

ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES EAUX STAGNANTES DANS LA VILLE DE COTONOU

H.-J. DOSSOU*, ** ; H. HOUEMENOUE*** ; J. ETOUGBETCHE** ; M. SOSSOU* ; S. BADOUE** , G. HOUEMENOUE** , J.-P. ROSSI**** , G. DOBIGNY** , **** & B. TENTE*

*Institut de Géographie, de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin

**Unité de Recherche sur les Invasions Biologiques, Laboratoire de Recherche en Biologie Appliquée, École Polytechnique d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin

***Institut Nationale de l'Eau, Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 4521 Cotonou, Bénin

****UMR CBGP (IRD, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, MUSE), Montpellier (France)

RÉSUMÉ

La récurrence des inondations à Cotonou est responsable de nombreux problèmes économiques, sanitaires et infrastructurelles. La fourniture d'informations scientifiques est primordiale pour la gestion des torts induits par ces inondations. Dans trois quartiers urbains de Cotonou, Bénin, aux profils socio-environnementaux contrastés, les eaux stagnantes ont été cartographiées via les outils Open Street Map, puis caractérisées à l'aide d'un SIG et de métriques paysagères. Nos résultats ont suggéré de nettes variabilités intra- et inter-quartiers en fonction (i) des mécanismes à l'œuvre dans le processus d'inondation, (ii) de la couverture des sols et (iii) du fait que les grandes surfaces inondables n'ont pas forcément impliqué une humidité permanente. Cette étude de mesures spatialisées des eaux stagnantes offre pour les autorités une nouvelle approche en appui à l'aide à la décision dans l'élaboration de plans locaux de gestion de l'environnement urbain.

Mots clés : Eaux stagnantes, métriques de paysages, environnement urbain, SIG.

ANALYSIS OF SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF STAGNANT WATER IN COTONOU CITY

ABSTRACT

In Cotonou, recurrent floods pose several economic, health and infrastructural problems. Scientific knowledge may be quite helpful to guide the management of flood-associated issues. In three neighborhoods of Cotonou, Benin, displaying different socio-environmental profiles, standing waters were mapped using Open Street Map toolkit and then modelled using landscape metrics. The results suggest marked intra- and inter-neighborhood variability depending on (i) the flooding mechanisms at work, (ii) the coverage of soils types and (iii) the fact that large areas subject to flooding do not necessarily imply permanent moisture. By spatially measuring standing water, this study provides a new approach that may greatly help authorities when implementing local urban management plans.

Keywords : Standing water, landscape metrics, urban environment, GIS.

INTRODUCTION

La population citadine africaine était de 43 % de sa population totale en 2018 (ONU-WUP, 2018) et atteindra 60 % (1,13 milliards) en 2050 (ONU- Habitat, 2010). Toutes les régions d'Afrique en seront impactées notamment l'espace

ouest africain pressenti pour être l'une des régions les plus urbanisées du continent (Confins, 2020). Cotonou, capitale économique du Bénin, n'échappe pas à ce processus d'urbanisation galopante et constitue au contraire une des villes en pleine croissance qui s'égrènent le long du Golfe de Guinée et qui tendent à former le corridor urbain Abidjan-Lagos (Confins, 2020). L'expansion mal maîtrisée de Cotonou (Danvidé, 2015) *sensu stricto* vers des espaces souvent impropres à l'installation humaine (Capo, 2008) est associée à une forte croissance démographique et de fortes densités humaines. De tels processus modifient et participent à la dégradation de l'environnement urbain (Becker *et al.*, 2015) avec bien souvent l'apparition et l'étalement de zones précaires en marge du reste de la ville formelle (Danvidé, 2015). Par ailleurs, la densité du réseau hydrographique de cette partie de l'Afrique de l'Ouest, la faiblesse de la pente du terrain de Cotonou et le régime subtropical des pluies entraînent des inondations récurrentes (PCUG3C, 2012). Inondations qui ont des conséquences potentiellement très fortes sur les échanges, l'économie, les infrastructures et la santé (maladies hydriques comme les diarrhées aiguës, le choléra, la leptospirose, etc ; Gouvernement de la République du Bénin, 2011 ; Houémènou, 2013 ; Fousséni, 2016 ; Dobigny *et al.*, 2018).

Le désarroi des populations et l'incapacité des structures dédiées à y remédier dénotent de l'acuité du problème et d'un besoin de connaissances qui permettraient de faciliter la mise en œuvre de plans adaptés d'aménagement. Malheureusement, les travaux axés sur la ville de Cotonou (Capo, 2008 ; Danvidé, 2015 ; Hountondji *et al.*, 2019) n'intègrent habituellement pas la caractérisation spatio-temporelle des eaux stagnantes à une échelle fine. Dans cette étude, nous utilisons les métriques paysagères (Turner *et al.*, 2001) pour monitorer et quantifier les surfaces inondées dans trois quartiers contrastés de la ville afin de décrire leur variabilité et d'en déterminer certaines caractéristiques. Nous espérons que notre approche fournira aux décideurs et aux aménageurs des outils supplémentaires pour guider les plans d'aménagement urbains au Bénin en général, à Cotonou en particulier.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Milieu d'étude

Cotonou est une ville côtière de la partie sud du Bénin qui s'étend sur 79 km² entre 6°20' et 6°24' de latitude nord et 2°20' et 2°30' de longitude est. Elle s'étale sur un cordon littoral sableux et peu accidenté (Boukari, 1998) entre le lac Nokoué au nord et l'Océan Atlantique au sud. Cet espace est sous l'influence d'un climat subéquatorial à deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses (1300 mm/an ; Yabi & Afouda, 2012) avec des températures moyennes de 27,2°C. Les fortes précipitations, la perméabilité de son sol et l'affleurement de la nappe phréatique sont à l'origine de fréquentes résurgences d'eau, notamment après les pluies (Adégnika, 2004 ; Houémènou *et al.*, 2019b). Ce phénomène est accentué par la forte emprise humaine et les fortes densités de population (8.593 hbts/km² en 2013 ; <https://insae.bj/statistiques/statistiques->

demographiques), l'accumulation de déchets qui obstruent les grands collecteurs ou qui sont utilisés pour remblayer certains marécages et certains bas-fonds ou même les berges du Lac Nokoué, perturbant ainsi fortement l'évacuation des eaux. Par ailleurs, la décharge des réseaux hydrographiques en amont occasionne un débordement annuel des plans d'eau comme le Lac Nokoué sur les quartiers riverains (Adégnika, 2004).

