



HAL
open science

MODELISATION A FINE RESOLUTION SPATIALE DES INONDATIONS DANS UNE AGGLOMERATION URBAINE, PAR COUPLAGE D'UN MODELE HYDROLOGIQUE ET D'UN MODELE DE TRANSFERT EN RESEAU

Christophe Bouvier, Matias Alcoba, Frédéric Cazenave, Nanée Chahinian,
Gnenakantanhan Coulibaly, Agnès Crès, Anne Crespy, Marielle Gosset, Tazen
Fowe, James Miller, et al.

► To cite this version:

Christophe Bouvier, Matias Alcoba, Frédéric Cazenave, Nanée Chahinian, Gnenakantanhan Coulibaly, et al.. MODELISATION A FINE RESOLUTION SPATIALE DES INONDATIONS DANS UNE AGGLOMERATION URBAINE, PAR COUPLAGE D'UN MODELE HYDROLOGIQUE ET D'UN MODELE DE TRANSFERT EN RESEAU. De la prévision des crues à la gestion de crise., Nov 2018, Avignon, France. , 2018. hal-01926155

HAL Id: hal-01926155

<https://hal.science/hal-01926155>

Submitted on 19 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

1 MODELISATION A FINE RESOLUTION SPATIALE DES INONDATIONS 2 DANS UNE AGGLOMERATION URBAINE, PAR COUPLAGE D'UN MODELE 3 HYDROLOGIQUE ET D'UN MODELE DE TRANSFERT EN RESEAU 4 5

6 Christophe BOUVIER¹, Matias ALCOBA², Frédéric CAZENAVE³, Nanée CHAHINIAN¹,
7 Gnenakantanhan COULIBALY⁴, Agnès CRES¹, Anne CRESPIY¹, Tazen FOWE⁴, Marielle
8 GOSSET², James MILLER⁵, Maxime TURKO², Lazare SAWADOGO⁶
9

10 ¹IRD UMR 5569 CNRS-IRD-UM, HSM, France, christophe.bouvier@ird.fr

11 ²IRD UMR 5001 CNRS-IRD-UGA-INP, IGE, France, frederic.cazenave@ird.fr

12 ³IRD UMR 5563 CNRS-IRD-UPS-CNES, France, marielle.gosset@ird.fr

13 ⁴2iE, Ouagadougou, Burkina-Faso, tazen.fowe@2ie-edu.org

14 ⁵CEH, Wallingford, Grande-Bretagne, millj@ceh.ac.uk

15 ⁶ANAM-BF 01 BP 576 Ouagadougou, Burkina Faso
16
17

18 I INTRODUCTION

19 Dans les villes africaines, les risques d'inondations sont importants compte tenu des fortes pluies
20 caractéristiques du climat tropical ou équatorial, et d'un développement urbain rapide, relativement mal
21 maîtrisé. De récents épisodes sont venus le rappeler [Di Baldassarre *et al.*, 2010 ; Nouaceur, 2015 ; Issaka et
22 Badariotti, 2016; Casse *et al.*, 2016 ; Engel *et al.*, 2017 ; Gemenne *et al.*, 2017], et motivent la mise au point
23 d'outils efficaces pour l'estimation des crues, en temps différé ou en temps quasi réel, adaptés au contexte de
24 ces villes. En Afrique de l'Ouest, peu d'outils ont été développés depuis les années 80 [Bouvier et
25 Desbordes, 1990], et les données hydro-météorologiques nécessaires au calage de ces outils restent peu
26 nombreuses. C'est dans ce contexte qu'ont été récemment lancées des études à Ouagadougou, Bamako,
27 Niamey, Yaoundé, ayant pour objectif i) de développer la mesure spatiale de la pluie par atténuation du
28 signal de téléphonie mobile [Doumounia *et al.*, 2014; Gosset *et al.*, 2016 ; Uijlenhoet *et al.*, 2018], et ii) de
29 développer à partir de ces mesures de pluie spatialisées une chaîne de prévision en temps réel basée sur
30 l'application de modèles hydrologiques ou hydrauliques, préalablement calés en fonction des différents
31 paramètres intervenant dans la formation des écoulements en milieu urbain. Ces études ont été réalisées par
32 l'IRD en collaboration avec différents partenaires nationaux (Universités, Directions des Ressources en Eau,
33 Directions Nationales de la Météorologie, Protection Civile), et bailleurs du développement (Banque
34 Mondiale/Global Facility for Disaster reduction and Recovery, GFDRR ; Korean Growth Green Fund,
35 KGGF ; UNF Data For Sustainable Development initiative). Elles sont pilotées par Marielle Gosset (GET) et
36 Frédéric Cazenave (IGE), pour la partie mesure des pluies et pour le développement d'une application temps
37 réel, et par Christophe Bouvier (HSM) pour la partie modélisation pluie-débit. C'est de cette partie qu'il sera
38 principalement question dans cet article, en présentant les modalités de mise en œuvre des modèles dans le
39 logiciel ATHYS www.athys-soft.org, et l'applicatif de prévision en pseudo- temps réel. Le cas d'étude
40 présenté est celui de la ville de Ouagadougou.
41

42 II CONTEXTE ET OBJECTIFS

43 Dans les années 70-80, les enjeux de l'hydrologie urbaine africaine étaient de fournir des outils de calcul
44 pour le dimensionnement des ouvrages de drainage des eaux pluviales, en tenant compte de contextes
45 climatique et urbain spécifiques. La réalisation de campagnes de mesures et d'acquisition de données a
46 permis de réviser des formules synthétiques telles que la formule rationnelle, la formule de Caquot ou de
47 mettre au point des modèles globaux ou semi-distribués. Par la suite, les enjeux ont évolué vers la
48 caractérisation des zones inondables en cas de défaillance des ouvrages de drainage pluvial [Bouvier et
49 Hingray, 2002], sur la base du maillage d'un quartier en éléments réguliers. L'étude présentée ici est une
50 généralisation de cette méthode à l'ensemble de l'agglomération, incluant les zones naturelles drainées par

