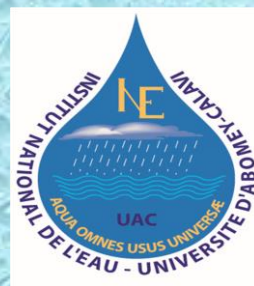


UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES
RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

AGOLI-AGBO Adonis P. B.

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

Thème :

=====

**EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES
MODELES NUMERIQUES DE TERRAIN SUR LE
BASSIN VERSANT DE L'OUEME A BETEROU**

=====

Maître de mémoire :

Dr Djigbo Félicien BADOU



PROMOTION : 2019 - 2022

DEDICACES

A mon père et à ma mère pour tant d'amour à mon égard !

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas pu se réaliser sans le concours très constructif d'un certain nombre de personnes. Qu'il me soit permis, ici, d'adresser mes vifs remerciements au :

- Dr. Djigbo Félicien BADOU pour m'avoir proposé ce thème passionnant, pour sa disponibilité et pour toute l'inspiration dont j'ai bénéficié tout au long de ce travail, recevez mes profondes et sincères reconnaissances.
- Tous les enseignants de la Licence Professionnelle en Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau à l'Institut National de l'Eau, recevez ma profonde gratitude, vos efforts ne sont pas vains ;
- Tous les Honorables membres du Jury qui ont apprécié ce modeste travail ; Merci pour le temps sacrifié au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- Tous mes camarades de promotion pour l'ambiance et l'entraide qui ont régnées tout au long de notre formation, bonne suite à tous ;
- Tous les membres de ma famille, qui m'ont toujours encouragé dans mes études et grâce à qui j'ai grandi dans un milieu épanouissant.

RESUME

L'existence d'une multitude de modèles numériques de terrain (MNT) laisse croire que tous ont une aptitude équivalente en ce qui concerne leur usage pour la modélisation hydrologique. Cependant, les sorties d'une telle modélisation peuvent être influencées par le choix du MNT. Cette étude a pour objectif d'évaluer la performance des modèles numériques de terrain sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. Cette évaluation a consisté à réaliser une modélisation hydrographique à partir des MNT ALOS, SRTM, ASTER et Copernicus d'une même résolution spatiale (30m) puis à les comparer entre eux. En absence d'une référence concrète pour effectuer les comparaisons, cette étude s'est basée sur des critères tels que le nombre de cellules considérées et la superficie qui déterminent la finesse du réseau hydrographique et un réseau hydrographique obtenu à partir de Google Earth. Les résultats montrent une ressemblance entre les réseaux hydrographiques obtenus à partir des MNT ALOS, SRTM et ASTER qui diffèrent du réseau hydrographique généré par le MNT Copernicus qui à son tour présente beaucoup plus de similitude avec le réseau hydrographique de référence utilisé. Il semble donc plus indiqué d'utiliser le MNT Copernicus pour la modélisation hydrologique.

Mots clés : Modèles Numériques de Terrain, Modélisation hydrographique, ASTER, ALOS, SRTM, Copernicus

ABSTRACT

The existence of a multitude of digital terrain models (DTMs) suggests that they are all equally suitable for use in hydrological modelling. However, the outputs of such modeling can be influenced by the choice of DTM. The aim of this study was to evaluate the performance of DTMs in the Ouémé to Bétérou watershed. This evaluation involved hydrographic modelling using ALOS, SRTM, ASTER and Copernicus DTMs of the same spatial resolution (30m), then comparing them with each other. In the absence of a concrete reference for making comparisons, this study was based on criteria such as the number of cells considered and the surface area, which determine the fineness of the hydrographic network, and a hydrographic network obtained from Google Earth. The results show a similarity between the hydrographic networks obtained from the ALOS, SRTM and ASTER DTMs, which differ from the hydrographic network generated by the Copernicus DTM, which in turn is much more similar to the reference hydrographic network used. It therefore seems more appropriate to use the Copernicus DTM for hydrological modelling.

Keywords: Digital Elevation Models, hydrographic modeling, ASTER, ALOS, SRTM, Copernicus.

