec celle de petits îlots d'environ 40 m × 40 m. Le résultat de la fusion est donnée sur la figure 7a.

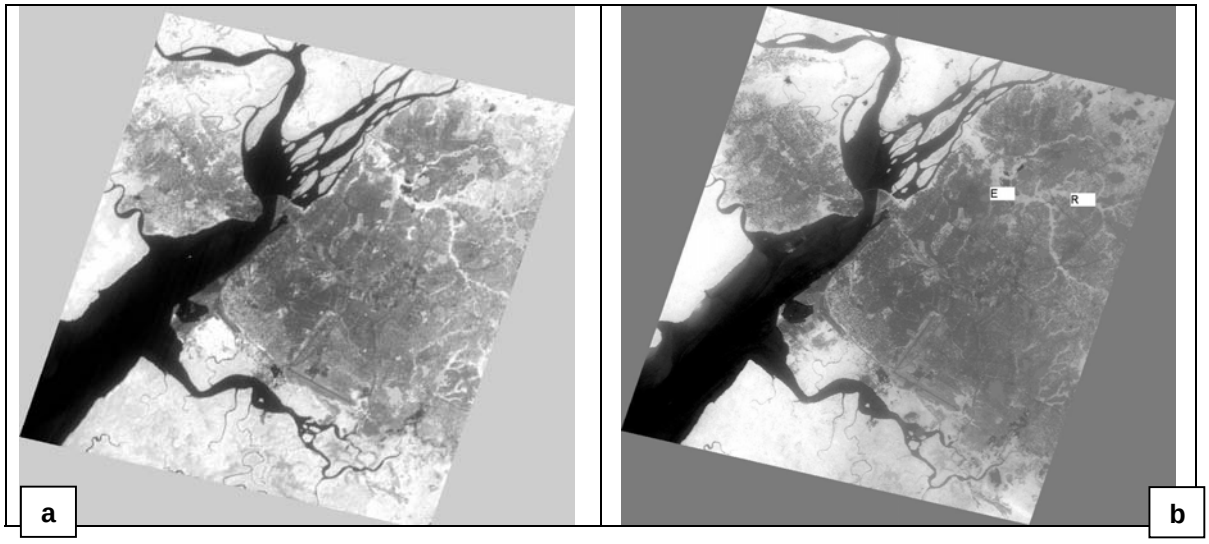
6.1.2. Dynamique urbaine à l'échelle d'îlot de bâtis

Pour cette échelle d'observation de la dynamique urbaine, un attribut basé sur le voisinage d'un pixel est calculé en utilisant une taille de fenêtre N × N·N = 11 (c'est-à-dire environ 140 m × 140 m) est utilisé pour calculer l'attribut AC présenté sur la figure 6b, lequel est ensuite combiné avec celui du NDVI. Sur la figure 6b, on montre très bien que, à l'extérieur de la zone urbaine, la corrélation est forte (pixels en gris clair), alors que la corrélation est faible (pixels sombres) en zone urbaine, là où la croissance urbaine peut être observée. Ceci conduit à analyser la croissance urbaine à une échelle comparable à celle d'un îlot d'habitations. Le résultat de la fusion est présenté sur la figure 7b.

6.2. Facteurs d'aggravation des risques d'inondation et impact de la dynamique urbaine

À l'échelle des petits îlots (blocs d'habitations d'environ 40 m × 40 m, soit 3 × 3 pixels pour les images RSO), sur la figure 8b, on montre la superposition de la croissance urbaine dans les zones de réseaux de drainage naturel ou alors aux environs des plans d'eau. À l'échelle d'un îlot d'habitations (bloc d'environ 140 m × 140 m, soit 11 × 11 pixels), sur la figure 8c, on montre également la superposition de la croissance urbaine sur les zones de réseaux de drainage naturel et aux environs des plans d'eau. Les zones d'inondation passées entre 1980 et 2000 (figure 8a), confron-

tés aux résultats obtenus, montrent bien que la croissance urbaine se manifeste sur les zones inondables. En particulier les inondations de 2000 concernaient les principaux réseaux de drainage naturel mis en évidence dans la section précédente et qui subissent pourtant une forte occupation humaine. Cette comparaison qualitative permet de valider, en première approximation, l'approche proposée dans cet article, relativement aux résultats prévus.



