

Simulation de la propagation des crues dans la plaine d'inondation de la vallée du fleuve Sénégal

[Simulation of the propagation of floods in the flood plain of the Senegal River valley]

Yaya Dieme¹, Mamadou Bop², and Vieux Boukhaly Traore¹

¹Laboratoire d'Hydraulique et de mécanique des fluides, FST, Université Cheikh Anta Diop de Dakar B.P. 5005 Dakar-Fann, Senegal

²École Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, corniche Ouest BP 5085 Dakar-Fann, Senegal

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: To simulate the propagation of floods in the Senegal River valley in order to lay out the flood risk maps, we used hydraulic methods calculating the flooded surface from the topography of the minor and major beds. To this end, the HECRAS model and GIS (ARCGIS and HEC-GeoRAS) were used on the Bakel-Matam reach. The work was done in steady state and allowed us to map the risk of flooding on this Bakel-Matam section in the Senegal River valley for different floods. To do this work, water levels and flows were used for the calibration and validation of the HEC-RAS model. The Nash criterion was used to optimize the HEC-RAS parameters. The flood extent obtained by this model was exported and visualized in ArcGIS. Thus, the flood mapping results obtained made it possible to detect a certain number of villages at risk of flooding for the hundred-year flow, which shows that the Senegal River Valley is vulnerable to floods. Moreover, this was demonstrated by the average catastrophic flood which caused flooding that could impact approximately 24,071 people. The characteristics (height, speed and propagation time) for each flood were analyzed. The promising results obtained showed that the couple HECRAS and GIS is an effective tool for mapping floods and could be used as a tool to help planners in planning.

KEYWORDS: Simulation, flood, flooding, Senegal River.

RESUME: Pour simuler la propagation des crues dans la vallée du fleuve Sénégal afin de disposer les cartes à risque d'inondation, nous avons utilisé les méthodes hydrauliques calculant la surface inondée à partir de la topographie des lits mineur et majeur. A cet effet le modèle HECRAS et les SIG (ARCGIS et HEC-GeoRAS) ont été utilisés sur le bief Bakel-Matam. Le travail a été fait en régime permanent et nous a permis de cartographier le risque d'inondation sur ce tronçon Bakel-Matam dans la vallée du fleuve Sénégal pour différentes crues.

Les hauteurs d'eau et les débits ainsi que le critère de Nash ont permis le calibrage du modèle HEC-RAS dont les résultats ont été exportés et visualisés dans ArcGIS.

Ainsi les résultats de cartographie des crues obtenus ont permis de détecter un certain nombre de villages à risque d'inondation pour le débit centennal montrant ainsi que la vallée est vulnérable face aux crues. D'ailleurs cela a été démontré par la crue catastrophique moyenne qui a engendré des inondations pouvant impactant environ 24071 personnes. Les caractéristiques (hauteur, vitesse et temps de propagation) pour chaque crue ont été analysées. Les résultats prometteurs obtenus ont montré que le couple HECRAS et SIG est outil efficace de cartographie des crues et pourrait être utilisé comme outil d'aide aux aménagistes dans la planification.

MOTS-CLEFS: Simulation, crue, inondation, fleuve Sénégal.

1 INTRODUCTION

La plaine d'inondation de la vallée du fleuve Sénégal fait partie des zones de forte concentration de population. La densité de population varie selon les régions et peut aller jusqu'à 1900 habitants par kilomètre carré [23]. Ces fortes densités s'expliquent bien évidemment par la présence d'un cours d'eau pérenne permettant de mettre en culture de vastes superficies de terres fertiles [13]. Par ailleurs, les nouveaux aménagements hydroagricoles, les opportunités économiques de transformation des productions agricoles comme la canne à sucre ou la tomate ainsi que l'industrialisation naissante avec l'exploitation du phosphate de Ndendory sont aussi autant d'arguments qui concourent au dynamisme démographique [12].

Malgré leurs conditions attrayantes et leur forte convoitise, les zones inondables renferment d'énormes risques parmi lesquels figurent les inondations. En effet, l'exposition aux risques d'inondation est une condition inhérente aux plaines alluviales [1]. Les inondations constituent un risque majeur et figurent au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde en occasionnant environ 20 000 victimes par an [21]. Dans la vallée du fleuve Sénégal, les plaines d'inondation qui abritent de grandes concentrations humaines, subissent régulièrement les conséquences des inondations en période de grandes crues, en fonction du débit du fleuve et des précipitations locales. Une grande partie du lit majeur est inondée annuellement et est couverte de 10 à 20 kilomètres de large [23]. Les dommages des inondations sont principalement fonction de la hauteur et de la durée de submersion qui peut être de plusieurs jours à plusieurs semaines, voire plusieurs mois [18].

Les inondations constituent un des événements, qui a plus marqué ces dernières années, dans la vallée, particulièrement dans le Walo communément appelé "Dandé Mayo". Dans certains endroits, les eaux d'inondations sont montées à des hauteurs considérables au point que les cultures ont été submergées pendant des semaines, ce qui a entraîné la destruction totale des plantations (GDS, 2010). Des centaines de milliers de personnes ont été dans des situations de sinistre, avec plusieurs cas de décès, des effondrements d'habitations et d'infrastructures (ponts, routes et pistes d'accès), des pertes de quantités importantes de récoltes et de bétail. Les dommages dus aux inondations de 2009 dans le secteur agricole concernent essentiellement les cultures de riz, les plantations de bananiers et de manguiers. Il faut aussi noter la destruction des pistes de production, des réseaux de drainage, des digues et diguettes, des étangs piscicoles.

Pour réduire les risques d'inondation, beaucoup d'outils réglementaires ont été mis en place par l'état du Sénégal et l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS).

Ainsi le Sénégal a mis en le Plan Décennal de Gestion des Inondation (PDGI), le Plan National de Gestion des inondations (PNGI), et le Plan Organisation des Secours en cas de Catastrophes (ORSEC). Le plan ORSEC a été déclenché à plusieurs reprises pour gérer les différentes situations de crise liées aux inondations, en mobilisant d'importants moyens financiers destinés à l'acquisition de matériels de pompage, à la distribution de vivres de secours, à l'achat de tentes, de médicaments, de produits de désinfection et de désinsectisation des zones inondées et sites de recasement des sans-abris. Ces moyens ont également permis la réalisation de travaux d'urgence de protection des localités exposées aux inondations. L'OMVS, de son côté, s'est munie d'un outil réglementaire « la Charte des Eaux du fleuve Sénégal », dont l'un des objectifs est la réduction des risques d'inondations. De même, en 2017, l'OMVS a mis en place le Projet de Gestion Intégrée des Ressources en Eau et de Développement des Usages Multiples dans le Bassin du Fleuve Sénégal (PGIRE II) pour évaluer la vulnérabilité du bassin du fleuve Sénégal au changement climatique et élaborer un plan d'ajustement et de renforcement de la résilience du bassin [23]. Dans le cadre de la prévision, l'OMVS, à travers sa commission technique de prévision saisonnière, procède chaque année une prévision saisonnière hydrologique dans le bassin du fleuve Sénégal. Ces prévisions sont utilisées pour fixer les objectifs de gestion du barrage de Manantali [5]. Elles permettent aussi à l'OMVS de sensibiliser les populations sur d'éventuels risques d'inondation.