LISTES DES SIGLES ET ACRONYMES

SRTM	Shuttle Radar Topography Mission (Mission Topographique Radar de la Navette Spatiale)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace)
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency (Agence Nationale de Renseignement Géospatial)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (Centre Aérospatial Allemand)
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency (Agence d'Exploration Aérospatiale Japonaise)
ALOS	Advanced Land Observation Satellite (Satellite Avancé d'Observation Terrestre)
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (Radar à Ouverture Synthétique de type Phased Array en Bande L)
ASTWBD	ASTER Global Water Bodies Database (Base de Données Mondiale des Corps d'Eau de l'ASTER)
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Radiomètre Spatial Avancé à Émission Thermique et Réflexion)
MNT	Modèle Numérique de Terrain
INSAE	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Ensembles hydrographique du Bénin	6
Figure 2: Localisation du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou	6
Figure 3: : Schéma de l'algorithme Deterministic eight neighbour,.....	14
Figure 4: Délimitation du MNT SRTM suivant le rectangle équivalent.....	16
Figure 5: Délimitation du MNT Copernicus suivant le rectangle équivalent	17
Figure 6: Délimitation du MNT ALOS suivant le rectangle équivalent	17
Figure 7: Délimitation du MNT ASTER suivant le rectangle équivalent.....	18
Figure 8: Extraction du réseau hydrographique pour 1800000 cellules et une superficie 1694 Km ²	19
Figure 9: : Extraction du réseau hydrographique pour 900000 cellules et une superficie 846,8 Km ²	19
Figure 10: Extraction du réseau hydrographique pour 100000 cellules et une superficie 94,08 Km ²	20
Figure 11: : Le réseau hydrographique obtenu par Google Earth	21

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des MNT utilisés.....	12
Tableau 2: Paramètres et seuils utilisés.....	15

TABLES DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
LISTES DES SIGLES ET ACRONYMES	v
LISTES DES TABLEAUX	vii
TABLES DES MATIERES	viii
INTRODUCTION GENERALE	1
1. Contexte de justification	1
2. Questions de recherche	2
3. Hypothèses de travail	2
4. Objectifs de l'étude	2
5. Structure du mémoire	2
6. Revue de littérature	3
Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes	5
1.1. Introduction	5
1.2. Milieu d'étude	5
1.2.1. Situation géographique	5
1.2.2. Relief, hydrographie et hydrologie	7
1.2.3. Contexte géologique et hydrogéologique	7
1.2.4. Climat	9
1.2.5. Végétation	9
1.2.6. Activités socio-économiques	10
1.3. Données	10
1.4. Matériel	12
1.5. Méthodologie	12
1.5.1. Description de l'algorithme D8	13
1.5.2. Paramètres de l'algorithme D8	14
Chapitre 2 : Résultats et Discussion	16
2.1. Introduction	16
2.2. Présentation des MNT	16
2.3. Modélisation hydrographique	18

2.4. Discussion	22
<i>Conclusion et perspectives</i>	23
<i>Références bibliographiques</i>	25

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte de justification

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique. Ce modèle peut être composé d'entités vectorielles ponctuelles (points cotés), linéaires (courbes de niveau), surfaciques (facettes) ou représenté en mode raster (cellules). Ils sont très importants pour les sciences de la terre car ils permettent de calculer de nombreux paramètres utiles à la conception de modèles physiques. Avec diverses fonctions en hydrologie ils s'avèrent indispensable dans le dimensionnement d'ouvrages sur un bassin versant, la délimitation d'un bassin versant et l'extraction de son réseau hydrographique et la détermination de tous les paramètres annexes au bassin versant (superficie, pente, périmètre...). Il est donc important de disposer de MNT fiables et précis. Mais ceci reste un défi auquel la communauté scientifique est confrontée. En effet en Afrique et dans la sous-région les MNT les plus précis et disponibles en libre accès n'ont qu'une résolution spatiale de 30 m. Ils proviennent de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) généré à échelle globale, de l'ensemble de données géospatiales Copernicus, de l'Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), de l'ensemble de données mondiales de l'Advanced Land Observation Satellite (ALOS)... Cependant il n'est pas aisé de choisir parmi tous ces modèles disponibles car générés avec différents outils et techniques, certains se montrent plus fiables que d'autres. C'est à partir de ce moment qu'entrent en jeu divers critères et paramètres visant à identifier lequel des MNT à disposition est adapté à telle ou telle étude.

