



# Construction de la topologie de drainage à fine résolution spatiale en milieu urbain : exemple de l'agglomération de Dakar (Sénégal)

Laurent Pascal Diémé, Christophe Bouvier, Ansoumana Bodian & Alpha Sidibé

**To cite this article:** Laurent Pascal Diémé, Christophe Bouvier, Ansoumana Bodian & Alpha Sidibé (2022) Construction de la topologie de drainage à fine résolution spatiale en milieu urbain : exemple de l'agglomération de Dakar (Sénégal), LHB, 108:1, 2061313, DOI: [10.1080/27678490.2022.2061313](https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2061313)

**To link to this article:** <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2061313>



© 2022 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 01 Jun 2022.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 1337



View related articles [↗](#)

# Construction de la topologie de drainage à fine résolution spatiale en milieu urbain : exemple de l'agglomération de Dakar (Sénégal)

Laurent Pascal Diémé <sup>a</sup>, Christophe Bouvier <sup>b</sup>, Ansoumana Bodian <sup>a</sup> et Alpha Sidibé<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire Leïdi "Dynamique des Territoires et Développement", Université Gaston Berger (UGB), Saint Louis, Sénégal ; <sup>b</sup>HSM, Univ Montpellier, CNRS, IRD, Montpellier, France ; <sup>c</sup>DPI "Direction de la Prévention et de la Gestion des Inondations au Sénégal", MEA, Sénégal

## RÉSUMÉ

Ces dernières décennies, les villes africaines sont confrontées à des séries d'inondations en lien avec l'urbanisation rapide, l'intensification des fortes pluies et la défaillance du réseau de drainage pluvial. La prévision de ces inondations constitue un enjeu majeur, et passe par la cartographie précise et lisible des écoulements de surface. Cette étude, menée dans la périphérie urbaine de l'agglomération de Dakar, vise à proposer une méthode de calcul permettant de localiser les débordements du réseau de drainage à l'échelle de l'agglomération, avec des temps de calcul compatibles avec la prévision en temps réel. Après avoir décrit brièvement la méthode, l'article s'attache à montrer comment intégrer les différents objets urbains modifiant les directions de drainage ou les caractéristiques des écoulements (bâti, collecteurs, bassins de retenue) et restituer la topologie du drainage à une échelle fine (5 m). La méthode, basée sur un MNT, est décrite en présentant les algorithmes utilisés ou développés, illustrés par des exemples. Ces algorithmes sont opérationnels dans le logiciel ATHYS et son module Vicair. Cet article sera complété ultérieurement par la description de la modélisation hydrologique et hydraulique associée à cette topologie.

## MOTS-CLÉS

Hydrologie urbaine ; inondations ; topologie de drainage ; MNT ; ATHYS ; Dakar

## KEYWORDS

Urban hydrology; Flooding; drainage topology; DTM; ATHYS; Dakar

## Construction of the drainage topology at fine spatial resolution in an urban environment: example of the Dakar agglomeration (Senegal)

### ABSTRACT

In recent decades, African cities have been exposed to a series of floods related to rapid urbanisation, intensification of heavy rainfall and failure of the storm drainage systems. Predicting these floods is a major challenge, and requires accurate and legible mapping of surface runoff. This study, carried out in the urban periphery of Dakar, aims to propose a calculation method for locating the overflows of the drainage network on the scale of the conurbation, with calculation times compatible with real time. After briefly describing the method, the article shows how to integrate the various urban objects modifying the drainage directions or the flow characteristics (buildings, collectors, retention basins), and to restore the drainage topology at a fine scale (5 m). The method is described by presenting the algorithms used or developed, illustrated by examples. These algorithms are operational in the ATHYS software and its Vicair module. This article will be completed later by a description of the hydrological and hydraulic modelling associated with this topology.

## 1. Introduction

En Afrique de l'ouest, la plupart des grandes villes telles que Ouagadougou (Tazen et al., 2018), Accra (Ojelowo & Adebayo, 2021), Nouakchott (Ozer, 2014), Douala (Yengoh et al., 2017), Lagos (Barau & Wada, 2021) ou encore Dakar (Smiley et al., 2019) subissent, de façon quasi annuelle, des séries d'inondations dont certaines particulièrement désastreuses avec des impacts prolongés dans le temps, au-delà de la saison pluvieuse (Di Baldassarre et al., 2010). Elles affectent l'économie, les populations et créent des problèmes de santé publique (De Magny et al., 2012 ; Satterthwaite et al., 2019 ; Tingsanchali, 2012). Le

facteur déclenchant est la reprise progressive ces dernières décennies des précipitations avec de fortes intensités parfois concentrées sur de courtes périodes (Bani & Et Yonkeu, 2016 ; Bichet & Diedhiou, 2018 ; Nkrumah et al., 2019 ; Panthou et al., 2014 ; Vischel et al., 2019). Cependant, les précipitations ne sont qu'un fil dans une toile complexe de facteurs aggravants. D'autres facteurs imbriqués amplifient le niveau de gravité des inondations et sont la conséquence directe de l'aménagement et de l'occupation de l'espace urbain (Azzam & Ali, 2019 ; Cheikh et al., 2007 ; Israel, 2017 ; Ozer, 2014 ; Ramiamanana & Teller, 2021 ; Salami et al., 2017). Il s'agit notamment de l'étalement urbain rapide marqué par des modes non encadrés

**CONTACT** Laurent Pascal Diémé  [dieme.laurent-pascal-malang@ugb.edu.sn](mailto:dieme.laurent-pascal-malang@ugb.edu.sn)  Laboratoire Leïdi "Dynamique des Territoires et Développement", Université Gaston Berger (UGB), Saint Louis, Sénégal

d'occupation des sols, de l'occupation des points bas, de la configuration géomorphologique du terrain avec des dépressions, de l'absence ou de la déficience des ouvrages adéquats d'évacuation des eaux de ruissellement et aussi de certains comportements des populations (Desbordes, 1994 ; Dodman et al., 2017 ; Ojolowo & Adebayo, 2021 ; Wade et al., 2009 ; Zehra et al., 2019). Englobant 7 617 agglomérations de plus de 10,000 habitants en 2015, identifiés par Africapolis, l'Afrique s'urbanise à un rythme particulièrement soutenu et d'ici 2050 elle devrait connaître le taux de croissance urbaine le plus rapide au monde (Jaglin et al., 2018 ; OCDE/CSAO, 2020). Avec l'augmentation annoncée des précipitations intenses en lien avec le changement climatique (Dosio et al., 2020 ; Klutse et al., 2021 ; Panthou et al., 2018 ; Sylla et al., 2016 ; Taylor et al., 2017), les inondations constitueront une menace majeure pour les villes africaines, en raison de leurs faibles capacités à y faire face (Bull-Kamanga et al., 2003 ; Cheikh et al., 2007 ; Ozer, 2014 ; Salami et al., 2017 ; Schaer et al., 2017). Cela pénalise les efforts mis en œuvre pour le développement socio-économique et la gestion du risque dans ces villes qui constituent le noyau de la dynamique économique de la région (Fehri & Zahar, 2016 ; Lumbroso, 2020 ; Moulds et al., 2021 ; Satterthwaite, 2017).

En réponse à la récurrence des inondations, un intérêt croissant est accordé à leur caractérisation et à la réduction de leurs impacts (Coulibaly et al., 2020). A cet égard, plusieurs approches existent dans la littérature pour déterminer les zones susceptibles d'être inondées par ruissellement. Elles vont des méthodes strictement basées sur l'analyse de l'information topographique pour localiser les zones de concentration des eaux (Pons et al., 2010 ; Zheng et al., 2018), aux méthodes introduisant la modélisation hydrologique (Landemaine, 2016), hydraulique 1D (Pons et al., 2014) ou 2D (Pons et al., 2021) en passant par celles basées sur la combinaison de scores de production et d'accumulation pour définir le niveau de gravité du ruissellement (Dehotin et al., 2015). Des exemples de ces différentes méthodes sont successivement, les méthodes ExZeco (Pons et al., 2010) et GeoFlood (Zheng et al., 2018), Watersed (Landemaine, 2016), Cartino1D (Pons et al., 2014 ; Le Bihan et al., 2017) ou Cartino2D (Pons et al., 2021) et IRIP (Dehotin et al., 2015 ; Lagadec, 2017). Ces méthodes sont largement appliquées en France et peuvent opérer sur de grandes surfaces. Ce sont cependant des méthodes relativement limitées, et pas toujours adaptées à l'urbain. La méthode Exzeco par exemple se limite exclusivement à l'analyse de la topographie, et assimile les écoulements aux surfaces drainées, sans modélisation hydrologique ou hydraulique associée. Le modèle hydrologique distribué Watersed permet une prédiction, en tout point d'un bassin versant, des ruissellements (diffus et concentrés) pour un évènement de

pluie donné (Landemaine, 2020). Cependant elle n'intègre pas la propagation des eaux dans les ouvrages hydrauliques. La méthode Cartino1D montre des faiblesses pour bien fonctionner en zone urbaine ou à morphologies complexes (Pons et al., 2020). En ce qui concerne les résultats de modélisation avec Cartino2D, ils peuvent être mis en défaut par l'absence de fond de lit mineur, mais également par du micro-mobilier urbain difficilement intégrable dans des chaînes automatiques (Pons et al., 2021).

Un des rares aspects abordés dans les travaux est l'étude du comportement hydraulique des différents aménagements urbains (blocs bâti, murets, etc.) dans la propagation du ruissellement de surface. En effet, une certaine disposition de blocs bâti ainsi que d'autres aménagements urbains suffisent à dévier et à ne pas transmettre le flux du ruissellement dans la direction correspondante entraînant des changements dans les processus hydrologiques de surface (Nigussie & Altunkaynak, 2019). Les études disponibles qui abordent cette thématique ont porté sur la détermination des échanges multidirectionnels de flux hydrauliques existant entre la voirie et le bâti à l'échelle du quartier (Hingray et al., 2000) et aussi sur la mise en place d'un modèle d'inondation permettant de cartographier les vitesses et la distribution des directions de ruissellement au sein des carrefours des rues (Bouvier & Hingray, 2001 ; Lhomme et al., 2006). De récents travaux (Bouvier et al., 2018, 2017 ; Diémé et al., 2020) ont montré la possibilité de construire une topologie de drainage permettant de restituer, de manière assez précise (typiquement 10 m), les directions d'écoulements naturelles et modifiées par le bâti et les canaux à l'échelle d'une agglomération.