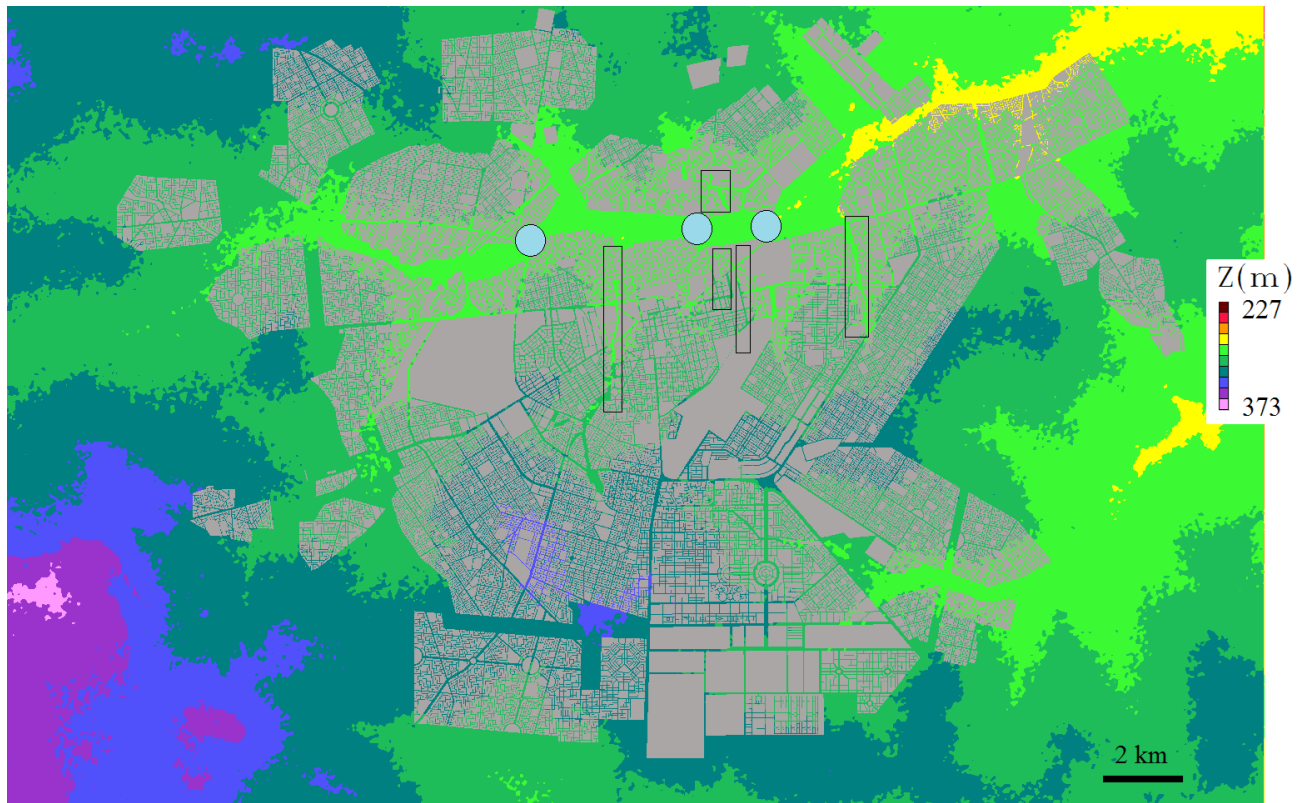
1 l'agglomération. Il s'agit de calculer les débits, hauteurs et vitesses sur de petits éléments (mailles de 10 m
2 de côté) couvrant l'ensemble de l'hydrosystème urbain.

3 Dans une optique de prévision en temps réel, ou simplement opérationnelle, les temps de calcul doivent
4 être courts, au plus de quelques minutes, ce qui exclut l'utilisation de modèles bi-dimensionnels à cette
5 échelle. Les villes africaines sont par ailleurs caractérisées par un accès difficile aux données de base, telles
6 que la localisation et les caractéristiques hydrauliques des ouvrages de drainage, la localisation des objets
7 urbains, ou les caractéristiques fines de la topographie, naturelle ou influencée par les obstacles ou les drains
8 urbains. L'objet de cette recherche est donc de proposer une alternative de modélisation simplifiée, offrant
9 des performances raisonnables, une mise en place rapide et des temps de calcul de quelques minutes,
10 compatibles avec la prévision en temps réel.