L'impact de la résolution du MNT (ALOS PALSAR, SRTM, ASTER) sur le rendement du ruissellement a été évalué en Iran notamment sur le bassin versant du barrage de Mahabad (Nazari-Sharabian et al., 2019). Une étude portant sur les effets des sources de MNT USGS NED, SRTM, LIDAR sur les applications hydrologiques a également été effectuée sur une partie de la rivière Kansas aux Etats-Unis (Li et Wong, 2010), pour ne citer que ceux-là. Néanmoins, il n'existe pas vraiment d'étude axée sur l'évaluation des performances des MNT sur le bassin versant de l'Ouémé. C'est pour répondre à cette difficulté de choix parmi les MNT qu'il est proposé dans cette étude une évaluation de la performance des MNT les plus précis en libre accès à savoir les MNT à 30 m de résolution spatiale par la modélisation du réseau hydrographique à partir de ces MNT. Elle s'intitule : **“Evaluation de performances des modèles numériques de terrain sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou”**

2. Questions de recherche

Les questions auxquelles répond cette étude sont les suivantes :

- Quel est le MNT en libre accès le plus fiable ?
- Quels sont les paramètres qui entrent en jeu pour indiquer cette fiabilité ?

3. Hypothèses de travail

Pour cette étude, nous avons émis une hypothèse unique suivant laquelle les MNT SRTM et ASTER, souvent utilisés par la plupart des chercheurs de la sous-région africaine, sont beaucoup plus performants que tout autre MNT.

4. Objectifs de l'étude

L'objectif général de cette étude est d'évaluer la fiabilité des MNT sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- Identifier les modèles numériques de terrain en libre accès disponibles pour la sous-région ;
- Générer le réseau hydrographique pour chacun des MNT ;
- Comparer les MNT sur la base de la finesse du réseau extrait.

5. Structure du mémoire

Le présent mémoire commence d'abord par une introduction générale présentant le contexte et la justification de notre thème d'étude, la revue de littérature, les questions de recherche, les objectifs du travail ainsi que les hypothèses. La suite du mémoire s'articule autour de deux grands chapitres à savoir :

- Le premier chapitre donne un aperçu de la zone d'étude et présente les données utilisées ainsi que la méthodologie adoptée ;
- Le deuxième chapitre présente les résultats obtenus ainsi que la discussion.

Au terme de ce mémoire, on trouve une conclusion générale accompagnée de quelques perspectives.

6. Revue de littérature

L'évaluation de la performance des modèles numériques de terrain est un sujet d'intérêt majeur auquel bon nombre de scientifiques se sont intéressés.

J. Charleux Demargne et C. Puech (2000), dans le cadre d'une étude sur l'évaluation de la qualité des MNT sur les applications hydrologiques, ils ont utilisé une méthode de diagnostic de la qualité d'extraction du réseau hydrographique et des limites de bassin versant. Cette méthode a permis de quantifier l'impact des biais de l'algorithme D8 sur les extractions et d'optimiser toute modification du MNT mis en œuvre pour augmenter la fiabilité des résultats. J. Charleux Demargne (2000) a également utilisé les MNT et données d'observations de la terre pour régionaliser un modèle hydrologique de synthèse de type débit-durée-fréquence, afin de caractériser le régime des crues de bassins versants non jaugés. Ce travail de régionalisation a nécessité d'analyser la qualité d'extraction du réseau hydrographique et des limites de bassins versants à partir d'un MNT. Une méthode originale de diagnostic qualité, basée sur la représentation probabiliste du réseau et des limites du bassin, est proposée afin d'évaluer l'impact des biais introduits par l'orientation de la grille numérique sur les calculs.

Li et Wong (2010), dans le cadre d'une étude portant sur les effets des sources de MNT sur les applications hydrologiques ont utilisé des MNT de résolutions différentes pour l'extraction de réseaux fluviaux pour une partie de la rivière Kansas dans un premier temps. Ces mêmes modèles ont ensuite été utilisés pour simuler des inondations. Les résultats ont été comparés entre eux et il a été constaté que la réduction de la résolution (rééchantillonnage des données) entraîne une dégradation dans les performances de l'extraction du réseau fluvial mais nécessairement dans tous les aspects du paysage.