La présente étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux, en intégrant en plus du bâti et des canaux, la structure complexe de drainage canal-bassin de rétention au sein de la périphérie urbaine de l'agglomération de Dakar. L'objectif est de proposer une méthode capable de reconstituer les directions de drainage modifiées à l'échelle fine de mailles de 5 m, le long des trajectoires naturelles et modifiées du terrain. A Dakar, l'existence des données sur ces objets urbains qui impactent la propagation du ruissellement permet de définir les règles de traitement et la prise en compte de chaque couche d'information. Des algorithmes originaux ont été développés pour intégrer ces ouvrages et reconstituer les directions de drainage induites.

Dans les sections qui suivent, nous allons d'abord présenter la zone d'étude puis les principes généraux de la méthode permettant de localiser les points de débordement du réseau, et passerons à la description des données de base. Nous détaillerons ensuite la méthodologie adoptée pour l'intégration des objets urbains dans la construction de la topologie de drainage et les résultats obtenus avec cette méthode. Enfin,

une discussion sur la méthode et une conclusion mettant en exergue les perspectives du travail sont présentées dans les deux dernières sections.

## 2. Zone d'étude

L'agglomération de Dakar est située dans la presqu'île du Cap-Vert et concentre près du quart de la population totale du Sénégal cela sur seulement 0,3% du territoire national (ANSD, 2013). Ainsi, environ 50% de la population urbaine du pays vit au sein de l'agglomération de Dakar. Le processus d'urbanisation de la ville, entamée en 1857 (Seck, 1961) s'est accéléré après l'indépendance. Il a largement été alimentée par l'importante migration des ruraux (Goldsmith et al., 2004 ; Lessault & Imbert, 2013 ; Vernière, 1973) lors de la période de sécheresse des années 1970 (Bodian, 2014 ; L. Diop et al., 2016 ; L'Hôte et al., 2002 ; Lebel & Ali, 2009 ; Sircoulon & Et Olivry, 1986). De près de 900,000 habitants en 1976, la population de Dakar est passée à plus de 3 millions en 2013 (ANSD, 2013). La densité de la population est estimée à plus de 4000 habitants au km<sup>2</sup> contre une moyenne nationale de 69 habitants par km<sup>2</sup>. Elle est plus forte dans la banlieue et les nouvelles zones d'extension de la ville vers l'est (Aimée et al., 2018). Du fait des mouvements de ruraux et de la dynamique démographique interne, la

pression sur le foncier et la demande en logements se sont accentuées et ont favorisé un étalement urbain rapide (Diop, 2019 ; Sané, 2013). L'urbanisation s'illustre aujourd'hui par l'occupation dense de l'espace (Figure 1) à travers des pratiques de remblaiement et d'auto-occupation, sans tenir compte des documents de planification et de la topographie du terrain (Ndiaye, 2015 ; Sène et al., 2018 ; Wade et al., 2009).

Le besoin de trouver un local pousse et amène le front de l'urbanisation jusque dans les dépressions humides (les Niayes) dont les plaines inondables se sont asséchées durant la sécheresse (Badiane & Mbaye, 2018 ; A. Diop et al., 2017). Le retour progressif des précipitations (Figure 2) noté dans plusieurs travaux (Bodian, 2014 ; Bodian et al., 2020 ; Nouaceur, 2020) occasionne dans l'agglomération une succession d'inondations catastrophiques entre 2005 et 2020 avec des épisodes marquants tels que le 26 août 2009, le 14 août 2012 et le 5 septembre 2020 (Diongue, 2014 ; Smiley et al., 2019 ; Sy, 2019).

Même si la tendance globale est à la hausse ces dernières années, les quantités de pluies reçues restent toujours inférieures à celles de la période humide des années 50 et 60 (Bodian et al., 2020). Cependant, en raison de l'extension urbaine rapide et de la défaillance des ouvrages de drainage, un même épisode pluvieux, qui passait jadis inaperçu et sans dégâts, provoque maintenant des

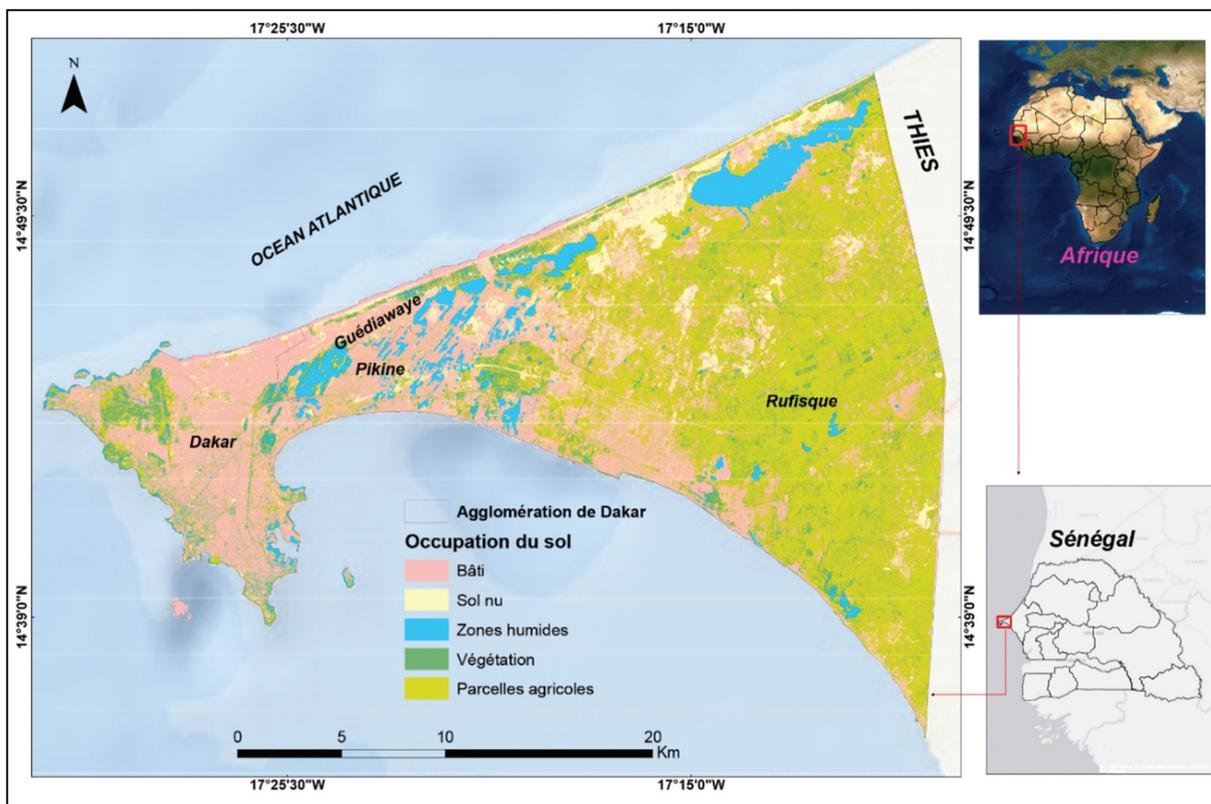
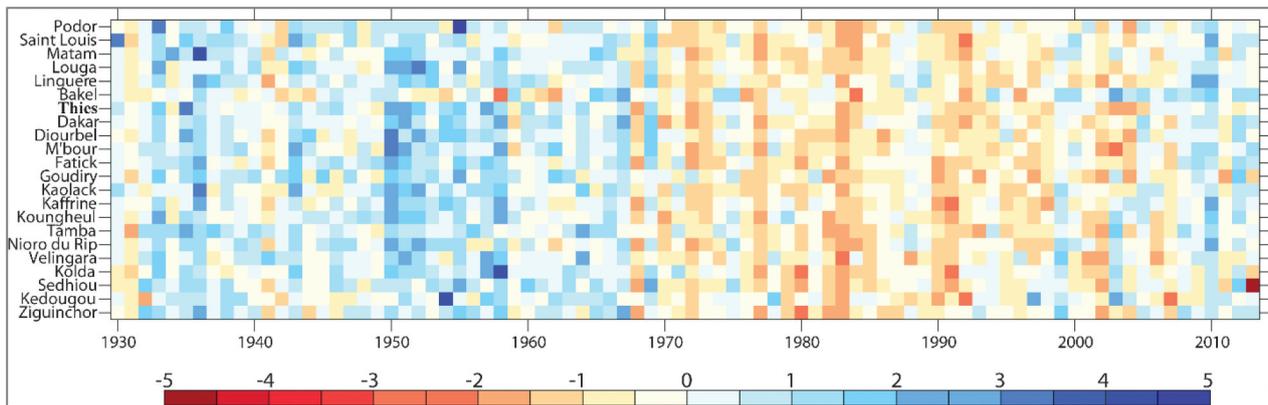


Figure 1. Localisation de l'agglomération urbaine de Dakar.



**Figure 2.** Variation temporelle des indices de pluie standardisée de quelques stations du Sénégal sur la période 1930–2013.

situations d'inondations (Cissé Faye et al., 2004 ; GRS, 2010). Par ailleurs, l'urbanisation dense de l'espace a provoqué une modification du sens de l'écoulement naturel des eaux et de la continuité hydrographique entre les cuvettes (Ndao, 2012). Les voies d'écoulement s'éloignent désormais des formes géomorphologiques originelles et déplacent la vulnérabilité vers d'autres zones qui étaient moins exposées. A Dakar, les inondations constituent une préoccupation majeure comme en témoignent les différentes actions visant à minimiser leurs impacts négatifs et à renforcer la résilience au moyen de politiques de réduction du risque (Bottazzi et al., 2018 ; Cissé & Mendy, 2018 ; Schaer et al., 2017 ; Sy et al., 2016).

### 3. Contexte de modélisation

La méthode proposée a pour objectif la cartographie des points de débordement du réseau de drainage pluvial et s'articule autour des étapes suivantes :

- Elaboration d'une topologie de drainage basée sur un MNT et tenant compte des objets urbains (bâti, canaux, bassins de stockage). Cette partie constitue l'objet central de cet article.
- Construction d'une partition de l'espace entre bassins versants élémentaires et réseau de drainage. Les bassins font l'objet d'une modélisation SCS-Lag and Route, et la propagation en réseau est assurée par le modèle de l'onde cinématique. Cette différenciation relativement courante (Bos et al., 1980 ; Pla et al., 2019) permet de réduire le temps de calcul (plus courts sur les bassins) et de garder une approche physique sur le réseau de drainage, objet d'intérêt majeur.
- Localisation et simulation du fonctionnement des ouvrages de stockage sur une maille unique, représentant l'exutoire du bassin de retenue. Le fonctionnement des bassins de rétention est régi par une loi volume stocké-hauteur-débit de vidange, propre à chaque réservoir.