(échelle approx. 1 : 200 000)

FIGURE 6 Comparaison du NDVI des images HRV : a) NDVI de 1995; b) NDVI de 2001 ; R : zones d'érosion des drains, E : zones des plans d'eau. *NDVI comparison of HRV SPOT-4 images : a) NDVI of 1995; b) NDVI of 2001 ; R : drain erosion areas, E : water surfaces areas.*

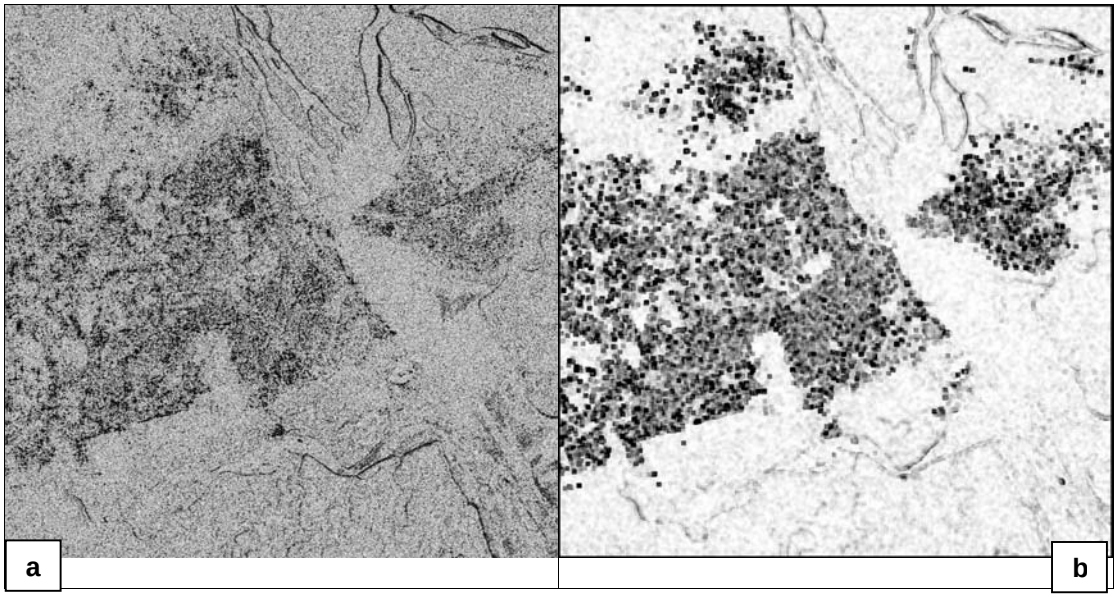
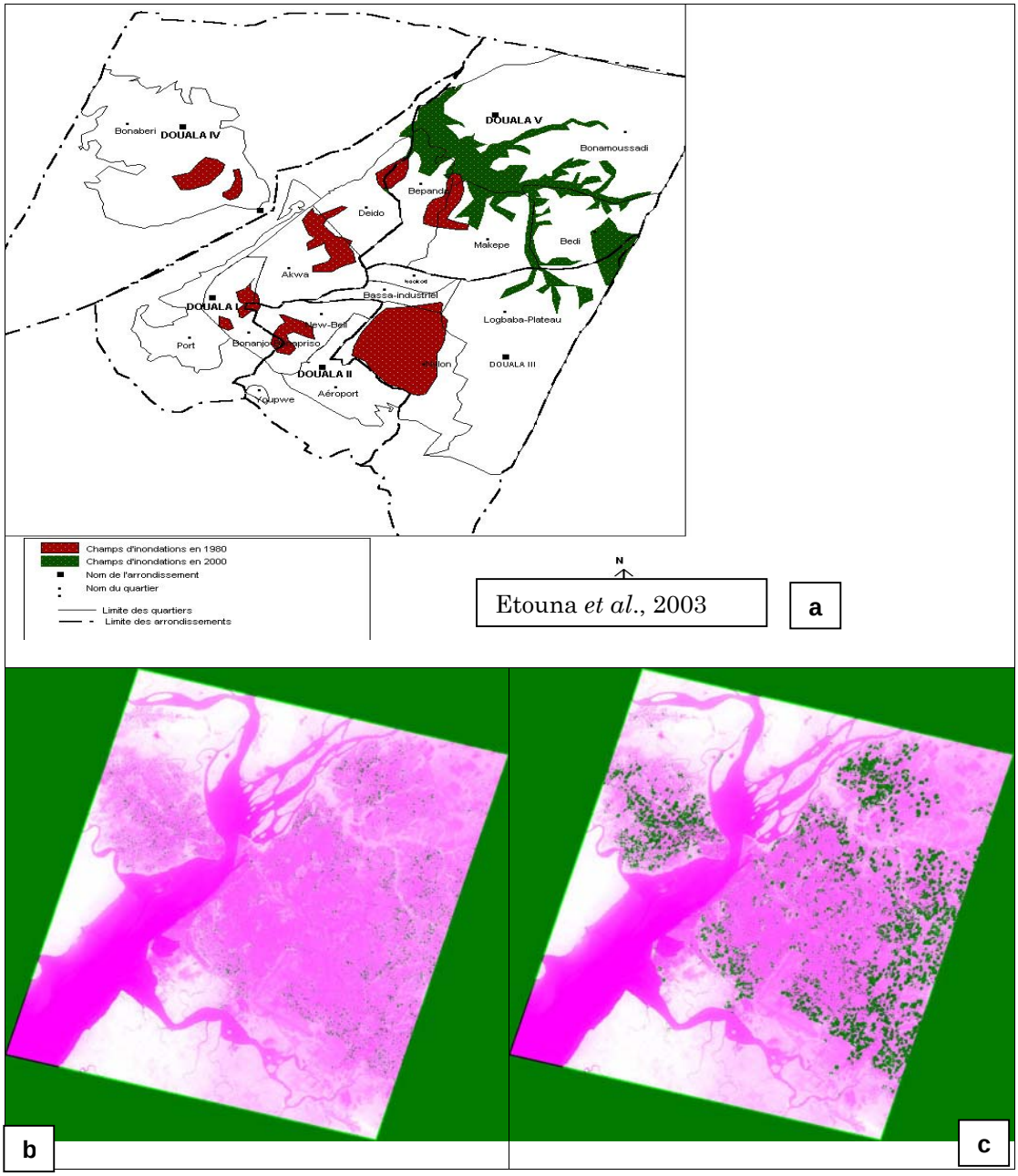