Nazari-Sharabian et al. (2019) ont évalué l'impact de la résolution du MNT sur le rendement du ruissellement sur le bassin versant du barrage de Mahabad en Iran et ont constaté que la sensibilité des valeurs de ruissellement est fonction de la grandeur de la résolution.

Buakhao et Kangrang, (2016) ont eu pour leur part à étudier l'impact de la résolution du MNT sur l'estimation des caractéristiques physiques du bassin versant de Huai-Sai-Khaw en

Thaïlande. Leur travail a montré que la pente varie fortement en fonction du MNT utilisé, et notamment en fonction de la résolution. Au fur et à mesure que la résolution augmente, la pente diminue.

Toutefois il est important de notifier qu'il n'y a pas beaucoup d'études visant à évaluer la qualité des MNT à partir de la modélisation hydrographique. L'évaluation de la qualité des MNT est délicate car elle suppose une référence concrète qui permettrait une comparaison, or souvent, la référence est un autre MNT lui-même perturbé. Compte tenu de la complexité de la tâche, des lacunes des références ou quasiment de leur absence, nous n'avons pas pu accéder aux résultats de travaux effectués préalablement sur l'évaluation de la qualité des MNT à partir d'extractions de réseaux hydrographiques sur le bassin de l'Ouémé.

Chapitre 1 : Données, matériels et méthodes

1.1. Introduction

Le présent chapitre est axé dans une première partie sur la description du cadre d'étude, c'est-à-dire sa situation géographique, son climat, son relief et son hydrographie sans oublier l'occupation de son sol et la pédologie. Dans la seconde partie, il présente l'ensemble des données utilisées, les matériels exploités ainsi que la méthodologie de travail suivie.

1.2. Milieu d'étude

1.2.1. Situation géographique

Le Bénin est situé en Afrique de l'Ouest dans la zone tropicale entre l'équateur et le tropique du cancer entre les parallèles 6°30' et 12°30' de latitude nord et les méridiens 1° et 3°40' de longitude est. Du nord au sud, il s'étend sur 700 Km ; la largeur varie de 125 Km le long de la côte à 325 Km (à la latitude Tanguéta-Ségbana). Le Bénin possède deux types de climat ; au sud, un climat équatorial avec une forte humidité. Alternance de saisons sèches (de novembre à mars et de mi-juillet à mi-septembre) et de saisons des pluies (d'avril à mi-juillet et de mi-septembre à octobre) puis au centre et au nord, un climat tropical. Une saison sèche de novembre à avril et une saison des pluies de juin à septembre. Le pays est divisé en quatre grands bassins hydrographiques. Il s'agit des bassins du Niger, de la volta, du Mono-Couffo, et de l'Ouémé qui est le plus grand bassin du Bénin (**Figure 1**). Le bassin versant de l'Ouémé couvre une superficie de 46 500 km², soit environ 41% de la superficie du pays. Ce bassin est subdivisé en plusieurs sous-bassins versants dont le bassin de Bétérou qui est la zone de la présente étude. Le bassin de l'Ouémé à Bétérou est situé au nord du Bénin et est partagé par trois départements administratifs (Borgou, Donga et Atacora). Il est situé entre les parallèles 9°12' et 10°12' de latitude Nord, d'une part, et les méridiens 1°30' et 3° de longitude Est, d'autre part. Sa superficie est évaluée à 10 083 km² d'après Le Barbé *et al.* 1993 (**Figure 2**). Dix communes partagent le bassin de l'Ouémé à Bétérou. La population totale des 10 communes du bassin est estimée à plus de 1 482 270 habitants (INSAE, 2015) en 2013 (soit 14,8 % de la population nationale).