Dans le cadre d'un programme d'exploration des risques zoonotiques en milieu urbain et périurbain au sud du Bénin (ex. Dobigny *et al.*, 2019 ; Houémènou *et al.*, 2019a, Houémènou *et al.*, 2019b, Houémènou *et al.*, 2021), les quartiers d'Agla, de Ladji et de Saint-Jean, considérés comme emblématiques de trois grands profils socio-environnementaux de Cotonou, ont été monitorés. Agla (6°22'N ; 2°21'E) est un quartier relativement récent mais pourtant densément peuplé et installé dans une cuvette marécageuse qui s'inonde par accumulation des eaux de pluies en début de saison pluvieuse. Il est en cours d'aménagement, mais abrite encore de nombreuses zones informelles, notamment au niveau des nombreux bas-fonds marécageux qui caractérise cette partie de la ville. Ladji (6°23'N ; 2°25'E) est un ancien village de pêcheurs situé en bordure du lac Nokoué qui a été rattrapé par la croissance de la ville à tel point qu'il est aujourd'hui un quartier très peuplé, non viabilisé, caractérisé par des installations précaires et une insalubrité importante. Une partie importante du quartier est construite sur pilotis sur le Lac Nokoué, tandis que les berges du lac s'inondent en fin de saison pluvieuse suite au débordement du lac. Enfin, Saint-Jean (6°21'N ; 2°24'E) un quartier d'origine coloniale, formellement loti mais tout aussi peuplé que les deux autres. En revanche, il ne s'inonde pas en tant que tel, même si de vastes flaques peuvent persister le long des voies quelques jours voire semaines après de fortes pluies.

Collecte et traitement de données

Dans cette étude, les eaux stagnantes sont les étendues d'eau ne circulant pas ou qui circulent que très peu. Elles peuvent être temporaires ou pérennes et regroupent toutes les zones inondées telles que les flaques d'eau formées après les averses, les plans d'eau (lacs, rivières) ainsi que les bas-fonds marécageux. Les eaux stagnantes constituent ainsi une première catégorie d'eau. Une deuxième catégorie constituée uniquement de flaques d'eau et définie comme étant de petites étendues d'eau temporaire d'origine anthropique ou pluviale exclusivement situées dans les rues, a été élaborée. Dans ces trois quartiers emblématiques de Cotonou (Dansou, 2006 ; Sotindjo, 2009 ; PCUG3C, 2012), les eaux stagnantes (flaques d'eau et marécages) ont été cartographiées à l'aide d'un smartphone équipé des applications développées par la communauté Open Street Map (KoBoCollect APK v1.23.3k ; OSM Tracker 0.6.11). Le tracking des eaux stagnantes s'est fait à pied en juin 2017, octobre 2017, mars 2018 et juin 2018, allée par allée, sur une superficie de 529 931 m² à Agla, 223 873 m² à Ladji et 256 030 m² à Saint-Jean. Pour ce faire, les contours de toutes les eaux stagnantes dont la plus grande longueur était supérieure ou égale à 3 mètres ont été géo-référencés puis numérisés sur un fond d'image satellite Spot 7

(multi-spectrale) datant de 2016, et présentant une résolution 6 mètres (projection UTM sur WGS 84 dans le logiciel QGIS v3.16.2). Les fichiers « shapefiles » obtenus ont ensuite été convertis en fichiers rasters de résolution 0,5 m où chaque pixel est caractérisé par une valeur spécifique correspondant à une unité de paysage.

A l'aide du logiciel R (R Core Team, 2019), les fichiers cartographiques (rasters) ont d'abord été traités session par session puis globalement, c'est-à-dire après fusion des rasters issus des quatre sessions temporelles, afin de procéder au calcul de la proportion de paysage (PLAND) occupée par chaque type d'unité paysagère (quand l'eau est présente rien qu'une fois, *eau 1* ; puis deux fois, *eau 2*, ainsi de suite, *eau 3* et *eau 4*) à partir du package R "landscapemetrics" (Hesselbarth *et al.*, 2019). Les mêmes analyses ont été effectuées à la fois sur toutes les eaux stagnantes puis en considérant uniquement les flaques d'eau cartographiées dans les rues des trois quartiers. Un accent particulier a été mis sur les flaques dans les rues car elles affectent directement (entravent le passage, piétinement des flaques) tous les usagers résidents et en transit.

RÉSULTATS

A l'issue de nos campagnes saisonnières de cartographie, 12 cartes rasters (à raison d'une carte par session, quatre sessions et trois quartiers) ont été obtenues.

Quantification saisonnière des surfaces occupées par les eaux dans les quartiers

Les surfaces de sol couvert par les eaux stagnantes (marécages et flaques) varient significativement d'une session à l'autre, comme l'illustre la figure 1. A Agla, les marécages occupent des surfaces plus grandes que les flaques d'eau, et ce à toutes les sessions. A Ladji, au contraire, si l'on écarte le cas particulier du Lac Nokoué, les surfaces occupées par les flaques d'eau ont été 3,70 fois en juin 2017 et 1,18 fois en juin 2018 plus grandes que les surfaces des marécages.

La session de Juin 2017 (Figure 1a) révèle les plus fortes proportions de surfaces occupées par les eaux stagnantes à Ladji (16,70 %) et à Agla (14,7 %) tandis que cette superficie est bien plus faible à Saint-Jean (1,46 %). La session suivante (Octobre 2017) indique des proportions non négligeables à Agla (10,4 %) mais faibles à Ladji (2,41 %). Malgré des pluies importantes en mai et juin 2018, la session de juin 2018 montre des eaux stagnantes limitées à Ladji (3,98 %), alors qu'elles restent conséquentes à Agla (14,1 %).