12 **III LA ZONE D'ETUDE ET LES DONNEES DISPONIBLES**

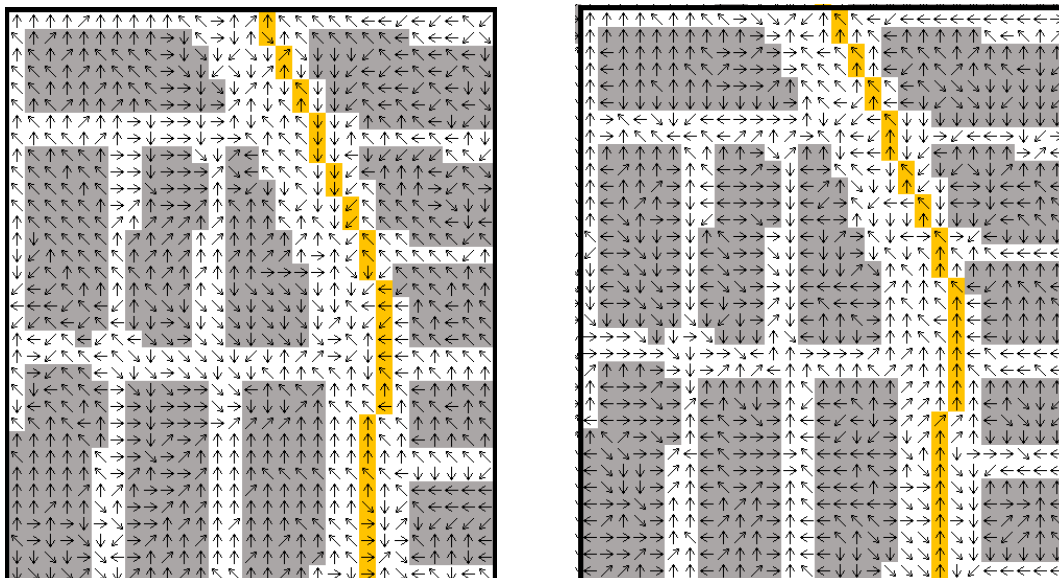
13 Le site pour lequel est présentée la méthode est celui de la ville de Ouagadougou, capitale du Burkina-Faso
14 (Figure 1). L'agglomération ouagalaise comptait 1.65 millions d'habitants en 2012, et couvre une superficie
15 d'environ 285 km². Le relief est peu marqué, avec des pentes généralement comprises entre 0.1 et 1%.
16 L'agglomération est traversée par une rivière intermittente, un affluent du Massili, qui draine environ 400
17 km² à la sortie de l'agglomération ouagalaise. Les écoulements de cet affluent sont retenus par 3 barrages
18 dans la ville, permettant de stocker l'eau, en partie pour l'alimentation en eau potable. Pour le barrage n°3 (le
19 plus en aval), un barème centimétrique de correspondance entre le volume stocké et la hauteur d'eau dans la
20 retenue a été fourni par le service hydrologique national. Le volume maximal stocké par la retenue est
21 d'environ 6.5 millions de m³, et la retenue est fermée par un déversoir qui déborde à la cote 442 (cm) de
22 l'échelle. L'habitat ouagalais est constitué de zones centrales relativement denses, de zones d'habitat
23 traditionnel constituées de maisons basses entourées de cours de concessions, quadrillées de rues non
24 revêtues, et de zones d'habitat non loties en périphérie. La végétation est peu présente sur le bassin, et les
25 sols latéritiques sont peu perméables. Des mesures sous pluies artificielles ont montré que les intensités
26 d'infiltration sont inférieures à 5 mm/h, après une pluie d'imbibition de l'ordre de 10-20 mm. Le réseau de
27 collecte des eaux pluviales est principalement constitué de canaux à ciel ouvert, ou de canaux secondaires
28 recouverts de dalles. Le réseau est relativement mal entretenu, et les ouvrages secondaires ensablés ou
29 encombrés de déchets. La ville compte quelques canaux revêtus, mais la plupart des drains sont naturels.

30 Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été obtenu sur le site Advanced Spaceborne Thermal Emission
31 and Reflection Radiometer (ASTER), à une résolution d'une seconde d'arc, soit environ 30m. Ce MNT a été
32 ensuite projeté en UTM à une résolution de 10m. Un modèle de drainage a été extrait de ce MNT ; les
33 directions obtenues ont été modifiées en fonction de la présence de bâti (obstacles) ou de collecteurs (axes
34 drainants). Les modifications en fonction du bâti ont été réalisées à partir des limites des îlots urbains (Fig.1),
35 figurant les obstacles à l'écoulement ; les altitudes des mailles îlots ont été surélevées de 25m, et un nouveau
36 modèle de drainage a été extrait du MNT ainsi modifié ; l'organisation du bâti n'a pas été détaillée au sein
37 des îlots, pour lesquels on conserve les directions déduites du MNT initial. Les modifications en fonction des
38 collecteurs ont été réalisées à partir d'un plan géoréférencé des principaux ouvrages, établi à partir de
39 reconnaissances de terrain et de photographies prises sur place, à des distances régulières le long de
40 l'ouvrage. Le forçage du drainage a dans ce cas été effectué après extraction automatique des nœuds et des
41 tronçons du réseau, et lecture des altitudes des extrémités des tronçons ; les sens d'écoulement des tronçons
42 sont ensuite déterminés de l'extrémité ayant l'altitude la plus élevée vers celle ayant l'altitude la plus faible.



1
2
3
4
5
6
7
8
9

Figure 1 : Agglomération urbaine de Ouagadougou. Les altitudes sont fournies par un MNT ASTER, projeté en UTM à une résolution de 10m. Les zones urbanisées apparaissent en gris, et ont été extraites du cadastre informatisé de la ville. Les 3 barrages sont signalés par des pastilles bleues. Les parties canalisées du réseau (Gounghin, Nations-Unies, Université, Wemtenga, Somgandé) sont encadrées d'un trait noir.



10
11
12
13
14
15

Figure 2 : Directions de drainage naturelles, à gauche, et forcées par les îlots urbains (en gris) ou par la présence d'un collecteur (en jaune), à droite.

Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 700 mm, concentrés au cours de la saison des pluies de juin à septembre. Les averses peuvent atteindre localement 100 mm en 24 heures une ou deux fois par an.

1 L'évènement exceptionnel de 2009 a atteint plus de 200 mm en 24h, provoquant de nombreux dégâts [Di
2 Baldassarre et al., 2010 ; Hangnon *et al.*, 2015 ; Engel et al., 2017].