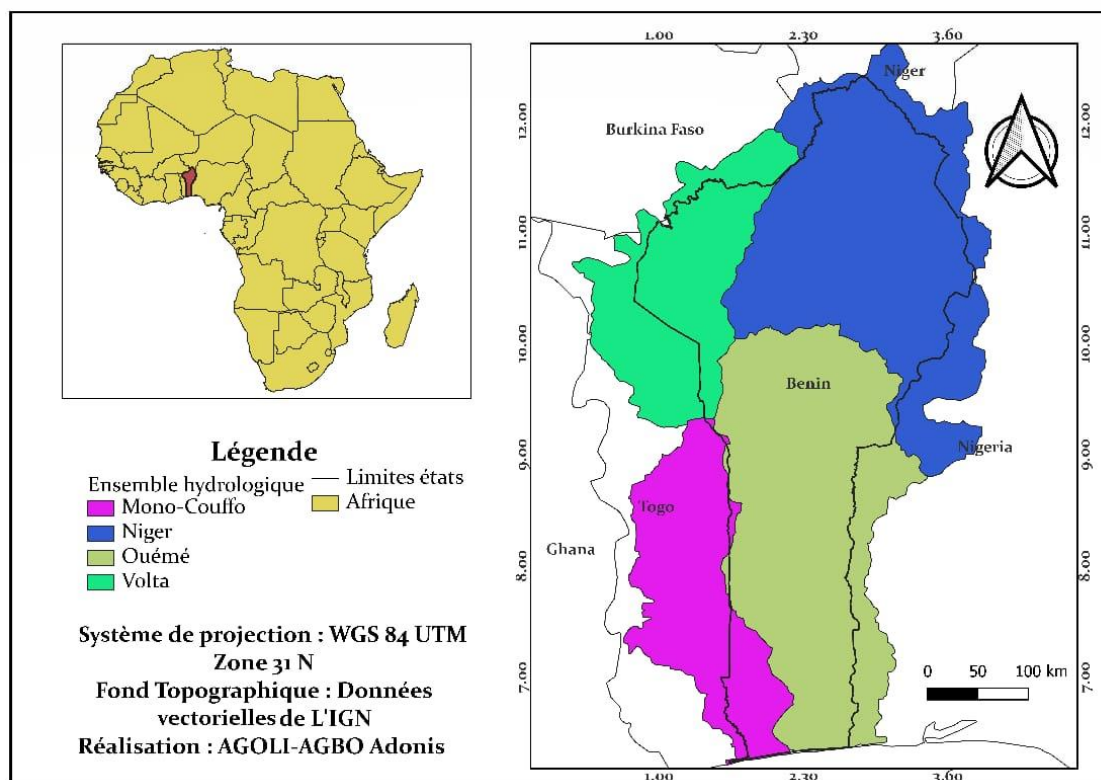


Figure 1: Ensembles hydrographiques du Bénin

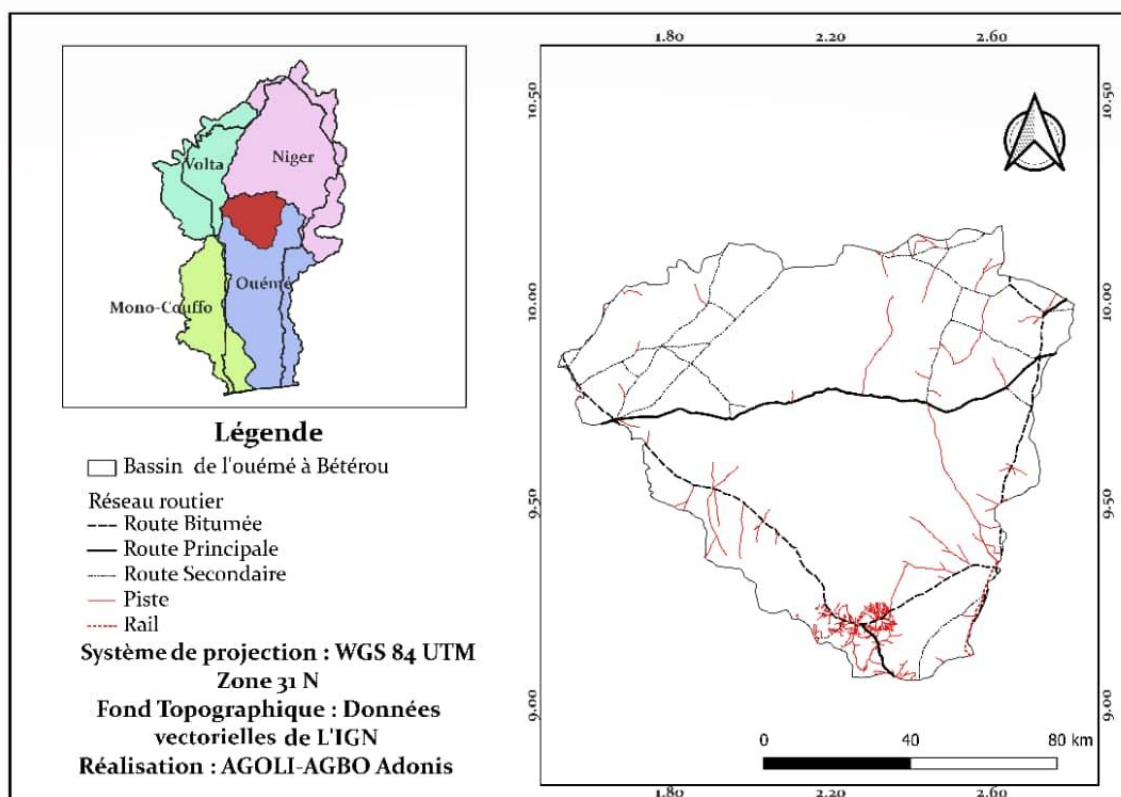


Figure 2: Localisation du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

1.2.2. Relief, hydrographie et hydrologie

Le relief du bassin de l'Ouémé à Bétérou est peu marqué et faiblement vallonné. L'Ouémé à Bétérou suit une direction d'écoulement du nord-ouest vers le sud-est. Situé en tête de bassin, ses pentes locales peuvent être très élevées et restent toujours globalement fortes (1 à 2 m/km) (Le Barbé *et al.* 1993). Les altitudes du bassin sont comprises entre 617 m à l'amont (Ouest) et 241 m à l'exutoire (Sud). Sur le parcours amont où il porte le nom Affon et draine 4 320 km², l'Ouémé monte d'abord vers le nord sur environ 50 km, puis descend vers le sud-est sur 100 km à la confluence avec l'Alpouro (Le Barbé *et al.* 1993). Son parcours aval entre cette confluence et la station hydrométrique de Bétérou est long de 45 km dans le sens nord-sud (Le Barbé *et al.* 1993).

Le réseau hydrographique de l'Ouémé à Bétérou peut être décrit en deux entités dont la description suivante est essentiellement tirée de (Le Barbé, 1993):

- Le réseau rive gauche situé à l'Est de l'axe nord-sud : les rivières suivent ici la direction nord-sud imposée par les formations du socle. D'amont en aval, on peut citer deux affluents : l'Alpouro long de 86 km pour une superficie drainée de 2010 km² et le Yérou-Marou long de 120 km et drainant 2590 km² ;