Une analyse des étendues couvertes par les eaux en faisant abstraction des marécages (Figure 1b) a montré qu'en juin 2017, les flaques d'eau à Ladji représentent 13,11 % de la surface de l'emprise de notre étude, et sont 3 fois plus importantes que celles observées à Agla. En revanche, en juin 2018, les flaques d'eau à Agla sont 1,4 fois plus étendues que celles de Ladji.

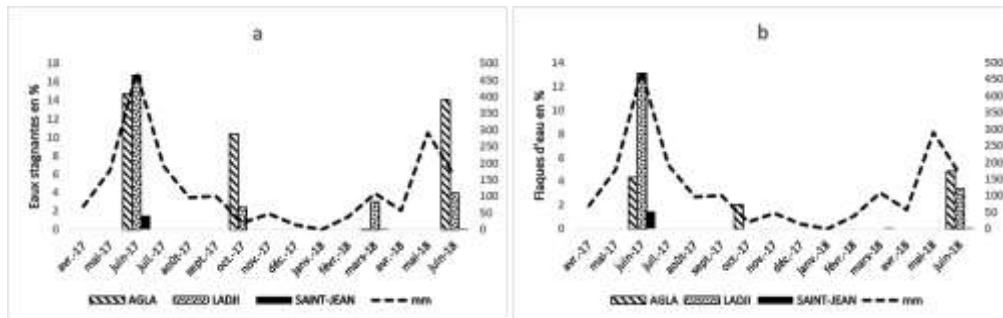


Figure 1. Proportions de sol couvert par l'eau en juin 2017, octobre 2017, mars 2018 et juin 2018 par quartier. Eaux stagnantes (a), flaques d'eau (b) et précipitations mensuelles (en tireté, axe de droite).

Source : données de terrain, 2018

Cartographie des superficies couvertes par les eaux au cours du temps

La cartographie du suivi des eaux stagnantes réalisée dans les quartiers d'Agla, de Ladj et de Saint-Jean (Figure 2) a montré une présence très contrastée des eaux stagnantes à l'intérieur de chacun de ces trois zones urbaines.

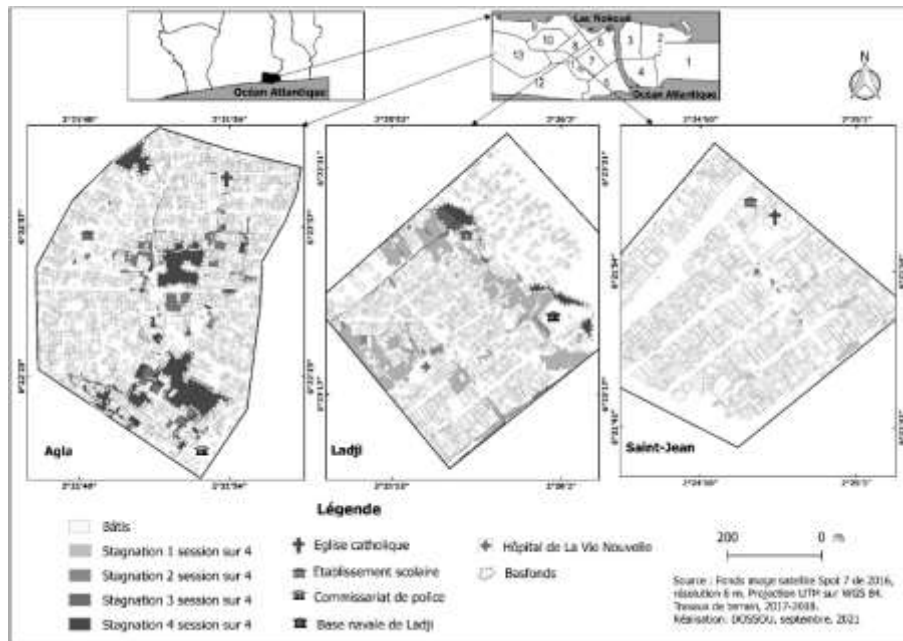


Figure 2. Cartographie des eaux stagnantes cumulées au cours des 4 sessions dans les trois quartiers de Cotonou.

Source : données de terrain, 2018

Occurrence des eaux stagnantes et flaques d'eau à Cotonou

La quantification de l'occurrence des eaux stagnantes (tableau 1) a ressorti que les espaces marécageux ont été principalement les plus humides avec même des superficies couvertes d'eau à toutes les sessions atteignant 2,13 % de Ladji et 0,01 % d'Agla. Les surfaces couvertes par les eaux stagnantes pendant trois et deux des quatre sessions de suivi à Agla représentent respectivement 9,61 % et 4,43 %. Quant aux flaques d'eau, les surfaces les plus grandes ont été enregistrées pour les présences à deux (2,03 %) et trois (1,74 %) sessions sur quatre dans le quartier d'Agla (tableau 1). Dans le quartier de Ladji, les surfaces investies par les eaux stagnantes (12,90 %) et par les flaques d'eau (10 %) à seulement une seule session ont été les plus importantes en termes de superficie. Les plus grandes surfaces inondées à Saint-Jean ne l'ont été qu'une seule fois (1,38 %). Sur l'ensemble des trois quartiers, Agla a été celui où les eaux stagnantes ont été le plus de fois observées (14,05 % soit 3,5 fois celui de Ladji pour les sessions deux, trois et quatre) alors que Ladji a totalisé les plus grandes superficies inondées (16,91 %).