3 On dispose de données hydro-météorologiques recueillies sur 4 bassins versants, 2 en 1979 (St Julien, 48
4 ha, et rue Destenave, 173 ha, [Le Barbé et al., 1979]) et 2 en 1992-1993 (Wemtenga amont, 330 ha, et
5 Wemtenga aval, 826 ha [Lamachère et al., 1993]). Ces bassins représentent majoritairement le type d'habitat
6 dit traditionnel, avec des densités de bâti relativement faibles, de 10 à 25%. Une vingtaine d'épisodes
7 peuvent être utilisés pour le calage des modèles. Plus récemment (2016-2017), 3 stations de mesure des
8 débits ont été installées par l'équipe 2iE à travers le projet AMMA-2050 en des points drainant des bassins
9 périphériques faiblement urbanisés, dont les superficies varient entre 75 et 195 km². Pour cette période, les
10 pluies ont été mesurées par un réseau de 16 pluviographes répartis sur l'ensemble de l'agglomération,
11 installé initialement pour la validation de la mission satellitaire Megha-Tropiques (Gosset et al., 2018), puis
12 redéployé pour la validation de mesures de pluie par atténuation du signal sur le réseau téléphonique, dans le
13 cadre du projet Rain Cell Africa (Gosset et al., 2016). Ces nouvelles mesures ont permis d'estimer la
14 contribution des bassins naturels situés en amont de l'agglomération.

15 **IV LA MODELISATION DES ECOULEMENTS**

16 Le modèle a été construit dans la plate-forme de modélisation ATHYS. ATHYS est un logiciel libre,
17 développé par HSM, qui propose un environnement convivial et homogène pour la modélisation
18 hydrologique spatialisée.

19 L'agglomération a été discrétisée en mailles de 10m, documentées par les fichiers géographiques
20 disponibles (MNT, directions de drainage, ilots urbains, collecteurs). Les pluies ont été interpolées pour
21 chaque maille par la méthode des polygones de Thiessen, à un pas de temps de 15 mn.

22 La modélisation est réalisée en 2 étapes. Une première étape opère sur une partition de l'espace en bassins
23 élémentaires, drainant une superficie fixée; bien que chaque bassin fasse l'objet d'une modélisation
24 spatialisée, cette première étape a pour but de réduire les temps de calcul en utilisant un modèle conceptuel
25 approprié, calé sur les observations des bassins expérimentaux. Les hydrogrammes simulés à l'exutoire des
26 bassins élémentaires sont ensuite injectés dans le réseau lors d'une deuxième étape, et propagés à l'aide d'un
27 modèle hydraulique. Les bassins élémentaires ont été définis comme drainant une superficie urbaine de 10
28 ha, et ont été déterminés par un algorithme basé sur les rapports des superficies entre mailles amont et aval.
29 On obtient finalement 1079 bassins élémentaires, dont les superficies varient de 0.1 à 90 km² (chaque bassin
30 ayant une superficie urbaine proche de 10 ha). Le réseau a été défini comme étant les mailles drainant plus
31 de 1 ha.

32 En termes de production, le modèle utilisé est le modèle SCS appliqué à chacune des mailles, comportant
33 un seul paramètre S, capacité de stockage, en mm. On a distingué les mailles « urbaines » et les mailles
34 naturelles pour lesquelles on a respectivement fixé S à 60 et à 250 mm. La distinction entre mailles urbaines
35 et mailles naturelles s'appuie sur la couche d'information ilots urbains (Fig.1) : les mailles urbaines ont été
36 définies comme les mailles intérieures aux limites des ilots urbains. Les valeurs de S proviennent du calage
37 du modèle à partir des observations pluie-débit acquises sur les différents bassins expérimentaux. A la
38 lumière des résultats obtenus pour différents épisodes, il semble que le paramètre S varie (augmente) en
39 fonction du cumul de pluie reçu au cours d'épisode, comme ceci a déjà été observé avec le modèle SCS
40 [Ponce et Hawkins, 1996]. Cet inconvénient, traduisant le fait que le comportement asymptotique du
41 coefficient de ruissellement est mal représenté par le modèle, pourrait inciter à rechercher un autre modèle,
42 moins dépendant des pluies.

43 En termes de transfert, le modèle utilisé est soit le modèle Lag and Route, soit le modèle de l'Onde
44 Cinématique. Le modèle Lag and Route a été appliqué pour les mailles des bassins élémentaires, avec une
45 vitesse géomorphologique définie par $V = \mu \cdot I^{0.5} \cdot S^{0.2}$, où, V désigne la vitesse en m/s, μ un coefficient
46 d'ajustement, I la pente en m/m (voir le calcul des pentes plus bas), S la superficie drainée en km². Ce type
47 de relation a été initialement proposé par Moniod (1983) en milieu naturel, puis validé en milieu urbain par
48 Lhomme et al. (2004). Cette relation a été validée sur 4 bassins urbains expérimentaux, avec la valeur $\mu=40$,
49 et sur 3 bassins péri-urbains, avec la valeur $\mu=20$. Le modèle de l'onde cinématique a été appliqué pour les
50 mailles « réseau », en distinguant deux valeurs de coefficients de rugosité de Strickler : 50 m^{1/3}/s pour les
51 biefs revêtus et 7 m^{1/3}/s pour les biefs non revêtus. Les sections d'écoulement ont été considérées comme
52 étant rectangulaires, et on a ajusté à partir des relevés de terrain une formulation géomorphologique pour les
53 largeurs de section : $\lambda = I^{0.25} \cdot S^{0.25}$, où λ désigne la largeur de la maille en m, I la pente de la maille en m/m et
54 S la superficie drainée par la maille en km². Les pentes des mailles sont calculées en fonction des différences

1 d'altitudes selon la direction de drainage. Ces pentes ont été lissées par moyenne mobile sur 5 mailles en aval
2 de la maille considérée.

3 Les retenues sont intégrées dans la modélisation. Une retenue est matérialisée par une maille, figurant le
4 point du réseau où opère le stockage. Le fonctionnement de la retenue est ensuite défini par des valeurs
5 tabulées des niveaux dans le réservoir, des volumes stockés et des débits de sortie de la retenue.