Dans cette dynamique, il faut aussi souligner le rôle important joué par les digues de protection contre les crues dans la vallée, malgré leur vétusté.

Malgré toutes ces mesures entreprises, le phénomène des inondations dans la vallée continue de prendre de l'ampleur. Les établissements humains situés dans ces plaines n'arrivent pas à supporter les inondations qui, en fin de compte, apparaissent comme un facteur entretenant la pauvreté et le sous-développement [8].

La variabilité et les changements climatiques sont supposés être les principaux facteurs de telles modifications, induisant l'augmentation des crues. Ces événements extrêmes, couplés à une planification urbaine peu contrôlée, provoquent des inondations importantes presque chaque année [7]. L'analyse de la vulnérabilité du bassin du fleuve Sénégal face aux changements climatiques suggère que la situation climatique récente se prolongera d'ici 2050 et le réchauffement de la terre conduira pour le Bassin du Fleuve Sénégal à une saison humide plus courte se traduisant par, d'une part, des étiages plus sévères, et d'autre part des crues plus importantes [2].

Face à la variabilité climatique persistante et à la faiblesse du dispositif de prévention des risques d'inondation, un nombre important de villes et villages risque de connaître encore des situations de sinistres plus graves. A cet effet, la réglementation de l'utilisation des sols est primordiale pour prévenir les inondations. Cependant, elle nécessite une bonne connaissance de l'étendue des inondations lors de crues importantes. Il devient intéressant de simuler la propagation des crues afin de mieux gérer l'occupation du sol et réduire les risques d'inondations dans la vallée.

2 METHODOLOGIE

2.1 MÉTHODES DE SIMULATION DES CRUES DANS LA VALLÉE

Dans le bassin versant du fleuve Sénégal, la simulation des crues reposent pour la plupart des cas sur l'utilisation des méthodes hydrologiques. Celles-ci qui utilisent souvent le principe de continuité et une relation entre le débit et le stockage temporaire de l'eau lors de la crue. Les méthodes hydrologiques n'ont pas recours à cette topographie et elles utilisent les hauteurs et les débits observés en amont et en aval d'un bief pour calculer cette surface. C'est notamment le cas de [4], [6], [20], [19], [21], [26]. Les résultats obtenus par ces modèles hydrologiques dans le bassin du fleuve Sénégal malgré leur importance, ne nous permettent pas de délimiter l'étendue de la crue. C'est pourquoi nous avons opté pour des méthodes hydrauliques qui permettent de représenter l'étendue des crues et de mieux gérer l'occupation du sol.

2.2 MÉTHODE HYDRAULIQUE UTILISÉE POUR LA SIMULATION DE LA PROPAGATION DE CRUE DANS LA VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL

Pour mieux simuler la l'étendue des crues afin de disposer des cartes de risque d'inondations dans la vallée, des méthodes hydrauliques calculant la surface inondée à partir de la topographie des lits mineur et majeur. A cet effet le modèle HECRAS et les SIG (ARCGIS et HEC-GeoRAS) ont été utilisés.

2.2.1 ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant du bief Bakel-Matam a été choisi. Ce bief a été délimité grâce au logiciel SWAT lié à ArcGIS à partir du MNT provenant des données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) gratuites disponibles sur le site: <https://portal.opentopography.org>. Il a une résolution de 30m. il est long d'environ 172 km, draine un bassin versant d'une superficie de l'ordre 13 500 km² (fig. 1). Le choix de ce bief est motivé par la disponibilité des données (débit et côte) nécessaires au calage du modèle HECRAS.