- Détection des points de débordement du réseau par soustraction des débits simulés à la capacité des ouvrages, et des débordements des retenues par soustraction du volume stocké simulé à la capacité de la retenue. La capacité d'évacuation des collecteurs est calculée par la formule de Manning-Strickler, en considérant les caractéristiques des collecteurs et la pente du terrain (issue du MNT après lissage).
- Visualisation des risques de débordement du réseau et des retenues par différents codes de couleur : la Figure 3 donne une illustration du débordement des collecteurs sur une partie de Dakar.

L'ensemble de ces traitements peuvent être réalisés en combinant les outils de SIG standards (e.g. ArcGIS, QGIS, ...) et la plateforme de modélisation ATHYS (<http://www.athys-soft.org/index.php>). On trouvera plus de détails sur la méthode dans une étude semblable réalisée à Ouagadougou (Bouvier et al., 2017).

## 4. Données

La zone d'étude est une zone de test couvrant les communes de Pikine et de Guédiawaye (Figure 4), pour laquelle les données étaient les plus complètes. Quatre types de données sont utilisés dans cette étude. Il s'agit : (i) du MNT, (ii) de l'emplacement des bâtiments ou des obstacles urbains, (iii) des collecteurs de drainage enterrés et de surface et (iv) des bassins de rétention des eaux pluviales combinés avec les dépressions naturelles.

### 4.1. Le MNT

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) donne une représentation numérique de la distribution spatiale des altitudes du relief sur une grille régulière (Tsai & Chin-Ting Lin, 2019). Dans cette grille, chaque pixel ou cellule renferme une information altimétrique.



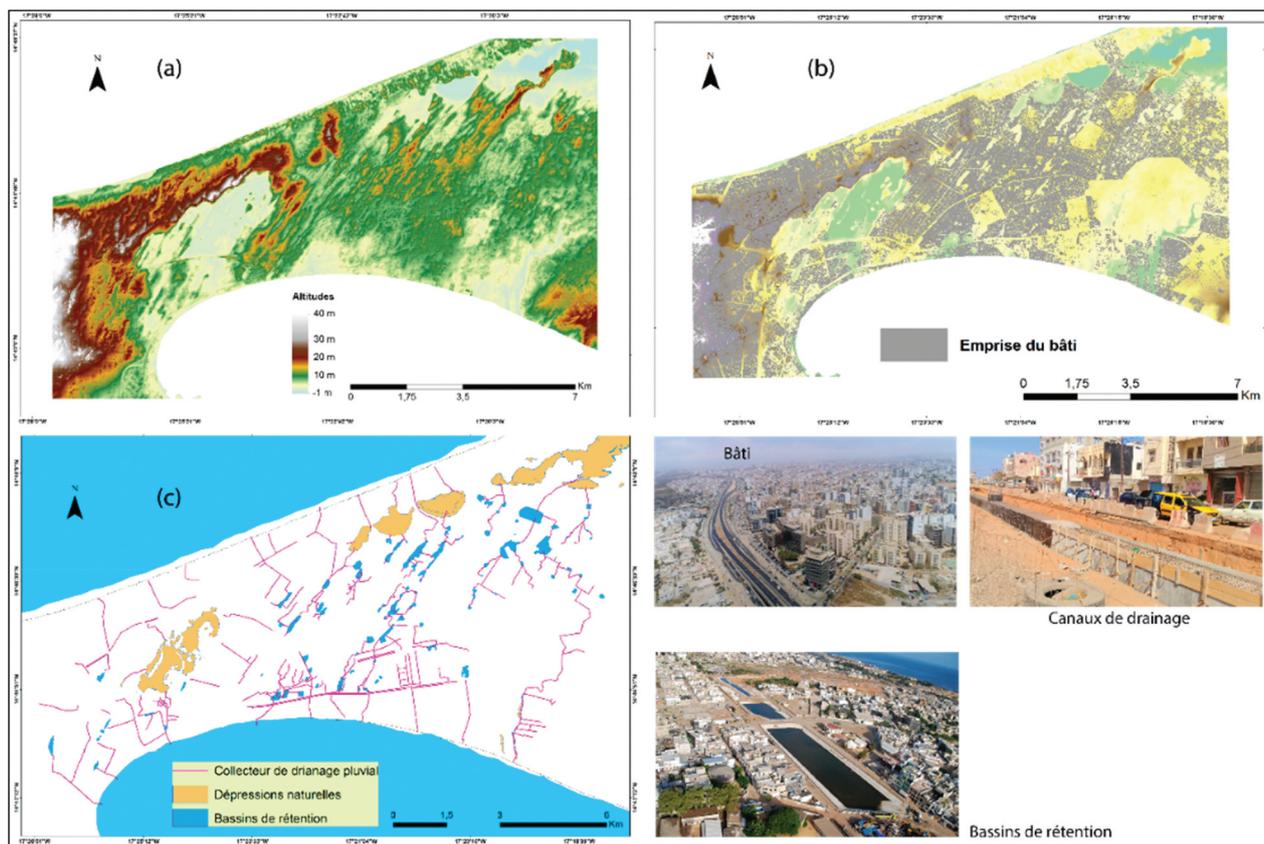
**Figure 3.** Représentation en codes couleurs des points de débordement du réseau de drainage par niveau d'importance : Vert = pas de débordement; Jaune – Orange et Rouge = débordement avec différents seuils.

L'ensemble de ces informations est nécessaire pour la détermination des directions d'écoulement ainsi que des couches dérivées : réseau hydrographique, limite bassins, etc. (McMaster, 2002). Plus précise est la résolution du MNT, meilleurs seront les résultats des traitements (Azizian & Shokoochi, 2014 ; Charrier & Li, 2012). Nous disposons pour cette étude d'un MNT à une résolution spatiale de 10 m reprojeté à une résolution fixée à 5 m afin d'avoir une description précise des chemins d'écoulement (Figure 4a). Il nous a été fourni par la DPGI (Direction de la Prévention et de la Gestion des Inondations). Ce MNT a été réalisé par l'IGN en 2010, par restitution photogrammétrique, dans le cadre du projet de mise en place d'un système d'information géographique appliqué aux zones inondées et inondables de la périphérie de Dakar.

#### 4.2. Le bâti

La couche donnant l'emplacement des zones bâti est acquise auprès de la DTGC (Direction des Travaux Géographiques et de la Cartographie) au format vectoriel. La base de données a été constituée par numérisation en 2012 et on y distingue plusieurs types de couches (bâtiments quelconques, bâtiments publics, bâtiments industriels, bâtiments en construction) que

nous avons fusionnés pour en former une seule. Son étendue spatiale ne couvre pas la totalité de l'emprise actuelle de l'urbanisation à Dakar, mais les données sont disponibles pour la zone test (Figure 4b). Pour son intégration dans la construction de la topologie de drainage, le fichier des îlots doit être converti au format raster à une résolution identique à celui du MNT (5 m). Plusieurs logiciels SIG (ArcGIS, QGIS, etc.) permettent de réaliser cette opération. La couche du bâti de Dakar est fournie avec un niveau de détails à l'échelle du bâtiment, et nous avons opté pour une représentation à l'échelle des îlots urbains, délimités généralement par les voiries. Cette représentation, plus grossière, permet cependant de prendre en compte les murs d'enceintes qui ne figurent pas à l'échelle des bâtiments, ce qui s'avère plus réaliste en termes d'obstacle à l'écoulement. Un outil de géotraitement qui reproduit l'emprise géométrique minimale des contours des polygones du bâti a été utilisé (Minimum Bounding Geometry sous ArcGIS 10.3 ou enveloppe convexe sous Qgis). L'algorithme crée des enveloppes minimales convexes des différents polygones ou classes de polygones définis par un champ identifiant. En l'absence de données sur l'emplacement des blocs urbains, il est possible de les créer en partant du principe qu'en ville, les blocs urbains sont quadrillés par un réseau de rues. Il s'agira de disposer du tracé



**Figure 4.** Représentation des objets urbains utilisés dans la construction de la topologie de drainage : (a) le MNT, (b) le bâti, et (c) les collecteurs reliés aux bassins de rétention.

des rues (disponible sur OpenStreetMap) et du contour global de la zone d'étude. On peut alors par des manipulations, avec un logiciel SIG, dilater le tracé des rues de quelques mètres (selon la largeur des rues) puis extraire les polygones qui se trouvent au sein de ce quadrillage. Et par une superposition de ces polygones avec une imagerie satellitaire (Google Earth) on procède visuellement au réajustement des contours des îlots bâtis.

### 4.3. Les collecteurs

Une partie du plan du réseau de drainage des eaux pluviales provient de la base de données urbaines de Dakar collectée dans les services de la DTGC (Direction des Travaux Géographiques et de la Cartographie). Elle a ensuite été complétée par numérisation des différents rapports APS (Avant-Projet Sommaire) et APD (Avant-Projet Détaillé) du PROGEP (Projet de gestion des eaux pluviales et d'adaptation au changement climatique) de 2012–2020 (ADM 2012, 2014). Les tronçons de collecteurs utilisés, au total 316, sont soit à ciel ouvert soit enterrés. Ils assurent le drainage gravitaire des eaux de ruissellement vers des bassins de rétention puis vers l'océan qui constitue parfois l'exutoire final (Figure 4c). Pour être intégrée dans la construction de la topologie (Section 5.3), la couche du

réseau de canalisation doit être convertie en raster. Les mailles le long de chaque tronçon disposent d'un codage numérique unique et identique permettant de les identifier et de déterminer les directions de drainage.

### 4.4. Les bassins de rétention

Dans la périphérie de Dakar, un ensemble de bassins de rétention a été construit lors de la mise en œuvre du PROGEP en vue d'aider à la résorption des volumes d'eaux produits lors des précipitations et d'atténuer les risques d'inondation. Ces bassins sont interconnectés aux collecteurs avec qui ils forment un réseau gravitaire collecteurs-bassins (Figure 4c). Pour les bassins aménagés, des canaux prédisposés servent à les vidanger. À côté des bassins artificiels construits, il y a les dépressions naturelles et closes (les Niayes) qui recueillent naturellement les eaux de ruissellement et servent également de déversoir des canaux de drainage pluvial. Par leur emplacement, les bassins sont susceptibles de modifier à la fois les directions de drainage et le transfert des écoulements. La couche géographique donnant leur localisation a été collectée à la DTGC. Elle a ensuite été complétée en digitalisant les plans produit dans les APS et APD du PROGEP. Sa prise en compte dans la chaîne de traitement nécessite de le rasteriser à 5 m en attribuant un

code numérique à chaque bassin. Ce qui permet de les traiter individuellement et de déterminer les directions drainage.