Tableau 1. Proportions d'abondance des surfaces investies par l'eau suivant leur occurrence dans chaque quartier

| Occurrences des eaux stagnantes | Agla (%) | | Ladji (%) | | Saint-Jean (%) | |
|-------------------------------------------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| | Eaux stagnantes | Flaques | Eaux stagnantes | Flaques | Eaux stagnantes | Flaques |
| Présence 1 session sur 4 (<i>eau 1</i>) | 1,93 | 1,45 | 12,9 | 10 | 1,38 | 1,38 |
| Présence 2 session sur 4 (<i>eau 2</i>) | 4,43 | 2,03 | 0,99 | 0,97 | 0,05 | 0,05 |
| Présence 3 session sur 4 (<i>eau 3</i>) | 9,61 | 1,74 | 0,89 | 0,88 | 0,05 | 0,05 |
| Présence 4 session sur 4 (<i>eau 4</i>) | 0,01 | - | 2,13 | - | - | - |
| Surfaces totales occupées par l'eau | 15,98 | 5,22 | 16,91 | 11,85 | 1,48 | 1,48 |

Source : données de terrain, 2018

DISCUSSION

Eaux stagnantes dans les trois quartiers de Cotonou

Les périmètres étudiés ici connaissent des stagnations d'eau qui varient au gré des pluies et/ou de la dynamique des cours d'eau environnants. En effet, la surface importante d'eau stagnante à Agla est intimement liée à la présence des marécages, tandis qu'à Ladji, elle est induite par les flaques d'eau issues des épisodes pluvieux et des variations du niveau du Lac Nokoué. Nous observons donc là un premier niveau de variabilité inter-quartiers qui fournit des éléments de différenciation des zones urbaines en fonction des mécanismes à l'œuvre dans le processus d'inondation. Ainsi, l'influence d'un système lac-marais côtiers où l'accumulation saisonnière des eaux dans les bas-fonds (Volkoff & Willaime, 1976, Houémènou *et al.*, 2019), se traduit, à la faveur des

pluies, par un débordement et des inondations subséquentes des habitations et des voies adjacentes, comme nous l'observons ici à Agla. A Ladj, c'est l'augmentation saisonnière du niveau des fleuves Ouémé et Sô qui engendre des crues annuelles du lac Nokoué qui envahit alors les berges et inonde les zones d'habitations riveraines (Adégnika, 2004).

Dans l'un comme dans l'autre des deux quartiers, le remblayage des marécages et des abords du lac Nokoué par des ordures (qui perturbent les voies habituelles de circulation des eaux et/ou inversent les profils topographiques locaux ; Mairie de Cotonou, 2008), les installations humaines toujours en cours dans les espaces marginaux et l'absence d'ouvrages de collecte des eaux de pluie font aujourd'hui parties de ces facteurs qui pourraient accroître la fréquence et les superficies inondées. Ceci est d'autant plus vrai dans un contexte de changement climatique où des pluies anormalement fortes devraient être de plus en plus fréquentes (Amoussou *et al.*, 2011). A l'inverse, le quartier Saint-Jean bénéficie de grands réseaux de canalisation qui évacuent très rapidement les eaux de pluies, lorsque ces derniers ne sont pas obstrués. Dans cet espace urbain plus formellement aménagé, les eaux stagnantes se résument donc essentiellement aux flaques d'eau et, de façon plus marginale, au rejet des eaux usées des ménages directement dans les rues. Dans ce type d'espace, les rares épisodes d'inondation s'expliquent habituellement par un retard dans le curage des caniveaux.

A l'échelle de la ville, l'activité informelle de "sablonnier" (qui consiste à ramasser le sable sur la chaussée pour l'exploiter ou le vendre ; Dossou-Yovo & Boko, 2017) constitue un complément économique substantiel pour certains ménages à faible revenu, mais peut masquer une pratique beaucoup moins appréciable telle que le ramassage du sable dans les ruelles des quartiers créant ainsi des trous épars responsables de la stagnation des eaux de pluies et des eaux usées.

Caractérisation de la variation des eaux stagnantes dans les quartiers

Selon les quartiers considérés, la variabilité des dynamiques d'accumulation d'eaux de surface induit une variation spatiale de la surface des eaux stagnantes. Ce deuxième niveau de variabilité intra-quartier se traduit directement par des profils différents de distribution des espaces les plus humides (présence plus ou moins constante d'eau). Ainsi, à Ladj, les espaces les plus humides sont très localisés et se situent aux abords immédiats du Lac Nokoué. Ils correspondent notamment à des marécages ou à des fossés creusés par les habitants pour évacuer les eaux pluviales vers le lac. Les marécages en amont, reliés au lac Nokoué par ces ouvrages artificiels et précaires (fossés) créent des chemins d'eau qui se remplissent d'eau du lac pendant les périodes d'absence de pluie (ex. octobre 2017 et mars 2018). Malheureusement, ces fossés favorisent la stagnation parfois longue d'eau dans l'environnement, ce qui peut favoriser la prolifération de pathogènes liés à l'eau et/ou d'insectes vecteurs. A Agla, l'hydromorphie des sols et l'affleurement de la nappe phréatique (revue dans Danvidé, 2015 ; Houémènou *et al.*, 2019b) causent un

engorgement des eaux pluviales, parfois au point de déborder dans les rues. Le phénomène peut être tel que des espaces humides deviennent connectés entre eux et relient parfois même la grande cuvette marécageuse d'Agla.

Des variations temporelles de la couverture en eau stagnante sont aussi notées entre les quartiers, et de vastes surfaces inondées n'impliquent pas nécessairement qu'elles le restent longtemps. Ces différences reflètent un troisième niveau de variabilité. A titre d'exemple, Ladji présente de vastes surfaces inondables mais globalement les eaux stagnantes hormis le lac Nokoué séjournent moins longtemps (moins humide) qu'Agla. Le relief en cuvette et l'envahissement par la végétation qui maintient l'humidité à des endroits donnés à Agla, explique probablement la présence quasi-permanente de l'eau qui peut s'accumuler. Néanmoins, l'absence et/ou le retard des pluies à Ladji explique probablement beaucoup l'absence d'eaux stagnantes dans les rues de ce quartier aux sessions d'octobre 2017 et de juin 2018. Les superficies inondées sont donc fluctuantes à des échelles potentiellement fines dans les environnements urbains et peuvent dépendre là aussi des propriétés physiques des sols (ex. l'hydromorphie des sols des marécages d'Agla), des quantités de pluies tombées localement, des types d'aménagements (ex. tel que le réseau de canalisation à Saint-Jean) et de la situation géographique (exemple de Ladji qui fait front au lac Nokoué, et d'Agla situé dans une cuvette inondable).