FIGURE 7 Images des attributs de changement : a) ARPP (Attribut du rapport pixel à pixel); b) AC (Attribut de corrélation). *Change attributes images : a) Pixel by pixel ratio attribute; b) Correlation attribute.*



(échelle approx. 1 : 200 000)

FIGURE 8 Superposition de la croissance urbaine et des facteurs d'aggravations du risque d'inondation provenant du NDVI (2001) : a) zones d'inondations précédentes localisés entre 1980 et 2000 ; b) Superposition à l'échelle de petits îlots de bâtis ; c) Superposition à l'échelle d'îlots. *Superimposition of urban expansion and worsening factors hazards coming from the NDVI (2001) : a) Flood areas localized between 1980 and 2000 ; b) Superimposition at the scale of small blocks of habitations ; c) Superimposition at the scale of blocks of habitations.*

7. CONCLUSION

Le schéma de fusion d'attributs proposé imite le comportement humain lors d'une analyse des données de télédétection spatiale par un interprète. Deux genres d'informations sont combinés : les attributs de quantification de la croissance urbaine provenant d'images RSO multidates, avec un indice de distinction ville/non-ville (attribut d'interprétation) provenant d'une image optique. Cette image optique du capteur HRV est utilisée comme information *a priori*, ce qui pourrait aider les planificateurs urbains à contrôler la croissance urbaine et ainsi à disposer d'une première interprétation de la dynamique observée entre deux dates. La méthode proposée permet une analyse globale de la croissance urbaine à une échelle fine, compatible avec celle de petits îlots d'habitations, et à une échelle grossière, compatible avec celle d'un îlot d'habitations.

La détection des changements dépend de la structure urbaine. En effet, quand on a une faible densité d'habitations ou des zones industrielles, elle induit un faible niveau de précision. Par conséquent, il est crucial de vérifier les changements à travers une acquisition de données de terrain et d'utiliser plus d'une technique pour évaluer les changements. Les techniques de détection des changements restent des outils pour aider une interprétation et une analyse du photo-interprète, et il n'y a pas encore de technique de détection des changements universelle optimale : le choix dépend de l'application (Singh, 1989).

Notre objectif dans le cadre de cette étude étant d'apprécier l'amplitude spatiale des changements en milieu urbain, afin de mettre en évidence son impact dans les facteurs d'aggravation des risques d'inondation, une évaluation de la précision des changements ne nous paraît pas nécessaire.