## 5. Méthodologie

La construction de la topologie de drainage est la base de la modélisation qui sera appliquée ultérieurement pour calculer les écoulements et les points de débordement/saturation des ouvrages de drainage pluvial (Bouvier et al., 2017). Dans cette modélisation, les trajectoires des écoulements sont déterminées par les directions de drainage des mailles du MNT, qui doivent être connexes, c'est-à-dire qu'on doit corriger systématiquement les mailles sans direction de drainage (cas des dépressions artificielles ou naturelles, bassins de stockage ou plans d'eau par exemple), pour ne pas interrompre les trajectoires.

Les directions d'écoulement seront déterminées pour chaque maille d'un MNT à une résolution spatiale de 5 m, et feront l'objet des étapes suivantes :

### 5.1. Intégration du bâti dans le MNT et extraction du modèle de drainage

Le MNT initial est modifié pour intégrer les obstacles à l'écoulement. La méthode consiste à surélever les mailles correspondant à ces obstacles dans le MNT, ce qui aura pour effet d'empêcher les éventuels écoulements en provenance des mailles voisines de traverser ces obstacles. Cette opération est disponible dans la plupart des SIG, ainsi que dans le module Vicair d'ATHYS.

A l'aide du MNT modifié, on extrait un premier modèle de drainage intégrant la présence des obstacles (ici les îlots du bâti). La direction est choisie selon l'altitude de la maille voisine la plus faible (Jenson & Domingue, 1988).

A ce niveau, le calcul des directions de drainage peut générer des anomalies, en particulier des fausses dépressions (Jenson & Domingue, 1988 ; Planchon & Darboux, 2002 ; Wang & Liu, 2006) qui doivent nécessairement être éliminées, par des algorithmes généralement disponibles dans les SIG : *fill sinks*, etc. On obtient finalement à l'issue de cette étape un modèle de drainage connexe, forcé par les obstacles à l'écoulement.

La reconstitution des directions d'écoulements modifiées par l'emplacement du bâti est représentée à la Figure 5. On utilise ici les blocs urbains délimités par les rues, mais toute autre représentation du bâti est possible. Le résultat montre qu'entre les interstices des blocs bâtis, les flux d'écoulement opèrent une déviation à chaque rencontre d'un bloc bâti, en suivant le sens de la pente.

### 5.2. Modification des directions de drainage en fonction des canaux

Le modèle de drainage construit précédemment est utilisé pour ensuite intégrer les axes drainants, et forcer éventuellement les directions en fonction de ces axes.

L'algorithme développé à cet effet dans le module Vicair de la plateforme ATHYS nécessite de disposer du plan rastérisé des axes drainants, du modèle de drainage constitué à l'étape 5.1 et du MNT initial, avant intégration du bâti. Le codage du plan des canaux est réalisé par tronçons (1 à N).

L'algorithme identifie les mailles appartenant à chaque tronçon, marque ensuite pour chaque tronçon l'altitude (lue dans le MNT) des extrémités amont et aval puis oriente les directions de drainage le long du tronçon de l'extrémité la plus élevée à l'extrémité la plus basse. Cependant, cet algorithme est susceptible de générer plusieurs erreurs :

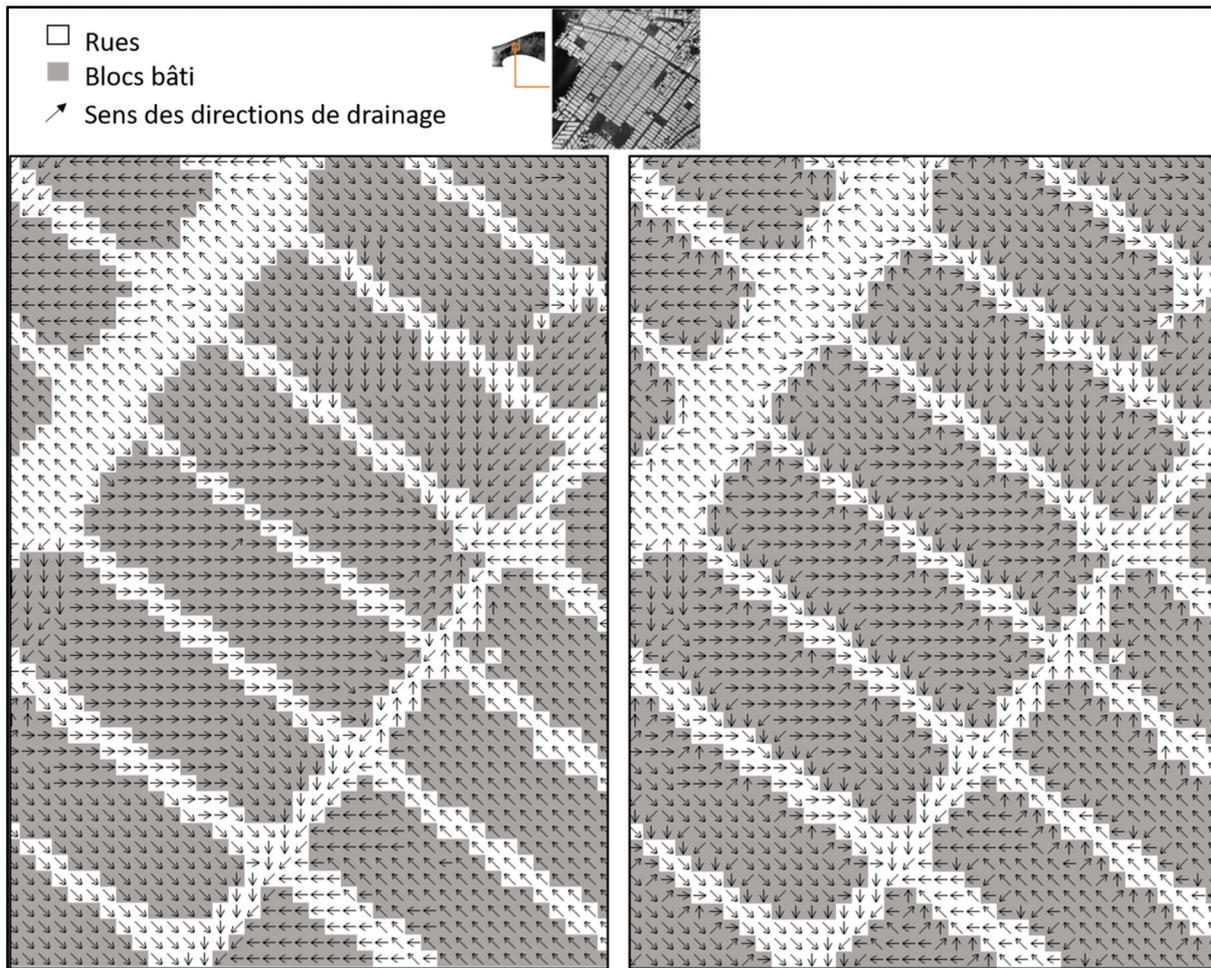
- des sens d'écoulement inversés, dues à des erreurs dans le MNT ou dans la localisation des tronçons, ou au fait que certains collecteurs sont enterrés et que leurs cotes ne peuvent être fournies par le MNT;
- des conflits de direction d'écoulement au niveau des extrémités aval, se raccordant mal aux autres tronçons.

Pour corriger ces défauts, relatifs au sens d'écoulement et aux raccordements des tronçons, on introduit un fichier, dit table attributaire (Tableau 1) qui permet de facilement modifier le sens d'écoulement dans les collecteurs enterrés comme de surface. L'introduction de nouvelles altitudes dans la table permet de rectifier les sens d'écoulement des tronçons. Pour cette étude, les cotes des collecteurs enterrés sont extraites des différents rapports APS et APD du PROGEP.

On obtient à l'issue de cette étape un modèle de drainage forcé par les obstacles à l'écoulement et par les axes drainants. Les résultats du forçage des directions de drainage modifiées pour prendre en compte à la fois les blocs urbains et les collecteurs sont cartographiés à la Figure 6.

### 5.3. Intégration des bassins de stockage ou des dépressions naturelles

Les directions de drainage précédemment forcées d'abord en fonction du bâti puis en fonction des collecteurs sont ensuite complétées pour intégrer les bassins de rétention. Dans la construction de la topologie, les bassins doivent être associés à une maille unique, qui fait office d'exutoire, c'est-à-dire qui donne la direction vers laquelle va se déverser l'eau qui excède la capacité du réservoir. A ceci, s'ajoute que les exutoires des réservoirs sont le plus souvent des canaux d'évacuation, et que les uns et les autres sont plus ou



**Figure 5.** Vue partielle des directions de drainage naturelles (à gauche) et forcées en fonction des blocs bâti (à droite). Les flèches (en noir) indiquent la trajectoire des écoulements à chaque 5 m. Dans le modèle de drainage produit, les directions de drainage ne sont pas modifiées au sein (ou à l'intérieur) des mailles des îlots urbains.