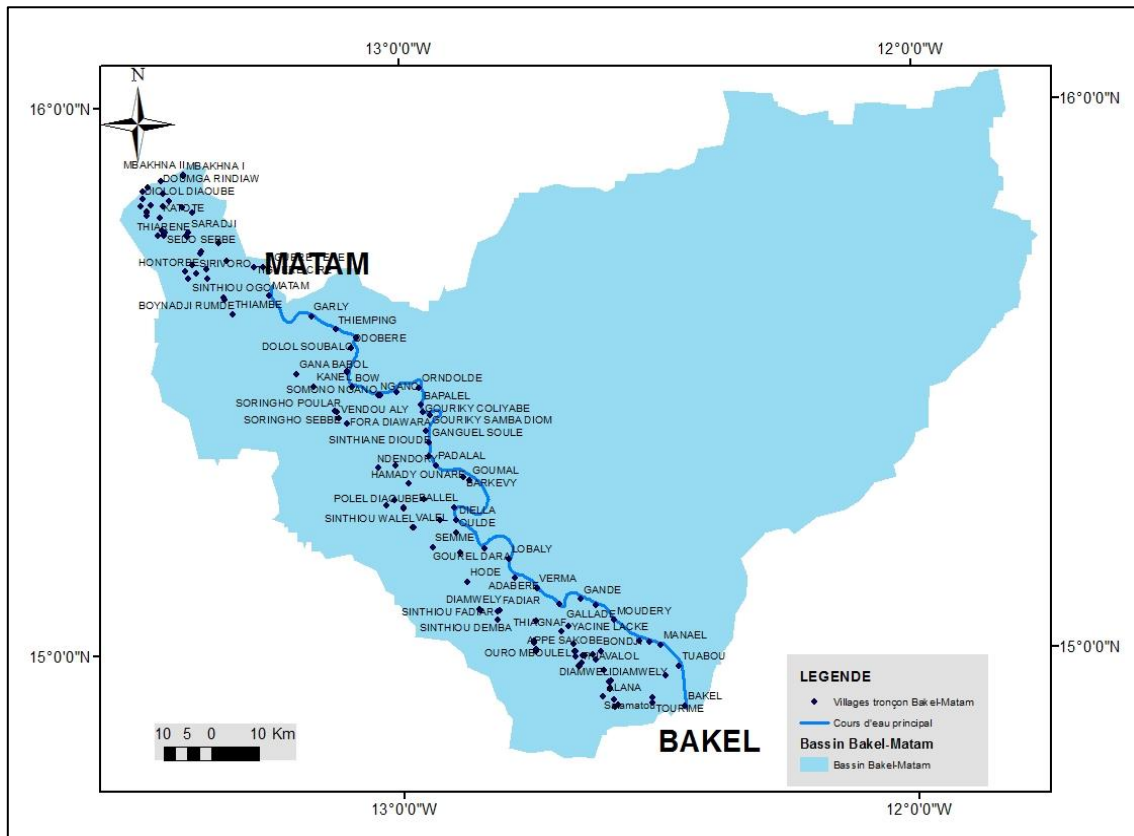


Fig. 1. Bassin versant du bief Bakel-Matam

En outre, avec la négligence des apports extérieurs, le bief à partir de Bakel et dont la distance est plus petite convient de mieux pour réduire davantage les erreurs de simulation. Selon [27], les débits mesurés dans la section de Bakel, traduisent la totalité de l'écoulement passant dans la vallée. A Matam, l'écoulement passe à la fois sur le lit mineur et sur le lit majeur et la totalité de cet écoulement passant dans la vallée peut être relié à la hauteur du fleuve, ce qui n'est pas le cas pour les autres stations de la vallée [27]. De plus, dans la basse vallée et le delta, avec l'avènement de Dama, le régime est plus ou moins contrôlé par les hauteurs, il devient difficile de déterminer les débits en raison de la courbe de remous que crée le barrage [4]. D'après [27], à partir de Bakel, le laminage important que subissent les crues à l'aval de Bakel complique singulièrement l'étude de leur propagation. La pente moyenne de la ligne d'eau peut varier entre 3 cm/km et 4.5 cm/km selon la période [20]

2.2.2 DONNÉES UTILISÉES

Les données utilisées pour ce travail concernent: la pente du cours d'eau, les profils transversaux, les débits et les hauteurs d'eau. Les débits maximums de Bakel et les hauteurs maximales Matam de 1969 à 2006 ont été utilisés. L'ensemble de ces données a servi à caler le modèle hydraulique utilisé. Les débits et les hauteurs d'eau à l'échelle proviennent respectivement de l'OMVS. Pour cartographier les zones à risque, les débits de périodes de 100 ans et le débit de crue catastrophique moyenne (CCM) ont été utilisés. Le fichier Shape contenant les données de positions géographiques des villages du long du bief provient du Laboratoire de Géomatique de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar.

2.2.3 LES OUTILS UTILISÉS POUR LA SIMULATION DES CRUES

Les logiciels HECRAS et les SIG (ARCGIS et HEC-GeoRAS) ont été utilisés. HECRAS de l'US Army Corps of Engineers gratuit (site: www.hec.usace.army.mil) est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il prend en entrée des débits (Q) et fournit en sortie des hauteurs (H) et des surfaces inondées (S). La ligne d'eau est calculée d'une section à une autre en résolvant l'équation de l'énergie par une méthode itérative (Standard Step Method). Elle est obtenue à partir de l'équation de quantité de mouvement et représente la conversion de la charge hydraulique. L'équation résolue est la suivante:

$$H_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = H_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \tag{1}$$

Avec:

H: hauteur d'eau; Z: côte de fond; V: Vitesse moyenne sur une section; g: gravité; α: coefficient de pondération; he: pertes de charges

Une présentation détaillée de ce logiciel est disponible dans la bibliographie [14], [15]; [16]; [17]; [28]...). Depuis son introduction, il ya plusieurs années, l'application HEC-RAS est reconnue comme un excellent modèle de simulation de systèmes majeurs (débit en canal ouvert) et est devenu le principal modèle pour calculer les élévations des plaines inondables et de déterminer de l'étendue de l'inondation [11]. HEC-RAS permet aussi de développer des relations de probabilité entre les niveaux de crue en amont et en aval dans le but de prédire les niveaux d'inondation à l'aval à partir des observations en amont [25].

Dans ce travail, les SIG (HEC-GeoRAS via Arc-GIS), non seulement, vont faciliter l'entrée des données géométriques dans HEC-RAS, mais aussi vont générer des cartes de risque d'inondation. Ces deux outils couplés permettent aussi de modéliser et de spatialiser l'étendue d'une crue [9]. Selon [11], le SIG couplé avec un modèle hydraulique est devenu un outil très utile pour exécuter une simulation et interpréter les résultats dans un contexte spatial. Une procédure détaillée de l'utilisation couplée de HECRAS et ARCGIS par l'intermédiaire de son module HEC-GeoRAS a été décrite dans de nombreux ouvrages et manuels d'utilisation. On peut citer entre autres: [29]; [24]; [10]; [22], Sarah Meyer et al. (2007), [3].

L'organigramme de la figure 2 décrit les principales étapes du fonctionnement du coupe HECRAS-ArcGIS. ArcGIS est utilisé pour la partie SIG (Système d'Information Géographique) et HEC-RAS pour la partie hydraulique. Le lien entre les deux est effectué par le module HEC-GeoRAS, une extension d'ArcGIS. A partir du MNT (Raster ou TIN) qui est défini comme la donnée d'entrée de base dans ArcGIS, l'ensemble des procédures, des outils et utilitaires de HEC-GeoRAS ont été utilisés pour créer des données géométriques. Il s'agit des profils en travers, des élévations, des distances d'une section à l'autre, du cours d'eau principal, du lit mineur et du lit majeur. Après création, ces données sont exportées dans l'application HEC-RAS. Et dans ce dernier, d'autres données hydrauliques importantes telles que le débit, les coefficients de Manning et la pente moyenne du cours d'eau sont saisies. On exécute ensuite HEC-RAS pour calculer l'élévation et l'inondation en supposant les caractéristiques d'un débit constant et uniforme. Les résultats obtenus dans HEC-RAS sont validés par le critère de Nash avant d'être exportés et visualisés dans ArcGIS.