Le but de cette étude était de confronter le phénomène de la dynamique urbaine et son impact dans les facteurs d'aggravation des risques d'inondation en milieu urbain, au moyen des données de télédétection spatiale. Les données de télédétection permettent bien de mettre en évidence non seulement la dynamique urbaine (à l'échelle des données utilisées), mais également un certain nombre de facteurs d'aggravation des risques d'inondation, tels que les réseaux de drainage naturel et les plans d'eau. Les données utilisées pour illustrer la méthode montrent bien une certaine invasion des zones environnantes des réseaux de drainage naturel et des plans d'eau par l'occupation humaine. Les résultats des traitements montrent aussi l'amplitude spatiale de la dynamique urbaine et son évolution. La comparaison de cette dynamique avec une carte des zones d'inondations précédentes permet de justifier les zones dites zones inondables.

Les perspectives de cette étude seront le développement d'une approche de fusion d'informations pour l'estimation du degré de vulnérabilité afin de produire des cartes de vulnérabilité des zones à risque d'inondation.

Remerciements

Les auteurs remercient le groupe de recherche Information, Simulation, Image et viSion (ISIS) du Centre national des études spatiales (CNES) de France pour l'acquisition de des images HRV de SPOT-4 et de l'Agence spatiale européenne (ASE) pour la fourniture des images RSO de ERS dans le cadre du projet ID 539.

Références

Akbari, H., Rose, L. S. and Taha, H. (2003) Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos. Landscape and Urban Planning, vol. 63, p. 1-14.

Bujor, F.-T., Valet, L., Trouvé, E., Mauris, G., Classeau, N. and Rudant J.-P. (2001) Data Fusion Approach for Change Detection in Multi-temporal ERS-SAR Images. *In* Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, 9-13 July 2001, vol. VI, p. 2590-2592.

Chou, T., Lei, T. and Kuo, C. (2002) A study on identification of urban characteristics using spatial arrangement method. *In* The Proceedings of the 3rd International Symposium on Remote Sensing of Urban Areas, Istanbul, 11-13 June 2002, ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), vol. 1, p. 167-174.

Dubois, D., Foulloy, S., Galichet, S. and Prade, H. (1999) Computing with words. *In* L.A. Zadeh (dir.) Information/Intelligent Systems 1, Chapter Performing approximate reasoning with words. Springer Verlag, New York, p. 24-49.

Esbah, H. (2001) Using Landscape Structure Indices to Understand the possible impacts of landscape change : case study of the mountain preserves in the city of Phoenix, Arizona. Ph.D. thesis, Arizona State University, Tucson, 276 p.

Esbah, H. (2003) Detecting Changing Face of Urban Open Spaces in Aydin, Turkey. The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Regensburg, 27-29

June 2003, vol. XXXIV-7/W9, p. 46-49.

Etouna, J. (2003) Apport de la télédétection et SIG dans la gestion et la prévision des risques d'inondation en milieu urbain : cas de la région urbaine de Douala, Mémoire de DESS, Université Omar Bongo, Libreville (Gabon), 50 p.

Favretto, A., Mauro, G. and Battisti, G. (2002) Urban growth of small villages through a comparison foancient maps and satellite imagery. *In* The Proceeding of the 3rd International Symposium on Remote Sensing of Urban Areas, ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), vol. 2, p. 505-511.

Gamanya, R., De Maeyer, P. and De Dapper, M. (2003) Urban Growth of Harare City, Zimbabwe : Based on Change Detection Techniques of Remotely Sensing Data. The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences , Regensburg, 27-29 June 2003, vol. XXXIV-7/W9, p. 222-224.

Green, K., D. Lempka and L. Lackey (1994) Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 60, nº 3, p. 331-337.

Haff, P.K. (2002) Neogeomorphology. American Geophysical Union EOS Transactions, vol. 83, nº 29, p. 310-317.

Hayes, D. J. and Sader, S.A. (2001) Comparison of Change-Detection Techniques for Monitoring Tropical Forest Clearing and Vegetation Regrowth in a Time Series. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 67, nº 9, p. 1067-1076.

Henderson, F.M. and Xia, Z. (1997) SAR applications in human settlement detection, population estimation and urban land use pattern analysis : a status report. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 35, p. 79-85.

Kressler, F.P., Steinnocher, K.T. and Kim, Y. (2002) Urban land cover mapping from Kompsat EOC panchromatic images using an object oriented classification approach. *In* The Proceedings of the 3rd International Symposium on Remote Sensing of Urban Areas, Istanbul, 11-13 June 2002, ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), vol. 1, p. 219-226.