**Tableau 1.** Table attributaire des collecteurs (les champs sont séparés par des espaces).

Codes tronçons	Coordonnées extrémité amont		Cote amont	Coordonnées extrémité aval		Cote aval
1	244,532	1,634,810	-10	244,951	1,635,200	-10
2	245,393	1,635,110	4.3	245,372	1,635,160	3.5
3	245,677	1,636,290	3	245,348	1,637,230	2.5
4	245,123	1,634,570	-10	245,052	1,634,550	-10
5	245,250	1,634,690	-10	245,195	1,634,350	-10
6	244,070	1,634,260	1.8	244,066	1,634,260	2.5
7	245,217	1,635,180	5.1	244,951	1,635,200	4.4
8	245,250	1,634,690	-10	245,342	1,634,900	-10
9	245,143	1,634,620	-10	245,094	1,634,470	-10
10	240,053	1,630,600	2.3	240,059	1,631,560	2.5

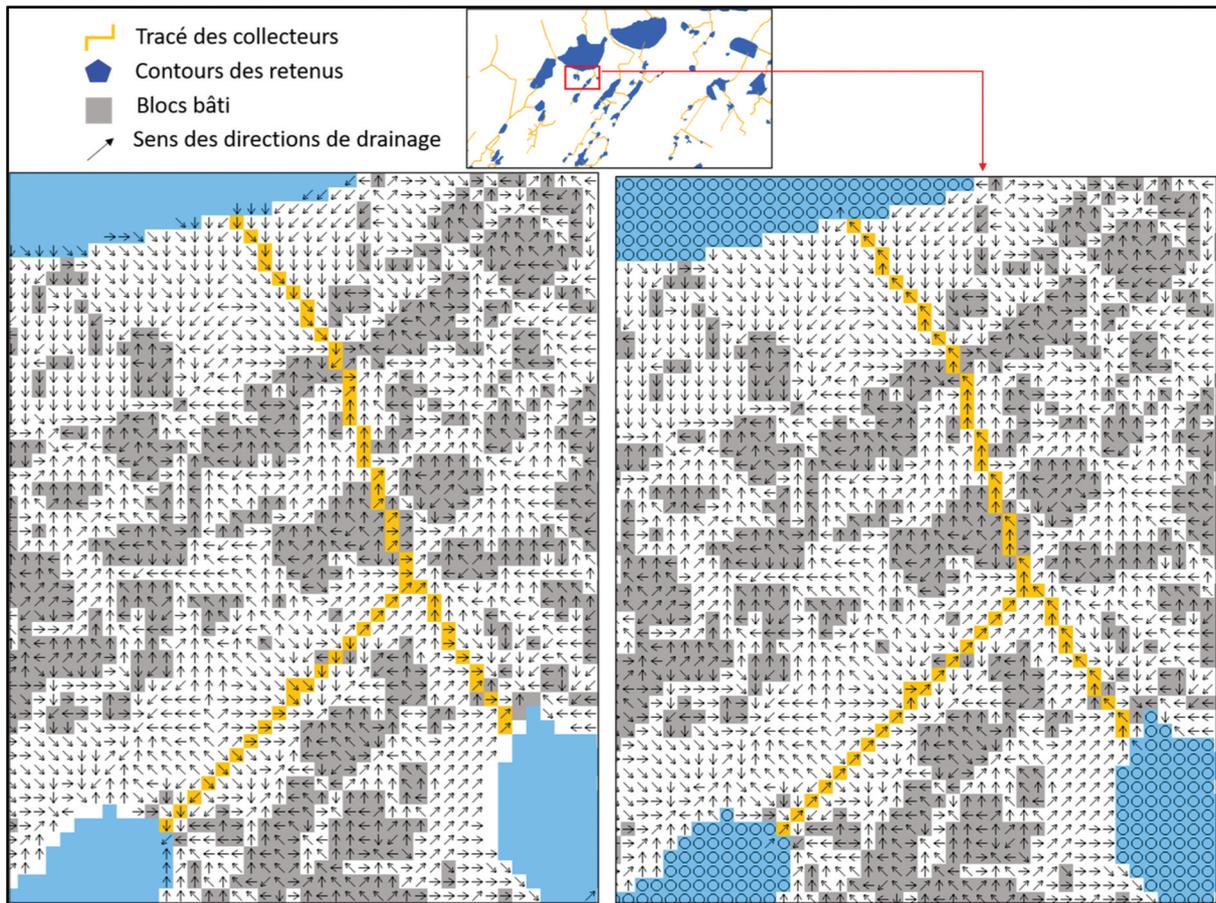
moins intriqués, indépendamment de la topographie naturelle. En d'autres termes, la localisation des exutoires des bassins doit tenir compte de la localisation des canaux.

L'algorithme développé dans le module Vicair de la plate-forme ATHYS requiert le plan rastérisé des bassins de stockage, des plans d'eau et des dépressions naturelles, le plan rastérisé des canaux et le modèle de drainage construit précédemment. Pour cette opération, les bassins doivent avoir des codes distincts. L'algorithme

identifie les mailles appartenant à chaque bassin, et identifie leur exutoire en recherchant une maille canal drainant le bassin dans le voisinage du bassin. Une fois l'exutoire du bassin localisé, toutes les mailles du bassin sont orientées vers cet exutoire. Lorsqu'un bassin ne possède pas de canal de drainage dans son pourtour, ce bassin n'est pas traité par l'algorithme, et doit être traité manuellement, au cas par cas, en utilisant la fonction de correction interactive des directions de drainage de Vicair. Une correction automatique par recherche du col le plus proche est actuellement en développement. L'intégration dans le modèle du système de drainage gravitaire canaux-bassins est cartographié à la Figure 7.

## 6. Discussion

La méthodologie présentée permet d'aboutir à un résultat qui intègre les directions de drainage modifiées à la fois par la présence de bâtiments, de collecteurs et de bassins de rétention. Le modèle de drainage construit permet d'extraire plusieurs informations géographiques qui peuvent servir aux analyses hydrologiques. Cette méthode s'adapte bien au contexte urbain africain du fait de sa



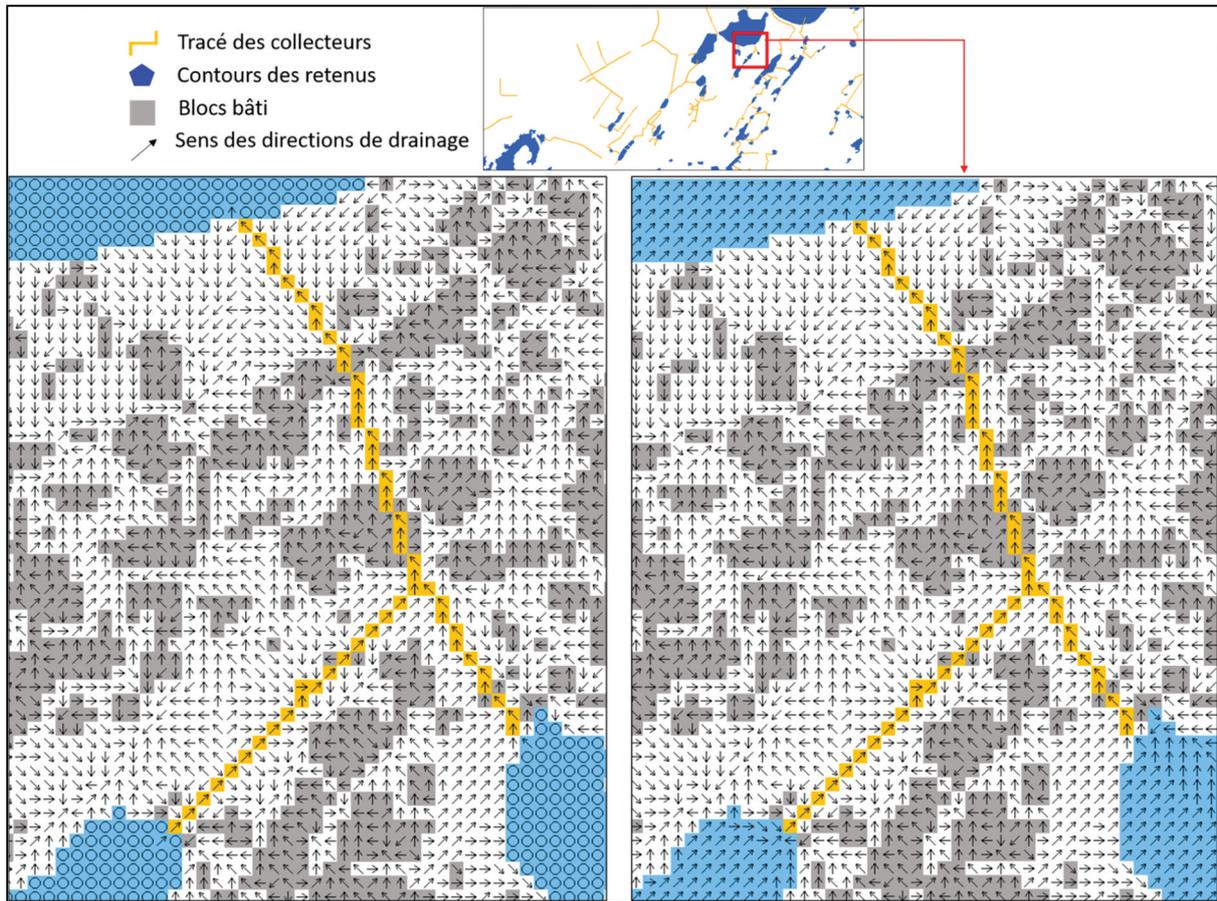
**Figure 6.** Directions de drainage naturelles (à gauche) et forcées à la fois en fonction du bâti et des collecteurs (à droite).

souplesse, son implémentation relativement facile et du fait également que les données qu'elle nécessite peuvent être de précision moyenne. On parvient par exemple à des résultats satisfaisants à l'aide d'un MNT à 10 m, voire un MNT de type SRTM, compte tenu des actions de forçage des directions de drainage, qui réduisent les incertitudes liées au MNT (Bouvier et al., 2018). Dans certaines villes, les données sont disponibles sous forme de SIG bien documenté, c'est le cas à Dakar. Dans des cas moins favorables il reste possible d'accéder aux données spatiales à l'aide d'outils modernes : (cas de OpenStreet-Map pour le bâti et même les collecteurs).

Le modèle de drainage sert de base à la reconstitution du réseau hydrographique et des limites des bassins, et plus généralement de l'ensemble des trajectoires de l'écoulement. Les modifications des directions de drainage causées à la fois par les blocs urbains, les collecteurs et les bassins de rétentions reconfigurent les limites des bassins versants et cela est illustré à la Figure 8. Cette figure compare les limites de bassins pour un même exutoire, avant et après forçage des directions de drainage. On voit que les limites ont été fortement modifiées par les aménagements urbains et ce résultat illustre l'intérêt de forcer au préalable la topologie de drainage avant d'appliquer une modélisation hydrologique/hydraulique.

Comme toute modélisation, la méthode présente quelques limitations. En effet elle opère sur une structure de drainage à mailles carrées régulières (5 m) basée sur le MNT. Ce qui oblige à rasteriser l'ensemble des couches à intégrer (bâti, collecteurs, bassins de rétention) altérant ainsi la précision qu'apporte le format vectoriel.

Le raster a l'inconvénient de ne pas conserver exactement les contours des objets (lignes, polygones). Cela peut être particulièrement critique dans les cas où la taille de la maille (ici 5 m) est plus grande que l'élément d'intérêt. Pour l'intégration du bâti dans la topologie par exemple, cela peut entraîner des erreurs d'estimation des directions de drainage, surtout au sein des rues étroites (de largeur inférieure à 5 m) situées dans certaines zones non loties et où l'urbanisation est anarchique. Ces rues étroites peuvent ainsi être recouvertes et confondues avec les mailles du bâti, ce qui impacte le cheminement de l'eau étant donné que la méthode considère les blocs comme tous étanches. Malgré cette dégradation de l'information liée à la rasterisation, la représentation raster offre un support de discrétisation spatiale pour la modélisation hydrologique avec la facilité de gérer la topologie des écoulements (Sarrazin, 2012).