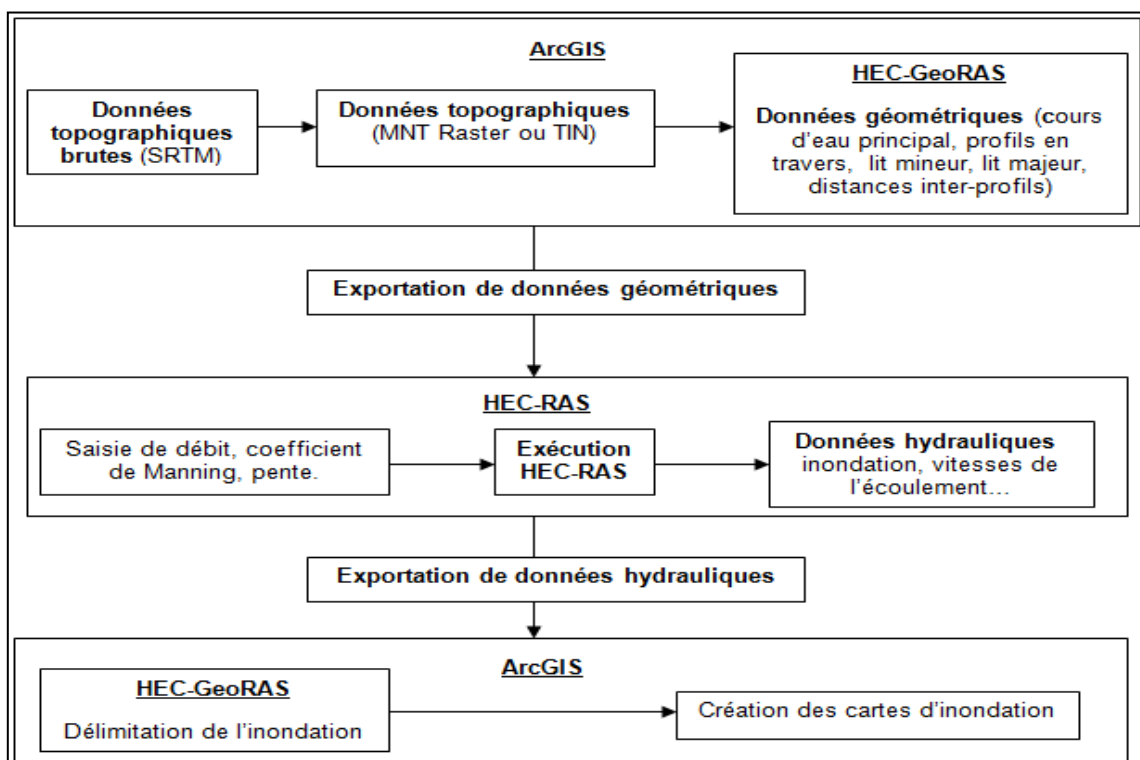


Fig. 2. Organigramme méthodologique HECRAS-ArcGIS

Dans la phase de détermination des risques, HEC-GeoRAS a été utilisé pour extraire des données de profil de surface de l'eau de HEC-RAS et l'intégrer dans une carte MNT grâce à ArcGIS. Via HEC-GeoRAS, cette étendue de la surface d'eau générée selon la différence d'altitude a permis de déterminer la limite des zones inondées dans le MNT. La superposition de cette étendue de l'inondation et les positions géographiques des zones habitées, a permis de détecter des zones habitées à risque d'inondation.

2.2.4 CONDITIONS D'APPLICATION

Le régime permanent a été adopté pour faire ce travail. Il est caractérisé par un écoulement uniforme et permanent qui se caractérise par une constance des paramètres hydrauliques. Ainsi, la vitesse moyenne, le tirant d'eau, et donc le débit restent invariables dans les différentes sections du canal le long de l'écoulement. Les lignes de courants sont rectilignes et parallèles et la pression verticale peut donc être considérée comme hydrostatique. La pente de fond, la pente de la surface libre et la pente de la ligne d'énergie sont parallèles.

En outre, on considère que les stations limnimétriques mesurent la totalité de l'écoulement de la vallée tout en négligeant les apports des affluents ou des diffluent du bief, mais aussi les prélèvements d'eau.

Pour détecter les zones à risque d'inondation, nous avons supposé que le tronçon Bakel-Matam n'est doté d'aucune digue, ni infrastructure de protection. De même, les apports locaux ainsi que les prélèvements sur ce tronçon ont été négligés. La présence des points de levées au bord du lit mineur a été opté afin d'éviter l'eau de se retrouver dans le lit majeur alors que, le lit mineur n'est pas submergé.

3 RÉSULTATS DE LA SIMULATION DES CRUES DANS LA VALLÉE

3.1 CALAGE-VALIDATION AVEC HEC-RAS

Le calage-validation avec HEC-RAS a consisté à déterminer les paramètres optimaux de ce modèle produisant les meilleures hauteurs maximales (**Hmax sim**) de la station de Matam à partir des débits maximums observés (**Qmax obs**) à la station de Bakel. A cet effet, la série des débits a été divisée en deux dont l'une allant de 1969 à 1987 et l'autre de 1988 à 2006. La première série a servi de calage et la seconde de validation du modèle HEC-RAS. Avec un régime supposé permanent, la pente des hautes eaux (4.5 cm/km) définie par [20] est retenue lors de ce calage-validation.

Le critère de Nash a permis de calibrer le modèle HEC-RAS en déterminant les coefficients de Manning appropriés pour chaque débit injecté (tableau 1).

Tableau 1. Valeurs de Manning et les valeurs de Nash de calage et de validation

Débits caractéristiques	Manning	Nash calage (1967-87)	Nash validation (88-2006)
Qmax	0.0142	0.91	0.88

Les résultats graphiques de la simulation des hauteurs de Matam à partir des débits observés à Bakel sont illustrés sur les figures 3 et 4 qui représentent respectivement les résultats du calage et les résultats de la validation.

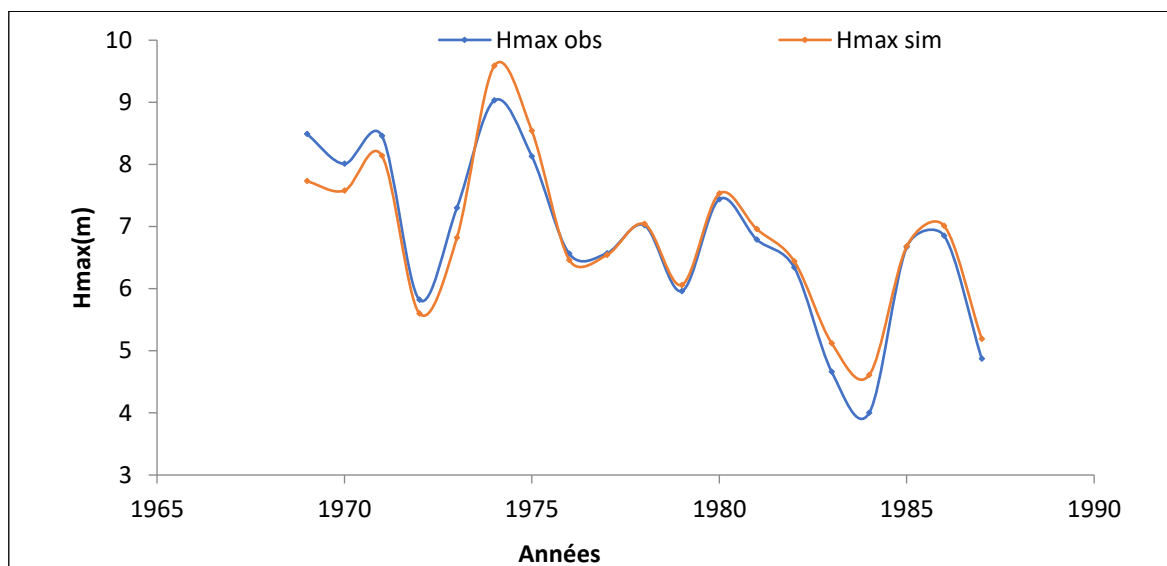


Fig. 3. Comparaison des hauteurs caractéristiques observées et simulées lors du calage

En calage la valeur de Nash de 0,91 montre une bonne corrélation entre les valeurs calculées et observées. C'est le même constat qui a été noté en validation avec un Nash de 0,88 même si celui-ci est beaucoup plus élevé en calage.