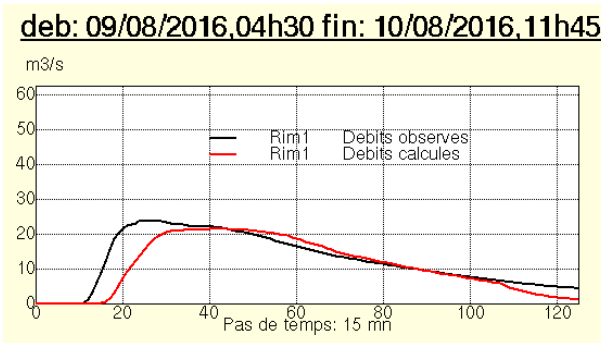
6 La réduction des temps de calcul nécessite un échantillonnage des mailles. Pour les mailles versant, on
7 procède au calcul pour 1 maille sur N, et on multiplie la superficie de la maille par N. On a utilisé ici un
8 facteur N=100, soit une maille bloc de 1 ha. Pour le modèle de l'Onde Cinématique, les mailles sont
9 échantillonnées par un seuil d'accroissement des superficies drainées : une maille est échantillonnée si la
10 maille immédiatement en aval présente un accroissement de superficie drainée supérieur à 1 ha. La superficie
11 de la maille échantillonnée est ensuite rapportée à cet accroissement. Dans ces conditions, le temps de calcul
12 est réduit à quelques minutes, sans perte de précision supérieure à 5% pour les débits de pointe de crue.

13

14 V SIMULATIONS DES ECOULEMENTS

15 Les simulations présentées sont des premiers résultats qui ne doivent pas être considérés comme étant
16 définitifs, mais qui permettent d'illustrer les résultats d'une session de modélisation, qui apparaissent de
17 plusieurs façons :

- 18 - hydrogrammes complets aux exutoires des bassins élémentaires, soit ici 1079 bassins, ou des bassins
19 disposant d'observations : un exemple est donné sur la figure 3 à l'exutoire du bassin Rim1 (84.5 km²),
20 à dominante naturelle, lors de l'épisode du 9/8/2016 pour lequel la pluie moyenne sur le bassin était de
21 75 mm.



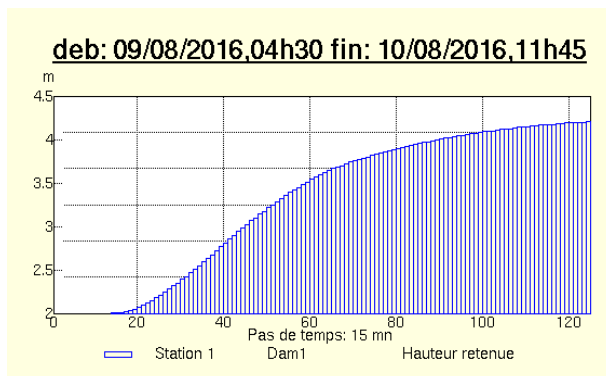
23

24 Figure 3 : Hydrogrammes observés et simulés à l'exutoire du bassin Rim1, épisode du 09/09/2016.

25

- 26 - niveaux d'eau et débits en sortie des retenues : le barrage n°3 a été intégré à la modélisation, en
27 supposant un niveau initial correspondant à un volume stocké de 1.4 millions de m³ (le volume stocké
28 maximal étant de 6.5 millions de m³). Le modèle simule le remplissage de la retenue (Fig.4), ainsi que
29 l'hydrogramme en sortie de la retenue.