**Figure 7.** Bassins non traités (à gauche) et bassins traités montrant la connectivité des écoulements canaux-bassins (à droite) : Jonction de deux bassins reliés par deux canaux et qui se déversent dans un lac (plus haut).

La question de l'étanchéité des îlots avait motivé les études sur les échanges hydrauliques entre voiries et bâti (Hingray et al., 1999, 2000). La possibilité d'intégrer ces échanges reste une option envisageable, et figure parmi les perspectives de recherche.

Afin de modéliser au mieux le comportement des collecteurs, leur encombrement des collecteurs (ensablement, déchets solides, etc.) peut être pris en compte par une réduction de la section en travers du collecteur, même si l'information sur cet encombrement est difficile à acquérir.

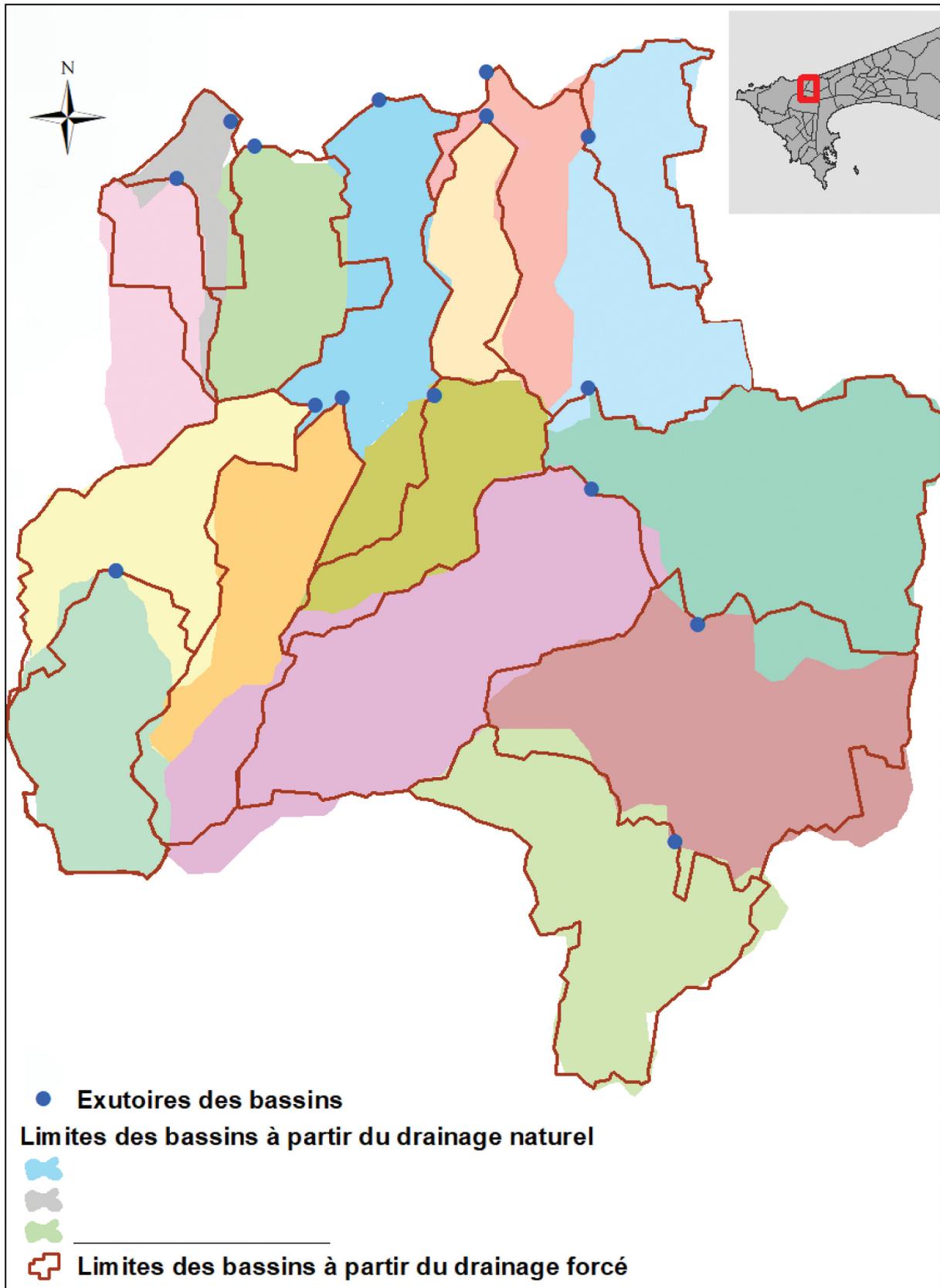
## 7. Conclusions et perspectives

L'hétérogénéité de la géométrie du milieu urbain rend difficile la modélisation des inondations. De ce fait, la mise en place d'un modèle d'inondation nécessite une prise en compte appropriée de ces conditions urbaines. Dans cette étude nous avons présenté une méthodologie permettant de construire la topologie de drainage de Dakar en ayant recours au MNT et aux objets urbains modifiant les directions de drainage et la propagation des écoulements. Le MNT constitue l'information de base. Ce MNT a fait l'objet de modifications préliminaires pour intégrer les obstacles à l'écoulement (l'emplacement des bâtiments). De ce MNT modifié on a extrait un premier modèle

de drainage forcé pour toutes les mailles hors bassins. Ce modèle de drainage construit est ensuite utilisé pour intégrer successivement des collecteurs puis des bassins de rétention. Les problèmes posés par l'intégration des canaux relèvent plutôt des sens d'écoulements, et ceux posés par les réservoirs plutôt de la localisation des exutoires. Des algorithmes ont été développés à cet effet et les résultats des traitements montrent que la construction automatisée permet d'intégrer beaucoup de données essentielles.

D'autres objets urbains (talus, murets, routes, etc.) peuvent également être ajoutés dans la construction du modèle de drainage afin de prendre en compte le plus largement possible l'hétérogénéité du milieu urbain et de restituer la modification des directions de drainage induites. A la fin de la chaîne de traitement, la méthode permet de reconstituer le réseau de drainage modifié par les objets urbains. Ces résultats peuvent être utilisés pour alimenter, en entrée, les modèles d'inondabilité en milieu urbain.

Une des perspectives de ce travail sera de déterminer, au moyen d'un modèle hydrologique distribué combiné avec un modèle hydraulique de propagation en réseau, les débits qui transitent dans le réseau de drainage des eaux pluviales, lors des épisodes pluvieux. Cette combinaison de modèles détermine les débits en



**Figure 8.** Comparaison entre les limites des bassins avant forçage des directions de drainage et après modification des directions de drainage.

tout point du réseau des collecteurs d'eaux pluviales avec des temps de calcul rapides ce qui permet de détecter en temps réel les points de débordements lors des épisodes pluvieux.

### Remerciements

Les auteurs remercient les réviseurs pour leurs commentaires et suggestions qui ont permis d'améliorer la qualité de l'article. Cet article a été réalisé avec l'appui du projet Cycle

de l'Eau et Changement Climatique (CECC) 2021–2025, cofinancé par l'IRD et l'AFD. Les auteurs remercient également les structures techniques qui ont accepté de mettre à disposition les données utilisées dans cet article.

## Déclaration de divulgation

Aucun conflit d'intérêt potentiel n'a été signalé par les auteurs.

## Déclaration de disponibilité des données

Les données utilisées dans cet article sont disponibles auprès du premier auteur, L.P.M. Dieme sur la base d'une demande raisonnable.