Lang, S., Schöpfer, E. and Blaschke, T. (2003) Object-Specific Change Detection Based on Assisted Feature Extraction : A Case Study of an Expanding Suburban Area. The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Regensburg, 27-29 June 2003, vol. XXXIV-7/W9, p. 93-98.

Leduc, F., Solaiman, B. and Cavayas, F. (1999) A global architecture for temporal changes analysing system using satellite and cartographic data. *In* Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hambourg, 28 June-2 July 1999, vol. 5, p. 2366-2368.

Lee, W.K. (2001a) Analytical investigation of urban SAR features having a group of corner reflectors, *In* Proceedings of IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium 2001, Sydney, 9-13 July 2001, p. 530-532.

Lee, W.K. (2001b) Reduction of cardinal effects in SAR imagery of densely populated urban areas by suppressing strong multiple returns, *In* Proceedings of IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium 2001, Sydney, 9-13 July 2001, p. 209-211.

Lopez, E., Bocco, G., Mendoza, M. and Duhau, E. (2001) Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe, a case in Morelia city, Mexico. Landscape and Urban Planning, vol. 55, p. 271-285.

Netzband, M. (2002) Modeling the internal structure of urban reas by remote sensing methods for a more effective urban environmental management. *In* Proceedings of the 3rd International Symposium on Remote Sensing of Urban Areas, Istanbul, 11-13 June 2002, ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), vol. 1, p. 206-212.

Oliver, C. and Quegan, S. (2004) Understanding Synthetic Aperture Radar Images. SciTech, 512 p.

Onana, V. de P., Trouvé, E., Mauris, G., Rudant, J.-P. and Frison, P.L., (2003) Change detection in urban context with multitemporal ERS-SAR images by using Data fusion approach, *In* Proceedings of IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium, Toulouse, 21-25 July 2003, vol. IV, p. 3650-3652.

Rignot, E.J.M. and Van Zyl, J.J. (1993) Change Detection Techniques for ERS-1 SAR Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 31, nº 4, p. 896-906.

Saradjian, M.R. and YaAllah, S.M. (2002) Urban expansion monitoring based on a post classification comparison change detection technique, a case study on Tehran. *In* The Proceedings of the 3rd International Symposium on Remote Sensing of Urban Areas, Istanbul, 11-13 June 2002, ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), vol. 2, p. 521-527.

Schiavon, G. and Solimini, D. (2000) Dihedral and trihedral corner reflector models for the interpretation of radar returns from urban manufacts. *In* the Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2000, Honolulu, 24-28 July, vol. 7, p. 2882 -2884.

Seto, K.C. and Duong, N.D. (2002) Using a multi sensor approach to monitoring urban growth in greated Hanoi 1975-2001. *In* the Proceeding of the 3rd International Symposium on Remote Sensing of Urban Areas, Istanbul, 11-13 June 2002, ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), vol. 2, p. 561-565.

Singh, A. (1989) Digital change detection techniques using remotely-sensed data. International Journal of Remote Sensing, vol. 10, p. 989-1003.

Takeuchi, S. and Oguro, Y. (2003) Analysis on Topograhical Aspect in Urban Growth by Combining Multi-Temporal LANDSAT Images and DEM. The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Regensburg, 27-29 June 2003, vol. XXXIV-7/W9, p. 270-273.

Timnou, J.P. (1993) Migration, urbanisation et développement au Cameroun. Les cahiers de l'IFORD (Institut de formation et de recherche démographiques), Yaoundé, juin, 115 p.

Touzi, R., Lopes, A. and Bousquet, P. (1988) A statistical and geometrical edge detector for SAR images. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 26, nº 6, p. 764-773.

The University of Texas (2004) UT Library online, Maps/Africa. http://www.lib.utexas.edu/maps.

UNDRO (United Nations of Disaster and Risk Operations) (1991) Mitigating natural disasters phenomena, effects and options. A manual for Policy Makers and Planners, New York, 164 p.

White, R.G. (1991) Change detection in SAR imagery, International Journal of Remote Sensing, vol. 12, n° 2, p. 339-360.

Xia, Z. and Henderson, F.M. (1997) Understanding the relationships between radar response patterns and the bio- and geophysical parameters of urban areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, p. 93-101.

Zadeh, L.A. (1965) Fuzzy sets. Information and Control, vol. 8, p. 338-353.

Zipperer, W.C., Wu, J., Pouyat, R.V. and Pickett, S.T.A. (2000) The application of ecological principles to urban and urbanizing landscapes. Ecological Applications, vol. 10, nº 3, p. 685-688.