- Le réseau rive droite situé vers l'Ouest composé des affluents suivants : la Donga (74 km et 1285 km²) et la Wéwé (49 km et 617 km²).

Le réseau hydrographique est dense mais plusieurs rivières du bassin présentent un régime d'intermittence caractérisée par un assèchement en saison sèche et une reprise des écoulements en saison pluvieuse.

1.2.3. Contexte géologique et hydrogéologique

Le Bénin repose largement sur un socle cristallin du Précambrien connu sous le nom de Dahoméen ou bouclier bénino-nigérien et dont 20 % des terres béninoises restantes sont occupées par des bassins sédimentaires (Judex *et al.* 2009). La structure géologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou est essentiellement constituée des granites, des migmatites, des intrusions basiques et du gneiss socle Dahoméen.

Les formations hydrogéologiques du bassin supérieur de l'Ouémé sont constituées de deux types de nappes d'eau souterraine (Zannou 2011). Les premiers réservoirs supérieurs d'altérites se situent dans la zone d'altération sablo-argileuse avec une épaisseur généralement de l'ordre de 10 à 30 m. Leur perméabilité est très faible et généralement de l'ordre de 8×10^{-6} m/s (Vouillamoz *et al.* 2014). Les seconds réservoirs inférieurs de fissures et de fractures sont situés au-dessus des roches saines et sont caractérisés par une zone intensément fissurée et altérée vers le haut avec des fissures et diaclases à pendage variable (Vouillamoz *et al.* 2014). Ceux-ci présentent une épaisseur estimée entre 40 m et 50 m dans les formations cristallines et métamorphiques.