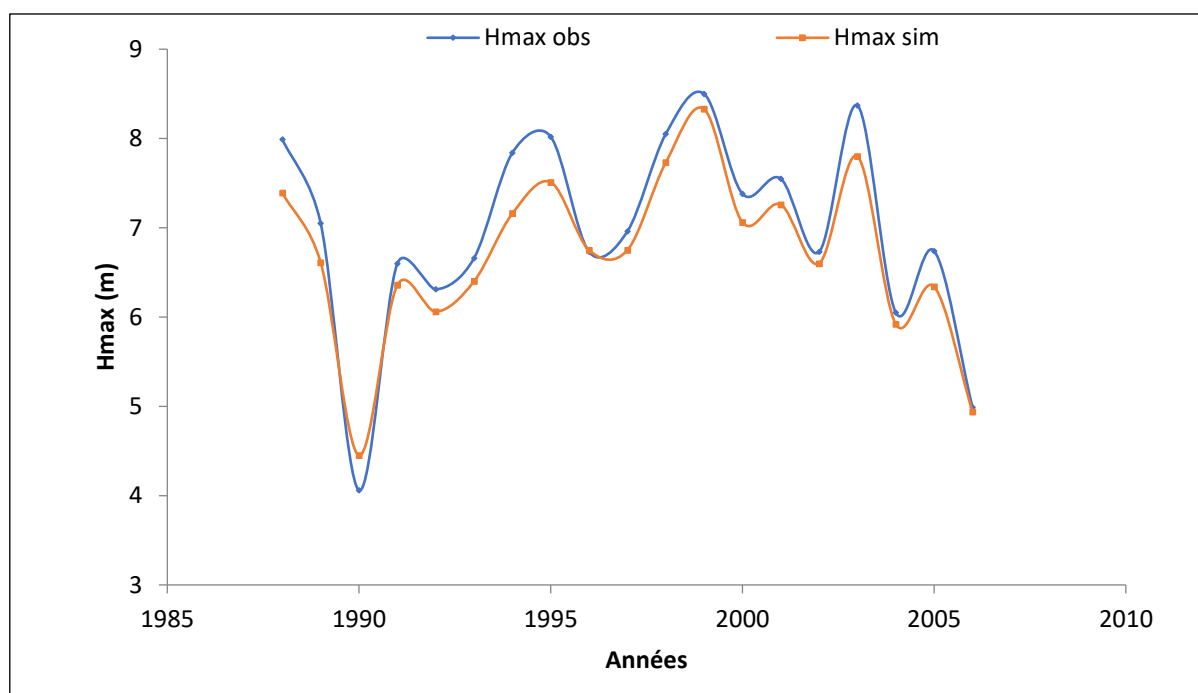


Fig. 4. Comparaison des hauteurs caractéristiques observées et calculées lors de la validation

Ainsi les coefficients du modèle obtenus pour lors du calage-validation des Hmax seront retenus pour cartographier les risques d'inondation.

3.2 ZONES À RISQUE AVEC LE DÉBIT CENTENNAL

Avec le de débit décennal Q100 (5000 m³/s) nous avons une hauteur maximale est 21,9m, une vitesse maximale de 5,42m/s soit 19,51 km/h et une vitesse minimale de 0,084m/s ou 172,8 m/h. Dans ces conditions, le temps de propagation du front de l'eau de la crue centennale sur bief Bakel-Matam (172 km) est de 8,81h alors que, celui des hauteurs maximales pour ce même

débit est 23,7 jours. Pour ce débit, le nombre de village vulnérables est de 9, il s'agit des villages de BAPALEL, DIELLA, GANGUEL-SOULE, PADALAL, ORNDOLDE, TUABOU, BOW, THIALY-MAKA, THIALY-SOUBALO (fig. 5), avec une population de l'ordre de 15057 habitants qui pourrait être sinistrée. En outre, l'occupation de l'inondation de certaines zones aménagées pourrait engendrer des pertes de récoltes dans les zones de culture.