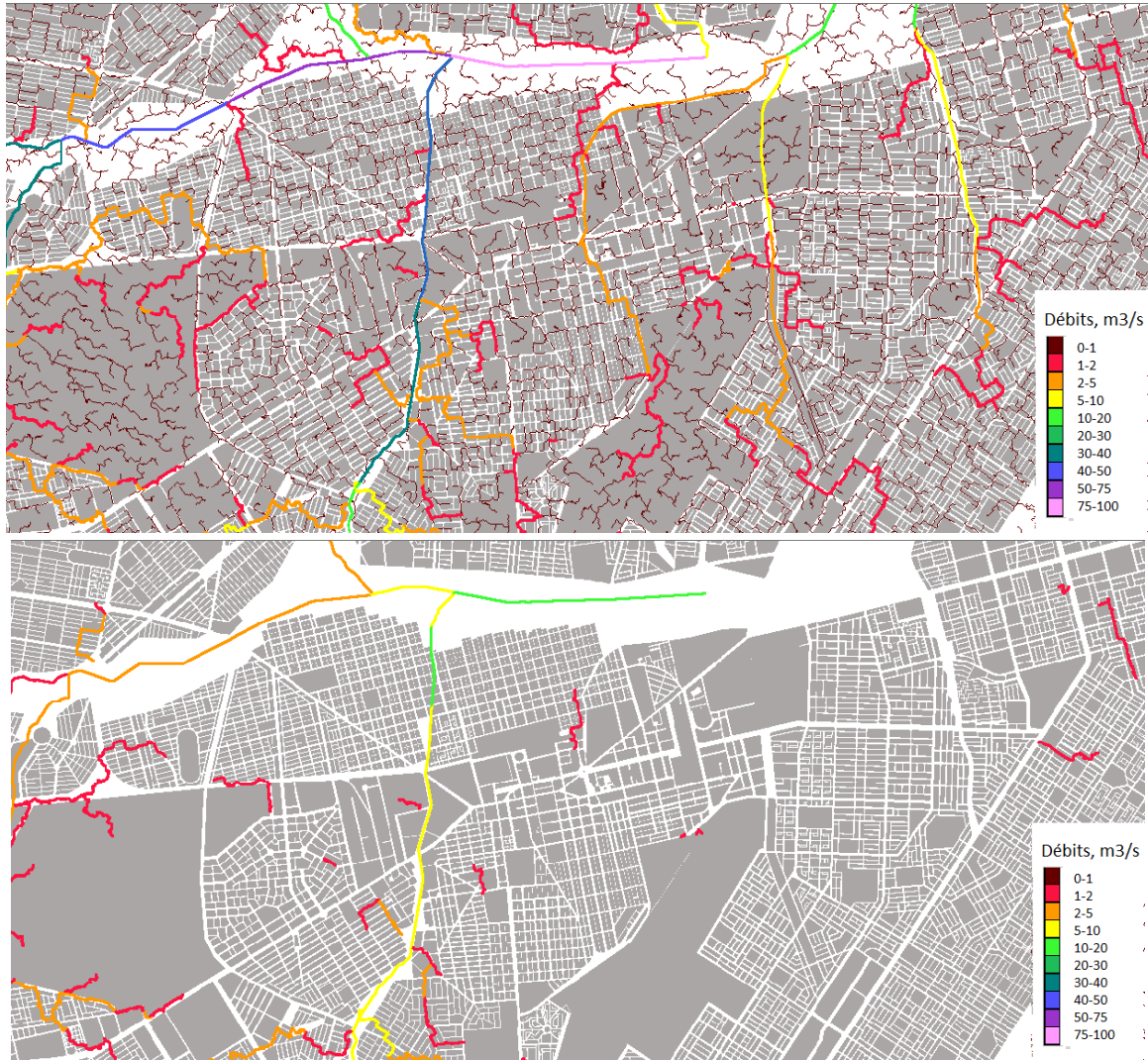
30



32

1 Figure 4 : Variations des hauteurs d'eau dans la retenue. Le volume maximal de la retenue n'a pas été
2 atteint et la retenue n'a pas débordé.

- 3
- 4 - débits, hauteurs et vitesses dans le réseau à différentes dates définies par l'utilisateur : le modèle
5 fournit ces informations pour toutes les mailles réseau (mailles qui drainent plus de 1 ha ici). On peut
6 soustraire aux débits simulés, par exemple, la capacité de drainage à pleine charge, pour faire
7 apparaître les points de débordements du réseau (Fig.5)
- 8



12 Figure 5 : Estimation des débits maximum dans le réseau de drainage, épisode du 09/08/2016 (en haut) et des
13 débits de débordement (en bas), obtenus par différence entre les débits simulés par le modèle et les débits
14 capables des collecteurs, calculés en fonction des pentes, largeurs et profondeurs des collecteurs.

15 VI APPLICATIF TEMPS REEL

16 Dans le cadre de différents projets liés à l'initiative Rain Cell Africa, l'IRD et ses partenaires ont mis en
17 place dans certaines villes africaines (e.g. Ouagadougou, Bamako) un outil d'alerte précoce aux inondations à
18 destination des services opérationnels nationaux (Météorologie nationale, Protection civile, Direction de
19 l'hydraulique, ...). Le démonstrateur Rain Cell app produit à l'échelle d'une ville, des cartes d'accumulation
20 de pluie au pas de temps du quart d'heure, une carte d'accumulation de pluie depuis le début d'un événement
21 pluvieux, une série de cartes de prévision des écoulements dans la ville au pas de temps du quart d'heure et
22 une carte de vigilance associée aux prévisions d'écoulement.

23 Le démonstrateur recueille en temps réel des informations pluviométriques issues du réseau de
24 pluviographes télétransmis, et prochainement, il intégrera, grâce à une collaboration avec l'opérateur de

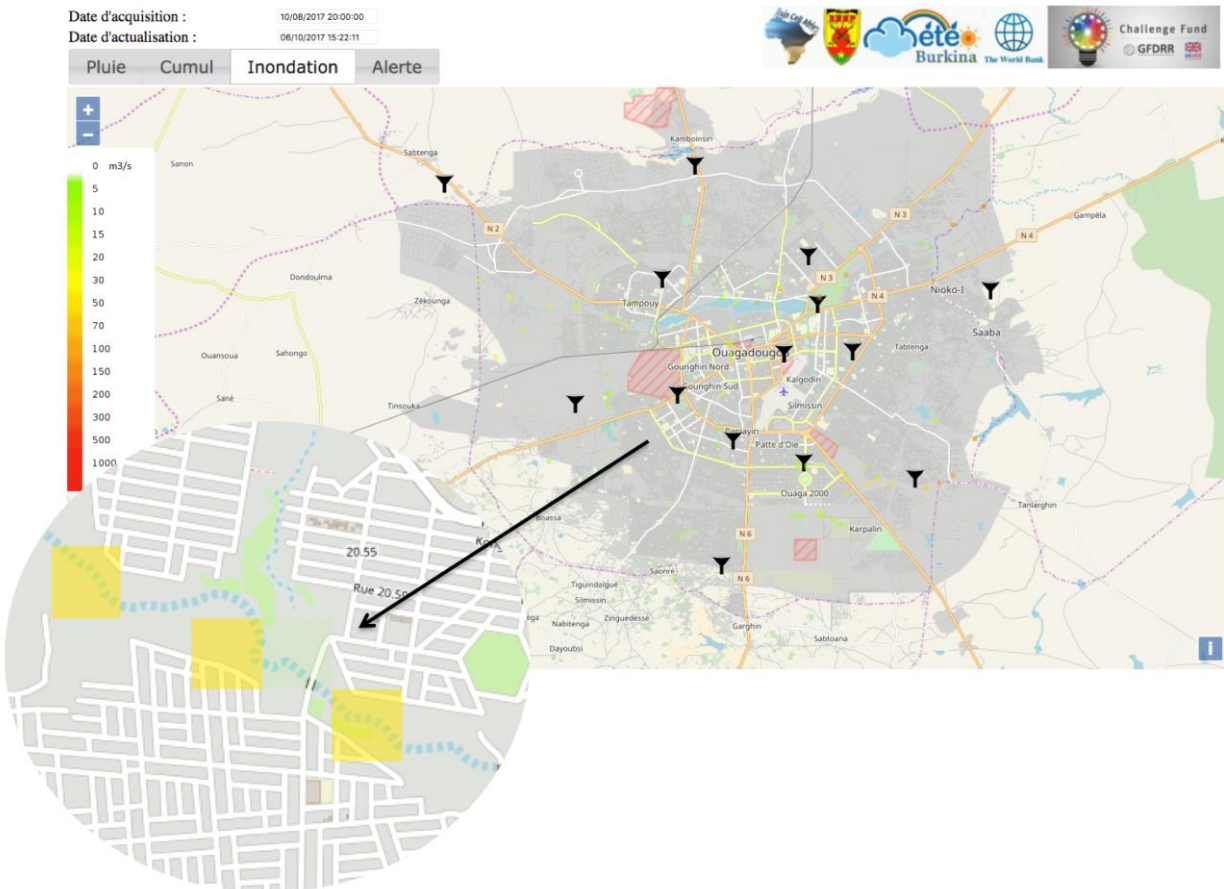
1 téléphonie Orange, des informations sur les perturbations des signaux échangés entre les antennes des
2 réseaux de téléphonie mobile transformées ensuite en champs de précipitation (Doumounia *et al.*, 2014;
3 Gosset *et al.*, 2016; Uijlenhoet *et al.*, 2018).