Utilité de la caractérisation des eaux stagnantes dans les quartiers urbains

Les villes sont des espaces très dynamiques (ONU-Habitat, 2018) et le mode et le tempo de l'urbanisation peut fortement varier suivant les pays (Adhikari & de Beurs, 2017 ; Sun *et al.*, 2020). Les impacts de l'urbanisation (Molbert *et al.*, 2021) suscitent de nombreuses réflexions (Bian *et al.*, 2021), notamment quant aux outils adéquats pour l'étude des villes et dans l'optique de la mise en place de villes durables. Les métriques paysagères considérées ici sont des outils mathématiques robustes qui offrent l'opportunité de caractériser les paysages urbains de façon fiable et répétable (ex. Sertel *et al.*, 2018 ; Rossi & Dobigny, 2019) ; elles peuvent donc être utilisées pour des objectifs très divers (ex. Moraga *et al.*, 2019 ; Simwanda *et al.*, 2019 ; Lei *et al.*, 2021 ; Li *et al.*, 2021 ; Peng et Li, 2021).

Sur le plan épidémiologique

Les problèmes de santé publique liés aux inondations et aux maladies hydriques sont légions (Londe *et al.*, 2016 ; Nguyen *et al.*, 2017 ; Rui *et al.*, 2018 ; Saulnier *et al.*, 2018) et la caractérisation des eaux stagnantes peut s'avérer être une donnée indispensable à la compréhension de la capacité de transmission de certaines affections en lien avec l'eau. La présence et la forte densité d'arthropodes vecteurs *Anopheles sp.* (Kibret *et al.*, 2017 ; Camara *et al.*, 2018), vecteurs du paludisme, et d'*Aedes sp* (Leal *et al.*, 2020), mise en cause dans la transmission des virus de Zika, de la dengue, du chikungunya ou de la fièvre jaune en sont des illustrations. Les leptospires pathogènes (*Leptospira sp*) responsables de la leptospirose et transmises à l'homme au

contact d'eau souillée par les mammifères (ex. rongeurs, bétail, etc.) ont déjà été signalés dans les eaux stagnantes (Casanovas-Massa *et al.*, 2018 ; de Oliveira *et al.*, 2020), y compris celles de Ladji et d'Agla (Houémènou *et al.*, 2021). Le choléra (Bauza *et al.*, 2020), l'ulcère de Buruli (Houngbédji & Frenette, 2011 ; Dupechez *et al.*, 2019) sont d'autres exemples de maladies hydro-telluriques dont les impacts sur la santé humaine peuvent être dramatiques et que le suivi quantifié de la dynamique spatio-temporelle des eaux stagnantes, en particulier en lien avec les inondations, pourraient aider à gérer en milieu urbain. En effet, les outils des Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont déjà été proposés pour la gestion du choléra (Saha *et al.*, 2018), le chikungunya et le zika (Curtis *et al.*, 2017), le paludisme (Attoumane *et al.*, 2020 ; Gebre *et al.*, 2020 ; Gwitira *et al.*, 2020 ; Abdelsattar & Hassan, 2021), la dengue (Marti *et al.*, 2020 ; Wimberly *et al.*, 2020 ; de Oliveira Lemos *et al.*, 2021) et la leptospirose (Dobigny *et al.*, 2015 ; Mensch Buffon *et al.*, 2019 ; Rajapakse *et al.*, 2020) y compris en milieu urbain.

L'intégration de la dimension spatio-temporelle permet en quelque sorte de dresser les profils épidémiologiques et, potentiellement, les déterminants sociaux des maladies en tenant compte de certains facteurs environnementaux liés au risque sanitaire, ici les eaux stagnantes. Un tel objectif passe par une approche interdisciplinaire "One Health" pouvant réunir des épidémiologistes, biologistes, géographes, des sociologues et des urbanistes autour d'une réflexion sur les stratégies de lutte anti-vectorielle associées à des interventions locales plus adaptées.

Sur le plan des travaux d'aménagement et d'assainissement des villes.

En dehors des aspects épidémiologiques, la fourniture d'informations détaillées sur les eaux stagnantes peut faciliter le renforcement des processus de planification et de mise en œuvre des réponses visant à optimiser la gestion des écoulements, et donc à réduire les risques d'inondations (Vercruysse *et al.*, 2019) et leurs impacts directs sur les infrastructures (Forero-Ortiz *et al.*, 2020), les habitats et les ménages urbains (Azuma *et al.*, 2014 ; Nowak Da Costa *et al.*, 2021). Inversement, les effets de l'organisation des infrastructures sur la survenue des inondations (Thanvisitthpon, 2019) peuvent être évalués dans une perspective d'amélioration de la résilience des populations affectées. Ainsi, des actions localement adaptées peuvent être orientées et engagées (ex. choix de l'infrastructure verte ; Douglas *et al.*, 2018) dans les zones les plus humides, telles qu'elles ont été identifiées et caractérisées ici. Plus généralement, à l'échelle de la ville de Cotonou, la quantification de la dynamique spatio-temporelle des eaux stagnantes telle qu'elle a été initiée ici pourrait constituer pour les autorités en charge de la gestion de la ville un outil précieux d'aide à la décision et de guide pour l'élaboration de projets d'assainissement et d'aménagement urbain.