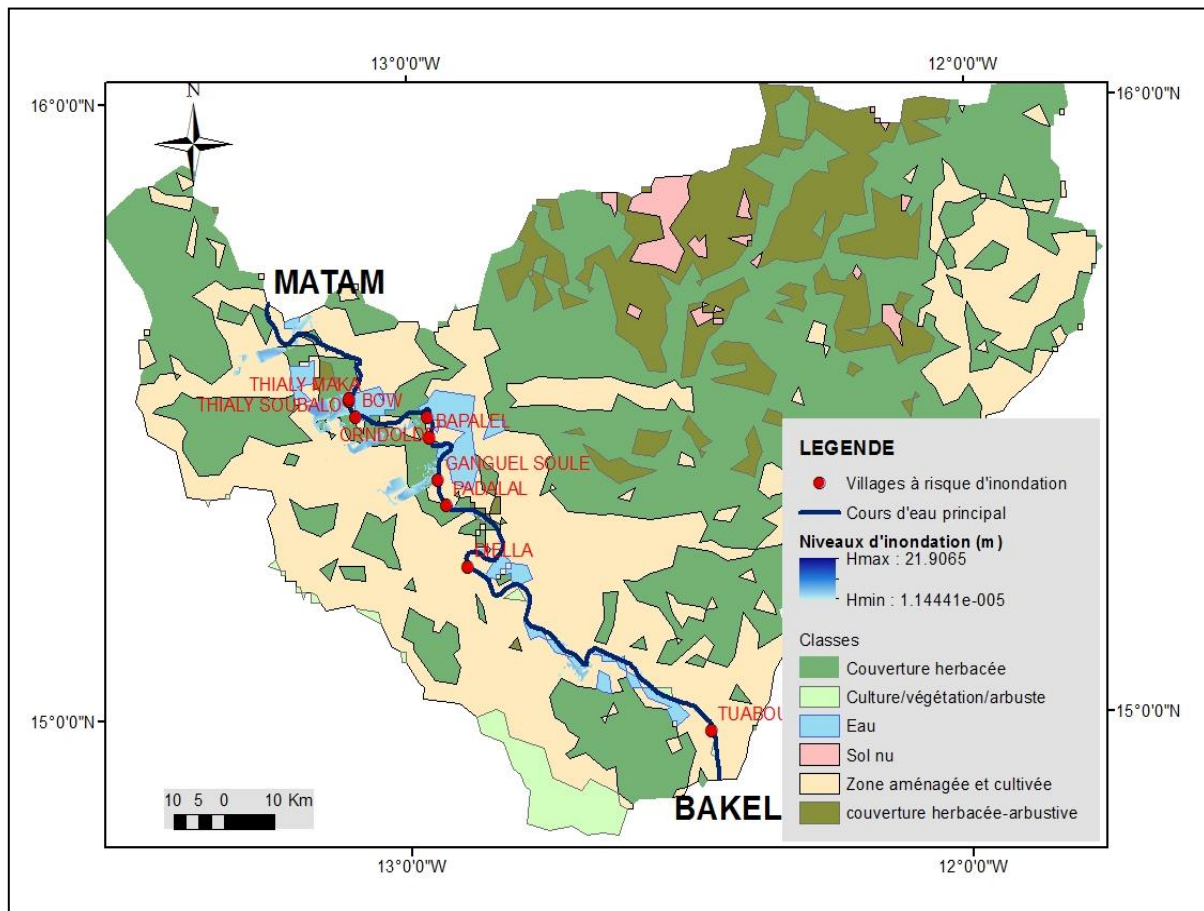


Fig. 5. Carte des villages à risque d'inondation de la Q100

3.3 ZONES À RISQUE AVEC LA CRUE CATASTROPHIQUE MOYENNE (CCM)

Pour la CCM (8000m³/s), nous avons obtenu une hauteur maximale est 22,76m, une vitesse maximale de 5,83m/s soit 20,99 km/h et une vitesse minimale de 0,065m/s ou 234 m/h. Dans ces conditions le temps de propagation du front de l'eau de la CCM sur bief Bakel-Matam est de 8,19h alors que, celui des hauteurs maximales pour ce même débit est 30,62 jours. Pour ce débit, le nombre de villages à risque détectés est 14 (fig.6), ce qui pourrait toucher à une population d'environ 24 071. Il s'agit des villages de: BALLEL, DIELLA, GANGUEL-SOULE, PADALAL, SINTHIANE-DIOUDE, BOW, THIALY-MAKA, THIALY-SOUBALO LOBALY, DEMBANKANE, TUABOU, GANDE, BAPALEL, ORNDOLDE.

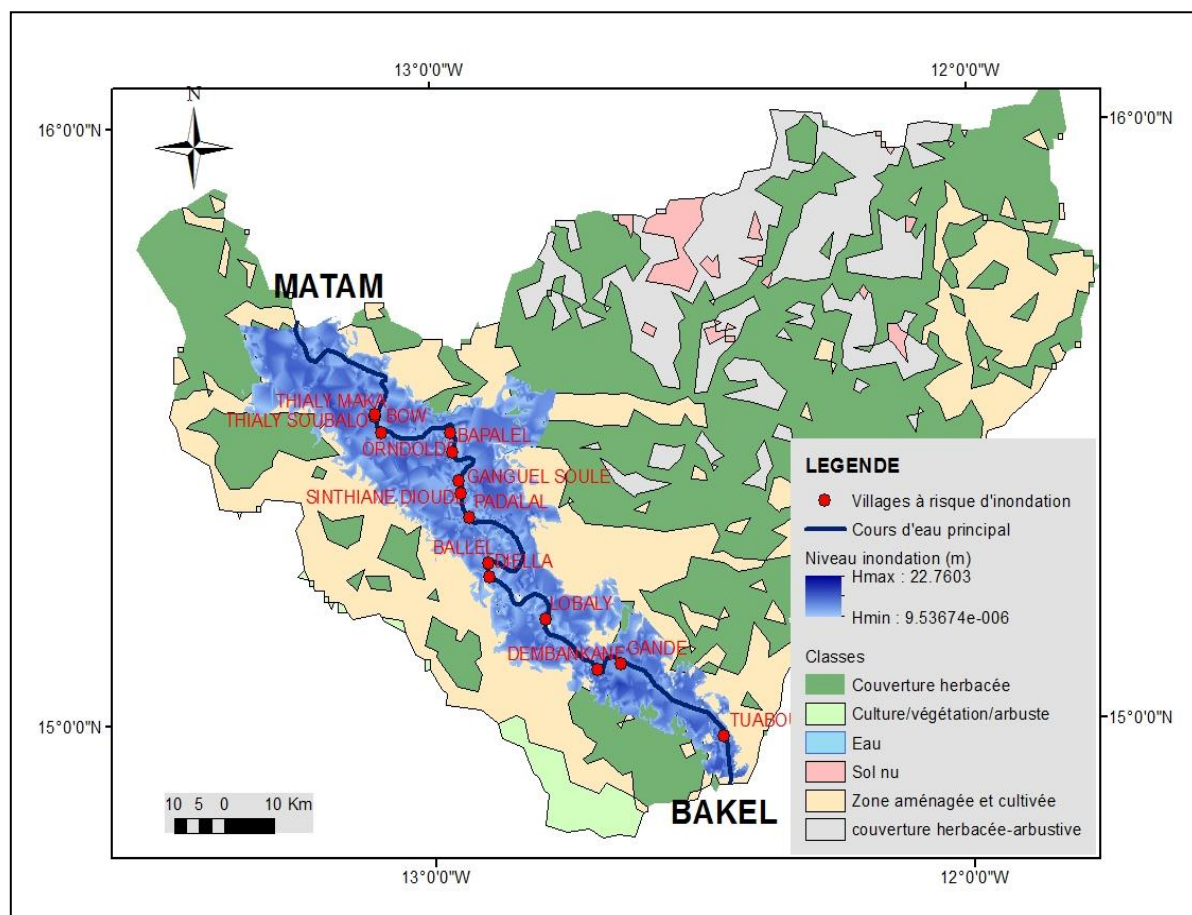


Fig. 6. Carte des villages à risque d'inondation

3.4 CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTES CRUES

La simulation de la propagation des crues dans la vallée du fleuve Sénégal a permis de déterminer les caractéristiques engendrées par chaque crue (tableau 2). On constate que pour la vitesse moyenne décroît quand le débit augmente, ce qui entraîne un accroissement du temps de propagation lorsque le débit augmente. La vitesse moyenne de propagation de Q100 calculée à partir de celles de sections transversales est de 1,26 m/s (4,54 km/h) et le temps pour atteindre l'aval est 1,58 jour. Sa rapidité dans la propagation s'explique par le faible débordement des eaux du lit mineur. La vitesse moyenne pour le CCM calculée à partir de celle des sections transversales est de 0,50m/s (1,8 km/h) avec une durée de propagation de 3,98 jours. Sa lenteur dans la progression s'explique par le débordement du lit mineur et l'occupation du lit majeur par les eaux lors de cette crue. Cette occupation va impacter les cultures dans certaines zones aménagées envahies par cette crue. Les hauteurs maximales varient aussi en fonction du débit. En effet, les hauteurs maximales augmentent quand les débits injectés augmentent.