La zone d'étude se situe sur le socle cristallin qui ne renfermerait donc pas d'aquifère continu du fait de l'absence de porosité d'interstice. Ces roches sont quasiment imperméables si elles ne sont pas fissurées ou altérées. Mais suite à l'altération du substratum, un réservoir sus-jacent se développe et contient la nappe des altérites. L'étude des caractéristiques hydrogéologiques du réservoir d'altérite sur le bassin de la Donga (sous-bassin de l'Ouémé à Bétérou), du point de vue de son fonctionnement, concernant à la fois les conditions aux limites (épaisseur du réservoir, position par rapport au substratum et présence de rivières) et les paramètres hydrodynamiques a révélé les constats suivants (Kamagaté 2006) :

- Les profondeurs du réservoir d'altérite varient de 3 à 20 m, et le manteau altéritique servant d'aquifère provient bien de l'altération de la roche mère et suggérerait une connexion hydraulique entre le réservoir d'altérite et celui du socle sous-jacent ;
- La présence d'une couche superficielle de 1 à 2 m d'épaisseur, très hétérogène, correspondant à des alternances de matériaux meubles et indurés, d'une couche intermédiaire de 2 à 7 m d'épaisseur, correspondant au réservoir d'altérite (matériaux argileux d'altération à contenu en eau élevé), et d'une couche profonde représentant le substrat rocheux plus ou moins altéré ;
- Le réseau hydrographique constituerait le drain potentiel des eaux souterraines, dans la mesure où la surface piézométrique apparaît plus ou moins parallèle à celle de la surface du sol ;
- Les essais de pompage dans des puits villageois fournissent des conductivités hydrauliques (K_s) de l'ordre de 10^{-5} m/s, tandis que les valeurs de K_s déduites des transmissivités mesurées à partir d'essais de pompage lors de la réalisation de forages

d'hydraulique villageoise dans la zone fissurée (entre l'altération et le socle sain) varient de $1,25.10^{-4}$ à $9,50.10^{-8}$ m/s.

1.2.4. Climat

Le climat du bassin de l'Ouémé à Bétérou est soumis à l'influence du climat sub-soudanien qui est un climat unimodal caractérisé par une saison humide qui compte six à sept mois de l'année, d'avril à octobre et une saison sèche de Novembre à Mars. L'alternance de la saison des pluies et de la saison sèche a une grande influence sur les autres éléments climatiques, tels que la température de l'air, l'humidité, les vents et l'évaporation. Les températures dans cette zone correspondent à celle relevées aux stations synoptiques de Parakou et de Natitingou. Sur la période 1960 à 2016, les températures minimales varient entre 11,3 et 29,2°C à Natitingou, 12,6 et 27,1°C à Parakou ; les températures maximales, quant à elles, varient entre 44,7 et 21,7°C à Natitingou, 41,6 et 21,8°C à Parakou. La puissance de l'harmatan dans le nord du pays, a un grand effet sur l'humidité de la zone d'étude qui se remarque beaucoup plus en saison pluvieuse.

1.2.5. Végétation

Le bassin de l'Ouémé à Bétérou se trouve dans la zone continentale sèche (Zannou, 2011). La végétation naturelle se caractérise par des savanes arborées ou boisées avec la présence de forêts classées et de forêts galeries le long des principales rivières ainsi que de savane arborée et arbustives. Les types de végétation dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou peuvent être classés en sept principaux types. Il s'agit des forêts galeries, forêts denses, forêts claires et les savanes boisées, arborées, arbustives et herbeuses (Hiepe, 2008 ; Thamm *et al.*, 2008 ; Bel, 2010). Du fait de l'anthropisation agro-pastorale croissante de la zone (Judex M *et al.*, 2009), les forêts sont de plus en plus défrichées (par brulis) au profit de culture de rente (coton et anacarde) ou vivrière (igname, manioc, maïs, sorgho, mil et riz).