CONCLUSION

La quantification des eaux stagnantes à l'aide d'un SIG et de métriques paysagères est pertinente pour révéler des tendances qui permettent de mieux comprendre à une échelle fine leur variabilité dans un environnement urbain très perturbé. Cependant, elle ne renseigne pas sur le volume des eaux qui stagnent, ni même d'apprécier la durée de stagnation des flaques d'eau, mais présente le mérite d'être aisément reproductible pour le guidage et l'élaboration de plans locaux de gestion des surfaces inondées dans les villes surtout africaines. La cartographie au sol des eaux stagnantes est très contraignante et chronophage. Les outils libres de la communauté Open Street Map couplé à l'usage d'un drone pourraient grandement faciliter l'acquisition des données de terrain en les automatisant sur de plus grandes surfaces. L'étude de mesures spatialisées des eaux stagnantes à fine échelle est une première en Afrique et ouvre la voie à de nombreuses possibilités.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELSATTAR A. & HASSAN A. N. 2021. Assessment of malaria resurgence vulnerability in Fayoum, Egypt Using Remote Sensing and GIS. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 24 : 77-84.
- ADEGNIKA F. M. 2004. La gestion des déchets solides ménagers en milieu urbain d'Afrique sous la double contrainte de service public et d'efficacité économique : Cas de Cotonou. Mémoire de D.E.A., EDP/FLASH/UAC, Abomey-Calavi, Bénin. 50 p.
- ADHIKARI P. & DE BEURS K. M. 2017. Growth in urban extent and allometric analysis of West African cities. *Journal of Land Use Science* 12 : 105-124.
- AMOUSSOU E., CAMBERLIN P., TOTIN V. S. H. & PÉRARD J. 2011. Événements hydroclimatiques et risque d'inondation au sud-ouest du Bénin : 39-44. *In* : Beltrando M. F. G. (eds.). 24^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Association Internationale de Climatologie, Rovereto, Italy.
- ATTOUMANE A., SILAI R., BACAR A., CARDINALE E., PENNOBER G. & HERBRETEAU V. 2020. Changing Patterns of Malaria in Grande Comore after a Drastic Decline: Importance of Fine-Scale Spatial Analysis to Inform Future Control Actions. *Remote Sensing* 12 : 4082.
- AZUMA K., IKEDA K., KAGI N., YANAGI U., HASEGAWA K. & OSAWA H. 2014. Effects of water-damaged homes after flooding: health status of the residents and the environmental risk factors. *International Journal of Environmental Health Research* 24 : 158-175.
- BAUZA V., MADADI V., OCHARO R., NGUYEN T. H. & GUEST J. S. 2020. Enteric pathogens from water, hands, surface, soil, drainage ditch, and stream exposure points in a low-income neighborhood of Nairobi, Kenya. *Science of The Total Environment* 709 : 135344.
- BECKER D. J., STREICKER D. G. & ALTIZER S. 2015. Linking anthropogenic resources to wildlife-pathogen dynamics: a review and meta-analysis. *Ecol. Lett.* 18 : 483-495.
- BIAN H., GAO J., WU J., SUN X. & DU Y. 2021. Hierarchical analysis of landscape urbanization and its impacts on regional sustainability: A case study of the Yangtze River Economic Belt of China. *J. Clean Prod.* 279 : 123267.
- BOUKARI M. 1998. Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources. Thèse de Doctorat ès- Science. Université C. A. Diop de Dakar, Sénégal.
- CAMARA A., GUILAVOGUI T., KEITA K., DIIOBATE M., BARRY Y., CAMARA D., LOUA Z., KABA I., BAH I., HABA M.-P., KOIVOGUI Z., CONDE M., FOFANA A., LOUA É., CAMARA S., SARR A., IRISH S. R. & PLUCINSKI M. M. 2018. Rapid Epidemiological and Entomological Survey for Validation of Reported Indicators and Characterization of Local Malaria Transmission in Guinea, 2017. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 99 : 1134-1144.

- CAPO A. 2008. Urbanisation et risques naturels : Cas de la ville de Cotonou en République du Bénin. Contribution à la prévention et à la gestion des risques naturels en milieu urbanisé. Diplôme d'Ingénieur, Ecole Supérieure des Géomètres et topographes, LEMANS. 58 p.
- CASANOVAS-MASSANA A., COSTA F., RIEDIGER I. N., CUNHA M., DE OLIVEIRA D., MOTA D. C., SOUSA E., QUERINO V. A., NERY N., REIS M. G., WUNDER E. A., DIGGLE P. J. & KO A. I. 2018. Spatial and temporal dynamics of pathogenic *Leptospira* in surface waters from the urban slum environment. *Water Research* 130 : 176-184.
- CONFINS 2020. Africapolis, une nouvelle géographie urbaine de l'Afrique. *Confins*, 46. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia. Disponible en ligne : <http://journals.openedition.org/confins/31552>. Consulté le 18 mars 2021.
- CURTIS A., QUINN M., OBENAUER J. & RENK B. M. 2017. Supporting local health decision making with spatial video: Dengue, Chikungunya and Zika risks in a data poor, informal community in Nicaragua. *Applied Geography* 87 : 197-206.
- DANSOU B. 2006. Croissance démographique et logements à Cotonou. D.E.S.S., Université d'Abomey-Calavi, Benin. 80 p.
- DANVIDE T. B. 2015. Gouvernance des politiques de planification urbaine et gestion des inondations à Cotonou, Bénin. Thèse unique de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi et Université Paris 8. 262 p.
- DE OLIVEIRA D., AIRAM QUERINO V., SARA LEE Y., CUNHA M., NERY JR N., WESSELS PERELO L., ROSSI ALVA J. C., KO A. I., REIS M. G., CASANOVAS-MASSANA A. & COSTA F. 2020. Relationship between Physicochemical Characteristics and Pathogenic *Leptospira* in Urban Slum Waters. *Tropical Med.* 5 : 146.
- DE OLIVEIRA LEMOS L., OSCAR JUNIOR A. C. & DE ASSIS MENDONÇA F. 2021. Urban climate maps as a public health tool for urban planning: The case of dengue fever in Rio De Janeiro, Brazil. *Urban Climate* 35 : 100749.
- DOBIGNY G., GARBA M., TATARD C., LOISEAU A., GALAN M., KADAOURE I., ROSSI J.-P., PICARDEAU M. & BERTHERAT E. 2015. Urban Market Gardening and Rodent-Borne Pathogenic *Leptospira* in Arid Zones: A Case Study in Niamey, Niger. *PLoS Negl Trop Dis* 9 : e0004097.
- DOBIGNY G., GAUTHIER P., HOUEMENO G., CHOPLIN A., DOSSOU H.-J., BADOU S., ETOUGBETCHE J., BOURHY P., KOFFI S., DURSKE K., BERTHERAT E. & PICARDEAU M. 2018. Leptospirosis and Extensive Urbanization in West Africa: A Neglected and Underestimated Threat? *Urban Science* 2 : 29.
- DOBIGNY G., GAUTHIER P., HOUEMENO G., DOSSOU H.J., BADOU S., ETOUGBETCHE J., TATARD C. & TRUC P. 2019. Spatio-temporal survey of small mammal-borne *Trypanosoma lewisi* in Cotonou, Benin, and the potential risk of human infection. *Infection, Genetics and Evolution* 75 : 103967.
- DOSSOU-YOVO C. A. & BOKO M. 2017 : Désensabler pour survivre : les « sablonniers » de rue ou l'émergence d'un nouveau filon de l'économie de la débrouille dans l'agglomération de Cotonou, Bénin. *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement* 2 : 215-226.
- DOUGLAS I. 2018. The challenge of urban poverty for the use of green infrastructure on floodplains and wetlands to reduce flood impacts in intertropical Africa. *Landscape and Urban Planning* 180 : 262-272.
- DUPECHEZ L., CARVALHO P., HEBERT V., MARSOLLIER L., EVEILLARD M., MARION E. & KEMPF M. 2019. Senegal, a new potential endemic country for Buruli ulcer? *International Journal of Infectious Diseases* 89 : 128-130.
- FORERO-ORTIZ E., MARTINEZ-GOMARIZ E. & CAÑAS PORCUNA M. 2020. A review of flood impact assessment approaches for underground infrastructures in urban areas: a focus on transport systems. *Hydrological Sciences Journal* 65 : 1943-1955.
- FOUSSENI T. R. 2016. Les inégalités écologiques à l'aune du Choléra : étude dans la ville de Cotonou au Bénin. Thèse unique de Doctorat, Ecole Doctorale Sciences Humaines et Sociales-Perspectives Européennes. 477 p.
- GEBRE S. L., TEMAM N. & REGASSA A. 2020. Spatial analysis and mapping of malaria risk areas using multi-criteria decision making in Didessa District, South West Ethiopia. *Cogent Environmental Science* 6 : 1860451.
- GOVERNEMENT DE LA REPUBLIQUE DU BENIN 2011. Inondation au Bénin, rapport d'évaluation des besoins post catastrophe avec l'appui de la Banque Mondiale et le Système des Nations Unies. 84 p.