4 Les données pluviométriques sont transmises au serveur sous forme de messages SMS ou par FTP, toutes
5 les 15 minutes dès le début d'un évènement pluvieux, et ensuite transformées en données d'accumulation
6 pluviométrique à différents pas de temps (5 et 15 minutes). Les données au pas de temps de 5 minutes
7 permettent de visualiser les hyétoigrammes en différents points de la ville. Les données au pas de temps de 15
8 minutes sont à la fois utilisées pour la création de cartes de pluies spatialisées par krigeage et pour alimenter
9 le modèle d'écoulement hydro-urbain dans ATHYS. Ce dernier produit des cartes de débits, vitesses et de
10 hauteurs d'eau qui permettent de construire une carte de vigilance.

11 L'affichage des cartes produites par le serveur RainCell app est réalisé à travers un web browser.
12 L'application WEB affiche sur un fond de carte OSM les produits relatifs au dernier quart d'heure. Quatre
13 onglets permettent de sélectionner le produit à visualiser :

- 14 - « accumulation de pluie sur le dernier pas de temps d'un quart d'heure » ;
- 15 - « accumulation de pluie depuis le début de l'évènement pluvieux » ;
- 16 - « débit d'écoulement » à différents points de contrôle du réseau hydro-urbain de la ville ;
- 17 - « sévérité de l'inondation » représentée à l'aide de 4 couleurs permettant la visualisation d'un indice de la
18 sévérité de l'inondation aux points de contrôle du réseau hydro-urbain de la ville (Fig.6). Cet indice est
19 déterminé par l'ampleur des débordements susceptibles de survenir dans le réseau, le débit de débordement
20 étant calculé comme étant la différence entre le débit simulé par le modèle et le débit du réseau à pleine
21 charge.

22



23

24

25 Figure 6 : Représentation du dispositif de pluviographes déployé sur Ouagadougou, et sur la partie zoomée,
26 des estimations de débit dans le réseau de drainage

27

1 Le serveur RainCell app est constitué d'une station de travail sous système d'exploitation Linux CentOS 7.
2 Les ressources du serveur informatique ont été dimensionnées afin de permettre une exécution des
3 programmes de spatialisation et de modélisation en un laps de temps très court inférieure à 5 minutes. La
4 station comprends un processeur Intel Xeon E3-1275V5 quad-core / 8 threads cadencés à 3.6 (ou 4GHz en
5 mode turboboost) associé à 8Mo de mémoire cache et est pourvue de 32Go de mémoire vive. L'ensemble
6 des codes informatiques ont été écrits en Java, Python, R et BASH.

7 VII CONCLUSIONS

8 La méthode présentée ici peut fournir en temps réel des estimations de débit et du risque de défaillance des
9 ouvrages, à l'échelle d'une agglomération entière. Les résultats doivent encore être contrôlés et affinés, tant
10 du point de vue du calage des modèles à partir des données pluie-débit disponibles, que de la qualité des
11 entrées du modèle : modèle numérique de terrain, description de l'occupation des sols et du drainage,
12 fonctionnement des retenues La méthode testée a cependant montré qu'il était possible d'intégrer tout
13 type d'information spatiale relative à l'hydrosystème urbain complet (incluant apports en provenance des bv
14 naturels ou péri-urbains, aménagements hydrauliques, types d'occupation des sols) ou à la pluie, voire
15 d'autres caractéristiques hydro-météorologiques. Des développements sont actuellement prévus pour intégrer
16 les écoulements multi-directionnels au niveau des carrefours [Lhomme et al., 2006b], et les échanges
17 hydrauliques entre les voiries et le bâti [Hingray et al., 2000]. Les temps de calcul sont de l'ordre de
18 quelques minutes, compatibles avec les impératifs de la prévision en temps réel. La méthode fournit
19 également un outil d'aide à la décision appréciable pour des études d'impact d'aménagement, de
20 développement urbain ou de changement climatique. L'un des avantages de la méthode est de pouvoir être
21 mise en place rapidement, à partir d'une information relativement accessible dont le traitement est
22 automatisé, pour fournir une information détaillée, adaptée au milieu urbain, sur une grande étendue spatiale.
23 La méthode fournit également les conditions aux limites pour des simulations locales plus détaillées, à l'aide
24 de modèles hydrodynamiques 2 ou 3D. Enfin, tous les traitements de données (hydro-météorologiques,
25 géographiques) et les modèles susceptibles d'être utilisés ont été intégrés au logiciel ATHYS, qui garantit
26 une mise en œuvre rapide et efficace de la méthode.