## ORCID

Laurent Pascal Diémé  <http://orcid.org/0000-0002-6441-1154>

Christophe Bouvier  <http://orcid.org/0000-0003-3107-6019>

Ansoumana Bodian  <http://orcid.org/0000-0001-7098-1076>

## Références

- ADM (Agence de Développement Municipal). (2012). *Etudes des ouvrages primaires de drainage des eaux pluviales de la région périurbaine de Dakar, phase2 rapport d'avant-projet détaillé* (pp. 76).
- ADM (Agence de Développement Municipal). (2014). *Phase 2 du programme de gestion des eaux pluviales et d'adaptation au changement climatique (progep) : APS sur les bassins versants de Mbeubeuss et Mbaou, rapport* (pp. 194).
- Aimée, D., Sambou, H., Diop, C., Ntiranyibagira, E., Dacosta, H., & Sambou, B. (2018). Dynamique d'occupation du sol des zones humides urbanisées de Dakar (Sénégal) de 1942 à 2014. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 18(1). <https://doi.org/10.4000/vertigo.20120>
- ANSD (2013). Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage (RGPHAE), rapport définitif, 418 p.
- Azizian, A., & Shokoohi, A. (2014). DEM resolution and stream delineation threshold effects on the results of geomorphologic-based rainfall runoff models. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 38 (1), 64–78. <http://dx.doi.org/10.3906/muh-1401-13>
- Azzam, A., & Ali, A. B. (2019). Urban sprawl in Wadi Goss Watershed (Jeddah City/Western Saudi Arabia) and its impact on vulnerability and flood hazards. *Journal of Geographic Information System*, 11(3), 371–388. <https://doi.org/10.4236/jgis.2019.113023>
- Badiane, S. D., & Mbaye, E. (2018). Zones humides urbaines à double visage à Dakar : Opportunité ou menace ? *Revue Science Eaux & Territoires, Article, hors-série*, 5 p., 14/12/2018. <https://doi.org/10.14758/set-revue.2018.hs.08>
- Bani, S. S., & Yonkeu, S. (2016). Risques d'inondation dans la ville de Ouagadougou : Cartographie des zones à risques et mesures de prévention. *Journal Ouest-Africain Des Sciences de Gestion*, 1(1), 1–18.
- Barau, A., & Wada, A. S. (2021). Do-it-yourself flood risk adaptation strategies in the neighborhoods of Kano City, Nigeria. In N. Oguge, D. Ayal, L. Adeleke, & I. da Silva (Eds.), *African handbook of climate change adaptation* (pp. 1353–1380). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45106-6\\_190](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45106-6_190).
- Bichet, A., & Diedhiou, A. (2018). West African Sahel has become wetter during the last 30 years, but dry spells are shorter and more frequent. *Climate Research*, 75(2), 155–162. <https://doi.org/10.3354/cr01515>
- Bihan, G. L., Payrastré, O., Gaume, E., Moncoulon, D., & Pons, F. (2017). The challenge of forecasting impacts of flash floods: Test of a simplified hydraulic approach and validation based on insurance claim data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11), 5911–5928. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5911-2017>
- Bodian, A. (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 8, 297–312. <http://dx.doi.org/10.4000/physio-geo.4243>
- Bodian, A., Diop, L., Panthou, G., Dacosta, H., Deme, A., Dezetter, A., Ndiaye, P. M., Diouf, I., & Vischel, T. (2020). Recent trend in hydroclimatic conditions in the Senegal River Basin. *Water*, 12(2), 436. <https://doi.org/10.3390/w12020436>
- Bos, M., Teillot, J. P., Charton, S., & Paumier, J. P. (1980). Exemples d'utilisation du modèle mathématique HYDROG-LIGNEAU sur les bassins versants urbains et semi-ruraux. *La Houille Blanche*, 66(4–5), 321–332. <https://doi.org/10.1051/lhb/1980031>
- Bottazzi, P., Winkler, M., Boillat, S., Diagne, A., Maman Chabi Sika, M., Kpangon, A., Faye, S., & Speranza, C. (2018). Measuring subjective flood resilience in Suburban Dakar: A before–after evaluation of the “Live with Water” project. *Sustainability*, 10(7), 2135. <https://doi.org/10.3390/su10072135>
- Bouvier, C., Alcoba, M., Cazenave, F., Chahinian, N., Coulibaly, G., Crès, A., Sawadogo, L. (2018, novembre). *Modélisation à fine résolution spatiale des inondations dans une agglomération urbaine, par couplage d'un modèle hydrologique et d'un modèle de transfert en réseau*. SHF, de la prévision des crues à la gestion de crise, Novembre 2018, Avignon, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01926155>
- Bouvier, C., Chahinian, N., Adamovic, M., Cassé, C., Crespy, A., Crès, A., & Alcoba, M. (2017, juin). *Large-scale GIS-based urban flood modelling: A case study on the city of Ouagadougou*. SimHydro 2017, Sophia-Antipolis, France 2017. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01621501>
- Bouvier, C., & Hingray, B. (2001, juin 25–27). Modélisation des flux inondants dans les voiries d'un secteur urbain de Ouagadougou (BF). In *NOVATECH 2001 – Lyon (France)*, 1011–1014. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03643087>
- Bull-Kamanga, L., Diagne, K., Lavell, A., Leon, E., Lerise, F., MacGregor, H., & Yitambe, A. (2003). From everyday hazards to disasters: The accumulation of risk in urban areas. *Environment and Urbanization*, 15(1), 193–204. <https://doi.org/10.1177/095624780301500109>
- Charrier, R., & Li, Y. (2012). Assessing resolution and source effects of digital elevation models on automated floodplain delineation: A case study from the Camp Creek Watershed, Missouri. *Applied Geography*, 34, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.10.012>
- Cheikh, O. S., Ozer, P., & Ozer, A. (2007). Risques d'inondations dans la ville de Nouakchott (Mauritanie). *Geo-Eco-Trop*, 31, 19–42.

- Cissé Faye, S., Faye, S., Wohnlich, S., & Gaye, C. B. (2004). An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Senegal). *Environmental Geology*, 45(3), 312–322. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0887-x>
- Cissé, A., & Mendy, P. (2018). Spatial relationship between floods and poverty: The case of region of Dakar. *Theoretical Economics Letters*, 08(3), 256–281. <https://doi.org/10.4236/tel.2018.83019>
- Coulibaly, G., Leye, B., Tazen, F., Mounirou, L. A., & Karambiri, H. (2020). Urban flood modeling using 2D shallow-water equations in Ouagadougou, Burkina Faso. *Water*, 12(8), 2120. <https://doi.org/10.3390/w12082120>
- De Magny, C. G., Thiaw, W., Kumar, V., Manga, N. M., Diop, B. M., Gueye, L., Kamara, M., Roche, B., Murtugudde, R., Colwell, R. R., & Gravenor, M. B. (2012). Cholera OUTBREAK in Senegal in 2005: Was climate a factor? *PLoS ONE*, 7(8), e44577. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044577>
- Dehotin, J., Chazelle, B., Laverne, G., Hasnaoui, A., Lambert, L., Breil, P., & Braud, I. (2015). Mise en œuvre de la méthode de cartographie du ruissellement IRIP pour l'analyse des risques liés aux écoulements sur l'infrastructure ferroviaire. *La Houille Blanche*, 6(6), 56–64. <https://doi.org/10.1051/lhb/20150069>
- Desbordes, M. (1994). Principales causes d'aggravation du risque d'inondation par ruissellement pluvial en milieu urbanisé. *Journées de L'hydraulique*, 23(2), 487–492.
- Di Baldassarre, G., Montanari, A., Lins, H., Koutsoyiannis, D., Brandimarte, L., & Blöschl, G. (2010). Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters*, 37(22). <https://doi.org/10.1029/2010GL045467>
- Diémé, L. P. M., Bouvier, C., Bodian, A., & Sidibé, A. (2020). Utilisation d'un MNT pour la construction de la topologie de drainage de l'agglomération de Dakar. *Colloque SHF-Risque Ruissellement: Diagnostic et Solutions, Novembre*, 235–245. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03105920>
- Diongue, M. (2014). Périphérie urbaine et risques d'inondation à Dakar (Sénégal) : Le cas de Yeumbeul Nord. *Eso Travaux Et Documents, Résumés Des Travaux*, 37, 45–54.
- Diop, M. S. (2019). *Les capacités adaptatives des communautés de la périphérie de Dakar face aux inondations, thèse de Doctorat*. Université Paris-Saclay.
- Diop, L., Bodian, A., & Diallo, D. (2016). Spatiotemporal trend analysis of the mean annual rainfall in Senegal. *European Scientific Journal, ESJ*, 12(12), 231. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n12p231>
- Diop, A., Ndiaye, M. L., Sambou, H., Dacosta, H., & Sambou, B. (2017). Integrated a GIS and multicriteria evaluation approach for mapping flood vulnerability of buildings in the Grande Niaye Watershed of Dakar, Senegal. *American Journal of Geographic Information System*, 6(2), 41–53.
- Dodman, D., Leck, H., Rusca, M., & Colenbrander, S. (2017). African urbanisation and urbanism: Implications for risk accumulation and reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 26, 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.06.029>
- Dosio, A., Turner, A. G., Tamoffo, A. T., Sylla, M. B., Lennard, C., Jones, R. G., Terray, L., Nikulin, G., & Hewitson, B. (2020). A tale of two futures: Contrasting scenarios of future precipitation for West Africa from an ensemble of regional climate models. *Environmental Research Letters*, 15(6), 064007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7fde>
- Fehri, N., & Zahar, Y. (2016). Étude de l'impact de l'extension et de la densification du tissu urbain sur les coefficients de ruissellement dans le bassin versant des oueds El-Ghrich et El-Greb (Tunis) par l'application de la méthode SCS aux événements de septembre 2003. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 10, 61–79. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.4769>
- Goldsmith, P. D., Gunjal, K., & Ndarishikanye, B. (2004). Rural–urban migration and agricultural productivity: The case of Senegal. *Agricultural Economics*, 31(1), 33–45. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2004.tb00220.x>
- GRS (Gouvernement de la République du Sénégal). (2010). *Rapport d'évaluation des besoins post-catastrophe, inondation urbaine à Dakar 2009, Gouvernement du Sénégal, Banque Mondiale*. Nations Unies, Commission Européenne.
- Hingray, B., Bouvier, C., Desbordes, M., & Cappelare, B. (2000). Inondations urbaines : Un indicateur géométrique caractéristique du comportement hydraulique du bâti. *Revue Des Sciences de L'eau*, 13(1), 85–100. <https://doi.org/10.7202/705383ar>
- Hingray, B., Cappelare, B., Bouvier, C., & Desbordes, M. (1999). Hydraulic vulnerability of elementary urban cell. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(4), 402–410. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:4\(402\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:4(402))
- Israel, A. O. (2017). Nature, the built environment and perennial flooding in Lagos, Nigeria: The 2012 flood as a case study. *Urban Climate*, 21, 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.06.009>
- Jaglin, S., Didier, S., & Dubresson, A. (2018). Métropolisations en Afrique subsaharienne : Au menu ou à la carte ? *Métropoles*, (Hors-série 2018). <https://doi.org/10.4000/metropoles.6065>
- Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1593–1600.
- Klutse, N. A. B., Quagraine, K. A., Nkrumah, F., Quagraine, K. T., Berkoh-Oforiwa, R., Dzrobi, J. F., & Sylla, M. B. (2021). The climatic analysis of summer monsoon extreme precipitation events over West Africa in CMIP6 simulations. *Earth Systems and Environment*, 5(1), 25–41. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00203-y>
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B., & Triboulet, J. P. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), 563–572. <https://doi.org/10.1080/02626660209492960>
- Lagadec, L. R., (2017). *Evaluation et développement de la méthode IRIP de cartographie du ruissellement. Application au contexte ferroviaire* [thèse de doctorat]. Université Grenoble Alpes.
- Landemaine, V. (2016). *Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : Analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle* [thèse de doctorat]. l'Université de Rouen-Normandie.
- Landemaine, V. (2020). Méthode de cartographie de l'aléa inondation par ruissellement : Application du modèle WaterSed sur le bassin versant de la Lézarde (France). In *Actes Colloque Risque ruissellement – Diagnostique et solution*. ANEB, SHF, 235<sup>ème</sup> Session.
- Lebel, T., & Ali, A. (2009). Recent trends in the central and western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology*, 375(1–2), 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.030>
- Lessault, D., & Imbert, C. (2013). Mobilité résidentielle et dynamique récente du peuplement urbain à Dakar (Sénégal). *Cybergeo : European Journal of Geography*, Espace, Société, Territoire, document 662. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26146>