- GWITIRA I., MUKONOWESHURO M., MAPAKO G., SHEKEDE M. D., CHIRENDA J. & MBERIKUNASHE J. 2020. Spatial and spatio-temporal analysis of malaria cases in Zimbabwe. *Infect Dis Poverty* 9 : 146.
- HESELBARTH M. H. K., SCIAINI M., WITH K. A., WIEGAND K. & NOWOSAD J. 2019. Landscapemetrics (ver. 0) : an open source R tool to calculate landscape metrics. *Ecography* 42 : 1648-1657.
- HOUÉMÈNOU G. 2013. Les petits mammifères de la ville de Cotonou (Bénin), pourraient-ils constituer un risque pour la santé humaine ? Etude de quelques agents pathogènes. Faculté des Sciences. Département de Biologie, Ecologie et Evolution. Thèse unique de Doctorat, Université de Liège. 110 p.
- HOUÉMÈNOU G., GAUTHIER P., ETOUGBETCHE J., BADOU S., DOSSOU H.-J., AGOSSOU D., PICARDEAU M. & DOBIGNY G. 2019a. Pathogenic *Leptospira* in Commensal Small Mammals from the Extensively Urbanized Coastal Benin. *Urban Science* 3 : 99.
- HOUÉMÈNOU H., GAUTHIER P., HOUÉMÈNOU G., MAMA D., ALASSANE A., SOCOHOU A., DOSSOU H.-J., BADOU S., PICARDEAU M., TWEED S., LEBLANC M. & DOBIGNY G. 2021. Pathogenic *Leptospira* and water quality in African cities: A case study of Cotonou, Benin. *Science of The Total Environment* 774 : 145541.
- HOUÉMÈNOU H., TWEED S., DOBIGNY G., MAMA D., ALASSANE A., SILMER R., BABIC M., RUY S., CHAIGNEAU A., GAUTHIER P., SOCOHOU A., DOSSOU H.-J., BADOU S. & LEBLANC M. 2019b. Degradation of groundwater quality in expanding cities in West Africa. A case study of the unregulated shallow aquifer in Cotonou. *Journal of Hydrology* 582 : 124438.
- HOUNG BÉDJI G. M. & FRENETTE, J. 2011. L'ulcère de Buruli: Au-delà de la nécrose cutanée, répercussions sur le tissu musculaire. *Med Sci* 27 : 187-192.
- HOUNTONDI B., CODO F. P., DAHOUNTO S. V. H. & GBAGUIDI T. B. 2019. Gestion des inondations en milieu urbain. Cas de la ville de Cotonou au Bénin. *Larhyss Journal* 39 : 333-347.
- I.N.S.A.E. (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique). Statistiques-demographique. Disponible en ligne : <https://insae.bj/statistiques/statistiques-demographiques>. Consulté le 5 août 2021.
- KIBRET S., WILSON G. G., RYDER D., TEKIE H. & PETROS B. 2017. Malaria impact of large dams at different eco-epidemiological settings in Ethiopia. *Trop Med Health* 45: 4.
- LEAL S. D. V., FERNANDES VARELA I. B., LOPES GONÇALVES A. A., SOUSA MONTEIRO D. D., RAMOS DE SOUSA C. M., LIMA MENDONÇA M. DA L., DE PINA A. J., ALVES M. J. & OSÓRIO H. C. 2020. Abundance and Updated Distribution of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) in Cabo Verde Archipelago: A Neglected Threat to Public Health. *IJERPH* 17 : 1291.
- LEI Y., DAVIES G. M., JIN H., TIAN G. & KIM G. 2021. Scale-dependent effects of urban greenspace on particulate matter air pollution. *Urban Forestry & Urban Greening* 61 : 127089.
- LI T., ZHENG W., ZHOU Z., ZHANG S., XU X., PU Y. & LI H. 2021. Soil phosphorus variation regulated by changes in land use spatial patterns during urbanization in western Chengdu, China. *Global Ecology and Conservation* 27 : e01576.
- LONDE L. DE R., DA CONCEIÇÃO R. S., BERNARDES T. & DIAS M. C. DE A. 2016. Flood-related leptospirosis outbreaks in Brazil: perspectives for a joint monitoring by health services and disaster monitoring centers. *Nat Hazards* 84 : 1419-1435.
- MAIRIE DE COTONOU 2008. Plan de Développement Communal de Cotonou, 224 p.
- MARTI R., LI Z., CATRY T., ROUX E., MANGEAS M., HANDSCHUMACHER P., GAUDART J., TRAN A., DEMAGISTRI L., FAURE J.-F., CARVAJAL J. J., DRUMOND B., XU L., HERBRETEAU V., GURGEL H., DESSAY N. & GONG P. 2020. A Mapping Review on Urban Landscape Factors of Dengue Retrieved from Earth Observation Data, GIS Techniques, and Survey Questionnaires. *Remote Sensing* 12 : 932.
- MENSCH BUFFON E. A. & MENDONÇA F. DE A. 2019. Risco socioambiental à leptospirose humana no Aglomerado Urbano Metropolitano de Curitiba, Paraná-Brasil: uma proposta metodológica apoiada em SIG. *Atelie Geogr.* 13 : 44-61.
- MOLBERT N., ANGELIER F., ALLIOT F., RIBOUT C. & GOUTTE A. 2021. Fish from urban rivers and with high pollutant levels have shorter telomeres. *Biol. Lett.* 17 : 20200819.
- MORAGA A. D., MARTIN A. E., FAHRIG L. 2019. The scale of effect of landscape context varies with the species' response variable measured. *Landscape Ecol* 34 : 703-715.