27

28 VIII REMERCIEMENTS

29 Les auteurs remercient les bailleurs de fonds au développement (Banque Mondiale/Global Facility for Disaster reduction and
30 Recovery, GFDRR ; Korean Growth Green Fund, KGGF ; UNF Data For Sustainable Development initiative) pour leur appui
31 financier. La collecte des données des hauteurs et des débits en 2016-2017 a été rendu possible par l'appui financier de DfiD et
32 NERC, dans le cadre du projet AMMA-2050.

33

34 IX REFERENCES

- 35 Bouvier C., Desbordes M. (1990). Un modèle de ruissellement urbain pour les villes d'Afrique de l'Ouest.
36 *Hydrologie Continentale*, 5(2), 77-86
- 37 Bouvier C., Hingray B. (2001). Modélisation des flux inondants dans les voiries d'un secteur urbain de
38 Ouagadougou (BF). NOVATECH 2001 – 25-27 juin 2001 – Lyon(France), 1011-1014
- 39 Casse, C., M. Gosset, T. Vischel, G. Quantin, and B. A. Tanimoun, 2016 : Model-based study of the role of
40 rainfall and Land Use Land Cover in the changes in Niger Red floods occurrence and intensity in
41 Niamey between 1953 and 2012. hess-2015-427 doi:10.5194/hessd-12-12039-2015
- 42 Di Baldassarre, G., A. Montanari, H. Lins, D. Koutsoyiannis, L. Brandimarte, and G. Blöschl (2010). Flood
43 fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L22402,
44 doi:10.1029/2010GL045467.
- 45 Doumounia, A., Gosset M., Cazenave F., Kacou M., Zougmore F. (2014). Rainfall monitoring based on
46 microwave links from cellular telecommunication networks: First results from a West African test
47 bed. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 6016–6022, doi:10.1002/2014GL060724.

- 1 Engel, T., A. H. Fink, P. Knippertz, G. Pante, and J. Bliefernicht, 2017: Extreme precipitation in the West
2 African cities of Dakar and Ouagadougou: Atmospheric dynamics and implications for flood risk
3 assessments. *J. Hydrometeor.*, 18, 2937–2957, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0218.1>.
- 4 Gemenne F., Blocher J. De Longueville F., Vigil Diaz Telenti S., Zickgraf C., Gharbaoui D., Ozer P. (2017).
5 Climate change, natural disasters and population displacements in West Africa, *Geo-Eco-Trop.*, 2017,
6 41, 3, n.s.: 317-337 (<http://www.geoecotrop.be/index.php?page=numero-41>)
- 7 Gosset, M., H. Kunstmann, F. Zougmore, F. Cazenave, H. Leijnse, R. Uijlenhoet, C. Chwala, F. Keis, A.
8 Doumounia, B. Boubacar, M. kacou, P. Alpert, H. Messer, J. Rieckermann, and J. Hoedjes, 2016:
9 Improving Rainfall Measurement in gauge poor regions thanks to mobile telecommunication networks,
10 *Bull. Amer. Meteor. Soc* doi:10.1175/BAMS-D-15-00164.1.
- 11 Gosset M., M Alcoba, R Roca, S Cleché and G Urbani, 2018 EndFragment "Evaluation of TAPEER daily
12 estimates and other GPM era products against dense gauge networks in West Africa, analyzing ground
13 reference uncertainty." *QJRMS* in press - No provisoire : QJ-17-0210.R2
- 14 Hangnon H., De Longueville F., Ozer P. (2015). Précipitations extrêmes et inondations à Ouagadougou :
15 quand le développement urbain est mal maîtrisé. Actes du XXVIIIe Colloque de l'Association
16 Internationale de Climatologie, Liège 2015, 497-502
- 17 Hingray B., Bouvier C., Cappelaere B., Desbordes M. (2000). Inondations urbaines dans les PED : un
18 indicateur géométrique caractéristique du comportement hydrodynamique du bâti. *Revue des Sciences
19 de l'Eau*, 13/1(2000), 85-100
- 20 Issaka H., Badariotti D. (2016), Les inondations à Niamey, enjeux autour d'un phénomène complexe. *Les
21 Cahiers d'Outre-Mer*, 263 | <http://com.revues.org/6900> ; DOI : 10.4000/com.6900
- 22 Lamachère Jean-Marie, 1993. Etude hydrologique du marigot de Wemtenga, ville de Ouagadougou
23 : campagnes hydrologiques des années 1992 et 1993 : chroniques des pluies, des intensités
24 pluviométriques, des cotes et des débits. ORSTOM, 123 p.
25 http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-09/41721.pdf
- 26 Le Barbé L. 1982. Etude du ruissellement urbain à Ouagadougou: essai d'interprétation théorique:
27 recherche d'une méthode d'évaluation de la distribution des débits de pointes de crues à
28 l'exutoire des bassins urbains. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*.
- 29 Lhomme J., Bouvier C., Perrin J.L., 2004. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban
30 catchment. *Journal of Hydrology*, 299, 203-216
- 31 Lhomme J., Bouvier C., Mignot C. , Paquier A. (2006). One-dimensional GIS-based model compared with a
32 two-dimensional model in urban floods simulation. *Water Science & Technology*, 54 (6-7), 83–91
- 33 Moniod F., 1983. "Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique". *Cahiers de l'Orstom, série
34 Hydrologie*, vol. 20, n°3 et 4, 191-204
- 35 Nouaceur Z., 2015. Les capitales sahéliennes face à la recrudescence des inondations. *Territorium* n°22, 131-
36 140, DOI:http://dx.doi.org/10.14195/1647-7723_22_9
- 37 Ponce, V. and Hawkins, R. (1996). Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *Journal of Hydrologic
38 Engineering*, 1, 11-19
- 39 Uijlenhoet R, Overeem A, Leijnse H, 2018 . Opportunistic remote sensing of rainfall using microwavelinks
40 from cellular communication networks. *WIREs Water* . 2018;e1289. <https://doi.org/10.1002/wat2.1289>