Tableau 2. Caractéristiques des crues

Crue (m ³ /s)	Niveau inondation (m)	Vitesses extrêmes (m/s)	Vitesse moyenne (m/s)	Vitesse moyenne (km/h)	Durée moy (h)	Durée moy (jour)
Q100	Hmin: 1,14E-5	Vmax: 5,42	1.260	4,536	37,919	1,58
	Hmax: 21,9	Vmin: 0,084				
CCM	Hmin: 9,54E-6	Vmax = 5.831	0.501	1,804	95,344	3,98
	Hmax: 22,76	Vmin = 0.065				

3.5 COMPARAISON DES RÉSULTATS L'OUTIL ET LA RÉALITÉ SUR LE TERRAIN

Pour tester l'efficacité de notre outil de simulation, nous avons effectué une recherche webographie pour savoir si les villages retenus par modèle ont une fois subi des inondations. Pour cela il faut d'abord rappeler que dans la réalité, des crues de type catastrophique comme les CCM, n'ont jamais été rencontrées dans la vallée du fleuve Sénégal. Donc, il sera difficile de vérifier la vulnérabilité de certains villages impactés par de telles crues. Cependant, pour les crues normales exceptionnelles comme Q100, nous assistons parfois à des crues qui leur sont similaires et cela est souvent récurrent ces dernières années. Lors de ces crues, beaucoup de villages du Walo considérés comme à risque avec Q100 ont été cités à plusieurs reprises comme étant envahis par les eaux du fleuve. Par exemple, en 2012 selon Sud Quotidien (2012), la zone du Dandé Mayo a été envahie par les eaux du fleuve Sénégal suite à de fortes pluies ce qui a pu engendrer des inondations au niveau des villages de Garli, Bow, et Thialy si des mesures de protection sérieuse n'étaient pas prises. En 2019, les pluies diluviennes couplées aux apports des affluents non contrôlés, ont engendré à Bakel une montée des eaux et un dépassement de la cote d'alerte le 27 août 2019, entraînant des débordements du fleuve dans la région autour de Bakel et Gouraye [31]. En cette même année, le maire de Diawara, a lancé un véritable SOS pour sa commune, complètement, envahie par les eaux suite au débordement du Fleuve Sénégal [32]. Cette même source indique que suite à de fortes pluies, le débordement des eaux du fleuve Sénégal a provoqué une inondation à Ballou, Aroundou, Yaféra, Golmy, Koungany, Bakel, Diawara, bref tous les villages qui se situent sur la rive gauche du fleuve Sénégal. En 2003, [30] a informé que du fait du débordement du bras du fleuve le "Dioulol", les eaux ont envahi plusieurs périmètres irrigués des villages de Bow, Thialy, Navel, Garli, etc. Cela a fait tomber des maisons un peu partout dans la zone et des dégâts à Matam. Selon les premières estimations faites par la délégation de la SAED de Matam, la superficie inondée par ces eaux a atteint les cent hectares de cultures. Donc, tout ce témoignage vient montrer combien de fois beaucoup de villages du Dandé-Mayo sont vulnérables face aux inondations dues au débordement du fleuve et de ses défluent. Et non n'étaient des digues que contiennent certains villages, le débordement des eaux du fleuve causerait beaucoup d'impact dans cette zone. Ainsi, ces résultats, avec les témoignages faits, montrent clairement que les systèmes d'information géographiques (SIG) couplé avec le modèle HEC-RAS pourraient constituer un outil efficace pour déterminer les risques d'inondation dans un cours d'eau, même si quelque part des incohérences mineures ont été notées.

4 PLAN DE GESTION DU RISQUE D'INONDATION PAR DES MESURES NON-STRUCTURELLES

Le couple HECRAS-ArcGIS peut être utilisé pour la prévision comme pour cartographie. La connaissance du débit caractéristique en amont de la vallée (Bakel) permet de prévoir celui en aval (Matam). Dans ce cas, il peut jouer le rôle de modèle de prévision. Par ailleurs, il peut aussi jouer le rôle de cartographie, car la connaissance du débit en amont permet de délimiter l'étendue de l'inondation. Et les cartes obtenues pourront être utilisées pour la gestion des risques d'inondation.

- Calibration et validation du modèle
- Outil de prévision
 - Alerte et annonce de crue
 - Information et éducation publique;
 - Organisation des secours;
- Carte d'inondation avec ArcGIS
 - Lois et contrôle d'urbanisme;
 - Acquisition et relocalisation;
 - Adaptation;

Ce dispositif de gestion des risques d'inondation est illustré dans la figure 7.

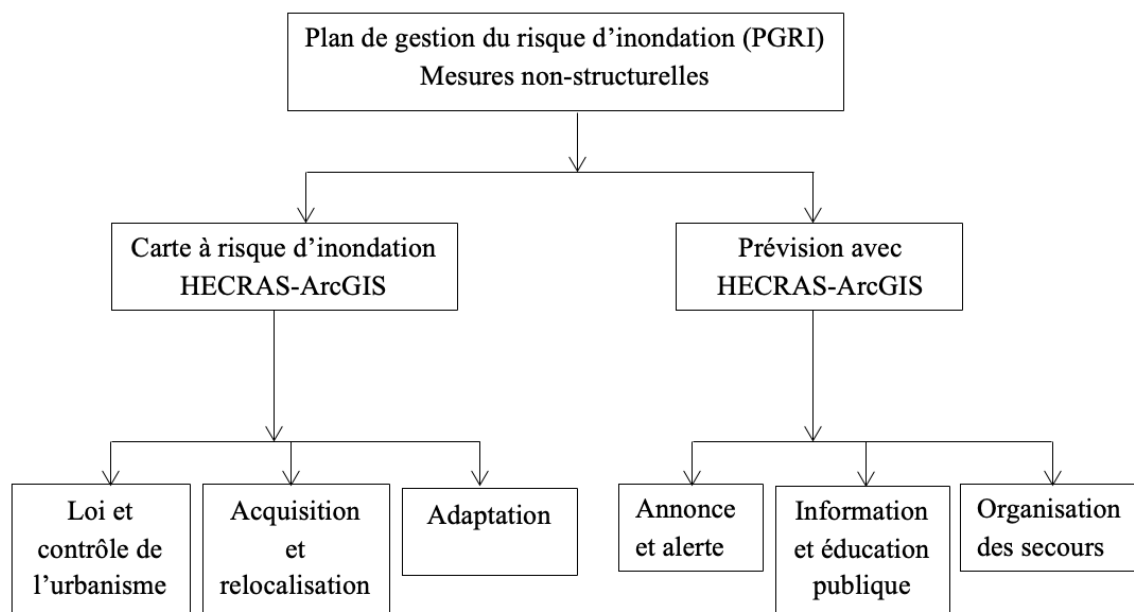


Fig. 7. PGRI avec des mesures non structurelles

5 CONCLUSION

Nous avons simulé la propagation de la crue dans le bief Bakel-Matam en utilisant les SIG (HEC-GeoRAS via ArcGIS) et le modèle Hydraulique (HEC-RAS). Ce travail a été fait en régime permanent et nous a permis de cartographier le risque d'inondation sur ce tronçon Bakel-Matam dans la vallée du fleuve Sénégal pour différentes crues. Les villages à risque ont été détectés pour chaque crue injectée. Les caractéristiques pour chaque crue (hauteur, vitesse et temps de propagation) ont été analysées. Les résultats prometteurs obtenus ont montré que le couple HECRAS et SIG peut être efficace pour la cartographie et la gestion des crues dans la vallée du fleuve Sénégal. En outre, il pourrait être un outil efficace pour l'aide aux aménagistes dans la planification. Cependant, il serait nécessaire de tenir compte de certains facteurs comme les pertes d'eau par évaporation ou prélèvement, mais aussi les précipitations pour améliorer les résultats.