- NGUYEN H., HUYNH T., PATHIRANA A. & VAN DER STEEN P. 2017. Microbial Risk Assessment of Tidal-Induced Urban Flooding in Can Tho City (Mekong Delta, Vietnam). *IJERPH* 14 : 1485.
- NOWAK DA COSTA J., CALKA B. & BIELECKA E. 2021. Urban Population Flood Impact Applied to a Warsaw Scenario. *Resources* 10 : 62.
- ONU-HABITAT 2010. L'état des villes africaines 2010 : Gouvernance, inégalités et marchés fonciers urbains. 279 p.
- ONU-HABITAT 2018. L'état des villes africaines 2018 : La géographie de l'investissement africain. 324 p.
- ONU-WUP (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division) 2018. World Urbanization Prospects : The 2018 Revision, Online Edition. Available from <https://population.un.org/wup/Publications/>. Accessed on 26 June 2019.
- PCUG3C (Projet de Protection de la Communauté Urbaine du Grand Cotonou face aux Changements Climatiques) 2012. Facteurs humains, vulnérabilité des populations et stratégies de lutte et de gestion. Rapport final, Abomey-Calavi, Benin. vol. 2012. Disponible en ligne: <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/handle/10625/50607>. Consulté le 21 avril 2021.
- PENG S. & LI S. 2021. Scale relationship between landscape pattern and water quality in different pollution source areas: A case study of the Fuxian Lake watershed, China. *Ecological Indicators* 121 : 107136.
- R CORE TEAM 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RAJAPAKSE S., WEERATUNGA P. N., BALAJI K., RAMCHANDANI K. C., DE SILVA U. S., RANASINGHE S. A., GUNARATHNE D., WIJERATHNE P. P. B., FERNANDO N., HANDUNNETTI S. M. & FERNANDO S. D. 2020. Seroprevalence of leptospirosis in an endemic mixed urban and semi-urban setting-A community-based study in the district of Colombo, Sri Lanka. *PLoS Negl Trop Dis* 14 : e0008309.
- ROSSI J.-P. & DOBIGNY G. 2019. Urban Landscape Structure of a Fast-Growing African City: The Case of Niamey (Niger). *Urban Science* 3 : 63.
- RUI Y., FU D., DO MINH H., RADHAKRISHNAN M., ZEVENBERGEN C. & PATHIRANA A. 2018. Urban Surface Water Quality, Flood Water Quality and Human Health Impacts in Chinese Cities. What Do We Know? *Water* 10 : 240.
- SAHA A., HAYEN A., ALI M., ROSEWELL A., MACINTYRE C. R., CLEMENS J. D., QADRI F. 2018. Socioeconomic drivers of vaccine uptake: An analysis of the data of a geographically defined cluster randomized cholera vaccine trial in Bangladesh. *Vaccine* 36 : 4742-4749.
- SAULNIER D., HANSON C., IR P., MÖLSTED ALVESSON H. & VON SCHREEB J. 2018. The Effect of Seasonal Floods on Health: Analysis of Six Years of National Health Data and Flood Maps. *IJERPH* 15, 665.
- SERTEL E., ALGAN I., TOPALOĞLU R. & ŞALLI B. 2018. Comparison of Landscape Metrics for Three Different Level Land Cover/Land Use Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7 : 408.
- SIMWANDA M., RANAGALAGE M., ESTOQUE R. C. & MURAYAMA Y. 2019. Spatial Analysis of Surface Urban Heat Islands in Four Rapidly Growing African Cities. *Remote Sensing* 11 : 1645.
- SOTINDJO S. D. 2009. Cotonou, explosion d'une capitale économique (1945-1985). L'Harmattan, Paris.
- SUN L., CHEN J., LI Q. & HUANG D. 2020. Dramatic uneven urbanization of large cities throughout the world in recent decades. *Nat Commun* 11 : 5366.
- THANVISITHPON N. 2019. Impact of land use transformation and anti-flood infrastructure on flooding in world heritage site and peri-urban area: A case study of Thailand's Ayutthaya province. *Journal of Environmental Management* 247 : 518-524.
- TURNER M. G., GARDNER R. H. & O'NEILL R. V. 2001. Landscape ecology in theory and practice: pattern and process. Springer, New York.
- VERCRUYSSSE K., DAWSON D. A., GLENIS V., BERTSCH R., WRIGHT N. & KILSBY C. 2019. Developing spatial prioritization criteria for integrated urban flood management based on a source-to-impact flood analysis. *Journal of Hydrology* 578 : 124038.
- VOLKOFF B. & WILLAIME P. 1976. Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200.000 : Feuille de Porto-Novo, ORSTOM, Paris.

WIMBERLY M. C., DAVIS J. K., EVANS M. V., HESS A., NEWBERRY P. M., SOLANO-ASAMOAH N. & MURDOCK C. C. 2020. Land cover affects microclimate and temperature suitability for arbovirus transmission in an urban landscape. PLoS Negl Trop Dis 14 : e0008614.

YABI I. & AFOUDA F., 2012. Extreme rainfall years in Benin (West Africa). Quat. Int. 262 : 39-43.