- Lhomme, J., Bouvier, C., Mignot, E., & Paquier, A. (2006). One-dimensional GIS-based model compared with a two-dimensional model in urban floods simulation. *Water Science and Technology*, 54(6-7), 83-91. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.594>
- Lumbroso, D. (2020). Flood risk management in Africa. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12612>
- McMaster, K. J. (2002). Effects of digital elevation model resolution on derived stream network positions. *Water Resources Research*, 38(4), 13-1. <https://doi.org/10.1029/2000WR000150>
- Moulds, S., Buytaert, W., Templeton, M. R., & Kanu, I. (2021). Modeling the impacts of urban flood risk management on social inequality. *Water Resources Research*, 57(6). <https://doi.org/10.1029/2020WR029024>
- Ndao, M. (2012). *Dynamiques et gestion environnementale de 1970 à 2010 des zones humides au Sénégal : étude de l'occupation du sol par télédétection des Niayes avec Djiddah Thiaroye Kao (à Dakar), Mboro (à Thiès) et Saint-Louis* [thèse de Doctorat de Géographie et aménagement]. U l'université de Toulouse.
- Ndiaye, I. (2015). Étalement urbain et différenciation sociospatiale à Dakar (Sénégal). *Cahiers de Géographie du Québec*, 59(166), 47-69. <https://doi.org/10.7202/1034348ar>
- Nigussie, T. A., & Altunkaynak, A. (2019). Modeling the effect of urbanization on flood risk in Ayamama Watershed, Istanbul, Turkey, using the MIKE 21 FM model. *Natural Hazards*, 99(2), 1031-1047. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03794-y>
- Nkrumah, F., Vischel, T., Panthou, G., Klutse, N. A. B., Adukpo, D. C., & Diedhiou, A. (2019). Recent trends in the daily rainfall regime in Southern West Africa. *Atmosphere*, 10(12), 741. <https://doi.org/10.3390/atmos10120741>
- Nouaceur, Z. (2020). La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest sahélienne. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 15, 89-109. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.10966>
- OCDE/CSAO. (2020). Dynamiques de l'urbanisation africaine 2020 : Africapolis, une nouvelle géographie urbaine. Dans *Cahiers de l'Afrique de l'Ouest*. Éditions OCDE. <https://doi.org/10.1787/481c7f49-fr>
- Ojolowo, S. K., & Adebayo, A. (2021). Flooding in lagos metropolis: Urban development and municipal solid waste perspectives. *African Journal for the Psychological Studies of Social Issues*, 24(2), 89-107.
- Ozer, P. (2014). Catastrophes naturelles et aménagement du territoire : De l'intérêt des images Google Earth dans les pays en développement. *Geo-Eco-Trop : Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'écologie Tropicales*, 38(1), 209-220.
- Panthou, G., Lebel, T., Vischel, T., Quantin, G., Sane, Y., Ba, A., Ndiaye, O., Diongue-Niang, A., & Diopkane, M. (2018). Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: The Sahelian case. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac334>
- Panthou, G., Vischel, T., & Lebel, T. (2014). Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 34(15), 3998-4006. <https://doi.org/10.1002/joc.3984>
- Pla, G., Crippa, J., Djerboua, A., Dobricean, O., Dongar, F., Eugene, A., & Raymond, M. (2019). ESPADA : Un outil pour la gestion en temps réel des crues éclaircies urbaines en pleine modernisation. *La Houille Blanche*, 3-4(3-4), 57-66. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019027>
- Planchon, O., & Darboux, F. (2002). A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena*, 46(2-3), 159-176. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00164-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00164-3)
- Pons, F., Alquier, M., Paya, E., Moulin, C., Panier, N., & Chollet, A. E. (2020). Premiers tests de la méthode Cartino2D sur le territoire de Toulon Provence Méditerranée. *Actes Colloque Risque ruissellement – Diagnostique et solution*. ANEB, 235<sup>ème</sup> Session.
- Pons, F., Alquier, M., Paya, E., Moulin, C., Panier, N., & Chollet, A. E. (2021). Premiers tests de la méthode Cartino2D sur le territoire de Toulon Provence Méditerranée. *La Houille Blanche*, 107(1), 1-13. <https://doi.org/10.1080/00186368.2021.1912968>
- Pons, F., Delgado, J. L., Guero, P., & Berthier, E. (2010). ExZeco: A GIS and DEM based method for pre-determination of flood risk related to direct runoff and flash floods. In *9th International Conference on Hydroinformatics, Tianjin, China* (Vol. 25).
- Pons, F., Laroche, C., Fourmigue, P., & Alquier, M. (2014). Cartographie des surfaces inondables extrêmes pour la directive inondation : Cas de la Nartuby. *La Houille Blanche*, 2(2), 34-41. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014014>
- Ramiamanana, F. N., & Teller, J. (2021). Urbanization and floods in Sub-Saharan Africa: Spatiotemporal study and analysis of vulnerability factors – Case of antananarivo agglomeration (Madagascar). *Water*, 13(2), 149. <https://doi.org/10.3390/w13020149>
- Salami, R., Giggins, H., von Meding, J. (2017). Vulnerability of human settlements to flood risk in the core area of Ibadan metropolis, Nigeria. *Jambá: Journal of Disaster Risk Studies*, 9(1), 1-14. <https://doi.org/10.4102/jamba.v9i1.371>
- Sané, Y. (2013). La politique de l'habitat au Sénégal : Une mutation permanente. *Cahiers d'Outre-Mer*, 66(263), 311-334. <https://doi.org/10.4000/com.6913>
- Sarrazin, B. (2012). *MNT et observations multi-locales du réseau de drainage d'un petit bassin versant rural dans une perspective d'aide à la modélisation spatialisée*. IRSTEA Lyon/ISARA/INPG.
- Satterthwaite, D. (2017). The impact of urban development on risk in sub-Saharan Africa's cities with a focus on small and intermediate urban centres. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 26, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.09.025>
- Satterthwaite, D., Sverdlik, A., & Brown, D. (2019). Revealing and responding to multiple health risks in informal settlements in sub-Saharan African cities. *Journal of Urban Health*, 96(1), 112-122. <https://doi.org/10.1007/s11524-018-0264-4>
- Schaer, C., Thiam, M. D., & Nygaard, I. (2017). Flood management in urban Senegal: An actor-oriented perspective on national and transnational adaptation interventions. *Climate and Development*, 10(3), 243-258. <https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1291405>
- Seck, A. (1961). Dakar. *Cahiers D'outre-mer*, 14(56), 372-392. <https://doi.org/10.3406/caoum.1961.2222>
- Sène, A., Sarr, M. A., Kane, A., & Diallo, M. (2018). L'assèchement des lacs littoraux de la grande côte du Sénégal : Mythe ou réalité? Cas des lacs Thiourour, Warouwaye et Wouye de la banlieue de Dakar. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 35(2), 5623-5638.
- Sircoulon, J., & Olivry, J. C. (1986). Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et centrale (considération sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières) : Communication n°6.

- Dans *Compte rendu du colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse*. 1986/May/20-24
- Smiley, H., Blair, S., Beutler, T., Bowers, N. S., Cadet, E., & Cadet, E. (2019). Coping with floods in Pikine, Senegal: An exploration of household impacts and prevention efforts. *Urban Science*, 3(2), 54. <https://doi.org/10.3390/urbansci3020054>
- Sy, B. (2019). *Approche multidisciplinaire de l'évaluation de l'aléa d'inondation à Yeumbeul Nord, Dakar, Sénégal : la contribution de la science citoyenne* [Thèse de doctorat]. Faculté des sciences de l'Université de Genève. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2000\)5:4\(402\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:4(402))
- Sy, B., Frischknecht, C., Dao, H., Giuliani, G., Consuegra, D., Wade, S., & Kêdowidé, C. (2016). Participatory approach for flood risk assessment: The case of Yeumbeul Nord (YN), Dakar, Senegal. *WIT Transactions on the Built Environment*, 165, 331–342.
- Sylla, M. B., Nikiema, P. M., Gibba, P., Kebe, I., & Klutse, N. A. B. (2016). Climate change over West Africa: Recent trends and future projections. In J. Yaro & J. Hesselberg (Eds.), *Adaptation to climate change and variability in rural West Africa*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-31499-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31499-0_3)
- Taylor, C. M., Belušić, D., Guichard, F., Parker, D. J., Vischel, T., Bock, O., Harris, P. P., Janicot, S., Klein, C., & Panthou, G. (2017). Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544(7651), 475–478. <https://doi.org/10.1038/nature22069>
- Tazen, F., Diarra, A., Kabore, R. F., Ibrahim, B., Bologo/Traoré, M., Traoré, K., & Karambiri, H. (2018). Trends in flood events and their relationship to extreme rainfall in an urban area of Sahelian West Africa: The case study of Ouagadougou, Burkina Faso. *Journal of Flood Risk Management*, 12, e12507. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12507>
- Tingsanchali, T. (2012). Urban flood disaster management. *Procedia Engineering*, 32, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1233>
- Tsai, J.D., & Chin-Ting Lin. (2019). Extraction of topographic structure lines from digital elevation model data. *Civil Engineering Research Journal*, 7(2), 555709. <https://doi.org/10.19080/cerj.2019.07.555709>
- Vernière, M. (1973). Pikine, « ville nouvelle » de Dakar. *Espace Géographique*, Tome, 2(2), 107–126. <https://doi.org/10.3406/spgeo.1973.1386>
- Vischel, T., Panthou, G., Peyrillé, P., Roehrig, R., Quantin, G., Lebel, T., & Budiarti, M. (2019). Precipitation extremes in the West African Sahel: Recent evolution and physical mechanisms. In *Tropical extremes* (pp. 95–138). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809248-4.00004-2>
- Wade, S., Faye, S., Dieng, M., Kaba, M., & Kane, N. R., (2009). Télédétection des catastrophes d'inondation urbaine: Le cas de la région de Dakar (Sénégal). Dans *Journées d'Animation Scientifique (JSA09) de l'AUF*, Alger, November 2009, 7p.
- Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), 193–213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>
- Yengoh, G. T., Fogwe, Z. N., & Et Armah, F. A. (2017). Floods in the Douala metropolis, Cameroon: Attribution to changes in rainfall characteristics or planning failures? *Journal of Environmental Planning and Management*, 60(2), 204–230. <https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1149048>
- Zehra, D., Mbatha, S., Campos, L. C., Queface, A., Beleza, A., Cavoli, C., Achuthan, K., & Parikh, P. (2019). Rapid flood risk assessment of informal urban settlements in Maputo, Mozambique: The case of Maxaquene A. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 40, 101270. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101270>
- Zheng, X., Maidment, D. R., Tarboton, D. G., Liu, Y. Y., & Et Passalacqua, P. (2018). GeoFlood: Large-scale flood inundation mapping based on high-resolution terrain analysis. *Water Resources Research*, 54(10), 013–10,033. <https://doi.org/10.1029/2018WR023457>