REFERENCES

- [1] Anh Tu Ngo (2014). Evaluation environnementale du risque d'inondation dans le delta du fleuve Ha Thanh (centre Viêt-Nam). Géographie. Université d'Orléans, 2014. Français. NNT: 2014ORLE1129. tel-01004411.
- [2] Artelia. (2018). PGIRE II - Vulnérabilité du bassin du fleuve Sénégal face aux changements climatiques: R2 – Rapport du diagnostic d'évaluation de la vulnérabilité; R3 - Rapport du plan d'adaptation et de renforcement de la résilience du bassin. Artelia Eau & Environnement, Ref: 8411203. Commandée par: Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal (OMVS).
- [3] Arturo S. Leon (2021). Tutorial on using HEC-GeoRAS 10.6 with ArcGIS 10.6 and HEC-RAS 5.0.7 for flood inundation mapping in Steady and Unsteady Flow Conditions (1D and 2D); Updated on January 28, 2021.
- [4] Bader J. C. (1992). Courbe de remous du barrage de Diama sur le Sénégal: Modèle de prévision des cotes aux stations influencées par la retenue; Hydrol. continent., vol. 7, n° 2, 1992: 83-98.
- [5] Bader J. C. (2016). Prévision saisonnière du débit naturel de crue du fleuve Sénégal à partir des prévisions pluviométriques du modèle de circulation générale de l'atmosphère ARPEGE; Evaluation des prévisions effectuées en temps réel de 2005 à 2015.
- [6] Bader J. C., Piedelievre J. P. Et Lamagat J. P. (2006). Prévision saisonnière du volume de crue du Fleuve Sénégal: utilisation des résultats du modèle ARPEGE Climat; Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 51 (3) juin 2006.
- [7] Barbe Audrey, Colbert Elise, Diallo Aminata, Rabouille Fabien (2017). Une analyse de la gestion des eaux pluviales au Sénégal; Rapport d'analyse réalisé dans le cadre du projet EPUR – Eaux Pluviales et Résilience Urbaine, financé par FIND, le fonds d'innovation pour le développement.

- [8] Camara M. M. B. (2008): impacts des aménagements sur les zones littorales: l'exemple de l'ouverture de la brèche sur la langue de barbarie (grande cote du Sénégal); actes du colloque international pluridisciplinaire «le littoral: subir, dire, agir» - lille, France, 16-18 janvier 2008.
- [9] Champredonde R. (2006). Modélisation, Spatialisation de l'étendue d'une crue, Applications au bassin de la Lèze; Rapport de Stage Master 1Eaux Sols Environnement.
- [10] Crosier Scott (2005). Geocoding in ArcGIS: ArcGIS 9 Paperback – Sept. 1 2005.
- [11] Fosu C., Forkuo E. K. et Asare M. Y. (2012). River Inundation and Hazard Mapping: a Case Study of Susan River – Kumasi. Global Geospatial Conference. Québec City, Canada.
- [12] GRDR Migration-Citoyenté-Développement (2014). Etude La dimension locale de la dialectique Migration et développement; LE CAS F RANCE - S ENÉGAL.
- [13] Guilamoto Christophe z. (1991). Démographie et développement dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal«. (ORSTOM - DAKAR). Séminaire International, Abidjan (CIV), 1991/11/26-28.
- [14] Hec-Ras 3.1.3, 2005. User manual, 377p.
- [15] Hec-Ras 3.1.3. (2005). Hydraulic reference, 248p.
- [16] Hec-Ras 4.1 (2010). River analysis system, applications guide.
- [17] Hec-Ras. (2005). Guide de laboratoire, école de technologie supérieure, université de Québec, 19p.
- [18] Kovacs Y., Doussin N., Gaussens M. (2017). Risque d'inondation et villes des pays en développement; NOTES TECHNIQUES.
- [19] Lamagat J. P., Bader J. C.: (2003). Gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Sénégal Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs.
- [20] Lamagat J.P., 1989-b. Modèle de propagation des crues du fleuve Sénégal. Calage des paramètres. OMVS, Orstom, Dakar.
- [21] MEDDF- Ministère de l'Écologie et du Développement durable France (2004). Les inondations Août 2004.
- [22] Merwade V., (2010). Velocity Mapping in Rivers and Floodplain using HEC-GeoRAS School of Civil Engineering.
- [23] Mettrop I.S, Wymenga E., Klop E., Bekkema M. (2019). Impacts du changement climatique dans le bassin du fleuve Sénégal: une évaluation spatiale de la vulnérabilité. A&W-rapport 2253, Altenburg & Wymenga conseillers écologiques, Feanwâlden. Commandée par: Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal (OMVS).
- [24] Michael Minami (2000). Utilisation d'ArcMap.
- [25] Nandalal K.D.W. (2009). Use of a hydrodynamic model to forecast floods of Kalu River in Sri Lanka; Journal of Flood Risk Management pages 151–158, September 2009.
- [26] OMVS (2009): SDAGE du fleuve Sénégal.
- [27] Scott Matthew (1998). Détermination de l'extension des superficies inondées dans le lit majeur par l'utilisation de modèles hydrodynamiques simplifiés: application à la vallée du fleuve Sénégal; mémoire de thèse; ORSTOM 1998.
- [28] WMS 8.4 Tutorial, Aquaveo (2011). Hydraulics and Floodplain Modeling – Managing HEC-RAS Cross Sections.
- [29] Zidane K. (2008): Cours initiation ArcGis 9.1.
- [30] Allafria.com (2003): Sénégal: Forte montée des eaux du fleuve à Matam: 100 hectares de cultures inondées, 156 chèvres emportées à Ouldé; <https://fr.allafria.com/stories/200308190735.html>.
- [31] Ndarinfo.com (2019): Hausse de la crue sur le fleuve Sénégal: l'OMVS invite les populations de la vallée et du Delta « à rester vigilantes » https://www.ndarinfo.com/Hausse-de-la-crue-sur-le-fleuve-Senegal-l-OMVS-invite-les-populations-de-la-vallee-et-du-Delta-a-rester-vigilantes_a26546.html.
- [32] Soninké TV (2019): Inondations à Bakel: Des quartiers et des villages envahis par les eaux; <http://soninke.tv/2019/08/30/inondations-a-bakel-des-quartiers-et-des-villages-envahis-par-les-eaux/>.