1.2.6. Activités socio-économiques

L'agriculture est la principale activité de plus de la moitié de la population. Elle occupe plus de 80 % de la population active (Zannou, 2011). La production agricole est essentiellement basée sur les cultures vivrières (céréales et tubercules) et les cultures de rentes (coton, arachide et anacarde). Dans ce milieu une forte dégradation des terres et du milieu naturel est observée du fait de la croissance démographique qui constitue une pression pour les hommes.

L'élevage dans le secteur d'étude est extensif et le cheptel est constitué de bovins, porcins, caprins et de la volaille (poulet, pintade).

1.3. Données

Les données utilisées dans nos travaux sont un ensemble de quatre (04) données géospatiales. Leurs provenances ainsi que la procédure de génération sont décrites dans les lignes à suivre.

La Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) a obtenu des données d'élévation à une échelle quasi mondiale pour générer la base de données topographique numérique haute résolution la plus complète de la Terre. SRTM consistait en un système radar spécialement modifié qui a volé à bord de la navette spatiale Endeavour lors d'une mission de 11 jours en février 2000. SRTM est un projet international dirigé par la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) et la National Aeronautics and Space Administration (NASA)

Le Copernicus est un modèle numérique de surface qui représente la surface de la Terre, y compris les bâtiments, les infrastructures et la végétation. Ce modèle numérique de surface est dérivé d'un modèle numérique de surface édité nommé WorldDEM, où l'aplatissement des masses d'eau et le débit constant des rivières ont été inclus. En outre, l'édition des côtes et des côtes, des caractéristiques spéciales telles que les aéroports et les structures de terrain invraisemblables a également été appliquée. Le produit WorldDEM est basé sur les données satellitaires radars acquis lors de la mission TanDEM-X, qui est financée par un partenariat public-privé entre l'État allemand, représenté par le Centre aérospatial allemand (DLR) et Airbus Defence and Space. OpenTopography fournit un accès au modèle numérique de surface mondial 30m (GLO-30) via le compartiment public AWS S3 établi par Sinergise

Le modèle de surface numérique global ALOS (AW3D30) est un ensemble de données mondial généré à partir d'images collectées à l'aide de l'instrument de télédétection panchromatique pour la cartographie stéréo (PRISM) à bord du satellite avancé d'observation des terres (ALOS) de 2006 à 2011. L'Agence japonaise d'exploration aérospatiale (JAXA) publie l'ensemble de données du modèle numérique de surface mondiale avec une résolution horizontale d'environ 30 mètres. L'ensemble de données a été compilé avec des images acquises par le satellite avancé d'observation des terres "DAICHI" (ALOS). L'ensemble de données est publié sur la base de l'ensemble de données modèle de surface numérique (version à mailles de 5 mètres) des "Données topographiques 3D mondiales".

La version 3 (ASTGTM) du modèle numérique global d'élévation ASTER (GDEM) fournit un modèle numérique global d'élévation (DEM) des zones terrestres sur terre à une résolution spatiale de 1 seconde d'arc (affichage horizontal d'environ 30 mètres à l'équateur). Le développement des produits de données ASTER GDEM est un effort de collaboration entre la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et le ministère japonais de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI). Les produits de données ASTER GDEM sont créés par le Sensor Information Laboratory Corporation (SILC) à Tokyo. Le produit de données ASTER GDEM version 3 a été créé à partir du traitement automatisé de l'intégralité de l'archive ASTER de niveau 1A des scènes acquises entre le 1er mars 2000 et le 30 novembre 2013. La corrélation stéréo a été utilisée pour produire plus d'un million de DEM ASTER basés sur des scènes individuelles, auquel le masquage des nuages a été appliqué. Tous les DEM filtrés par le cloud et les DEM non filtrés par le cloud ont été empilés. Les mauvaises valeurs résiduelles et les valeurs aberrantes ont été supprimées. Dans les zones où l'empilement des données est limité, plusieurs DEM de référence existants ont été utilisés pour compléter les données ASTER afin de corriger les anomalies résiduelles. Les données sélectionnées ont été moyennées pour créer des valeurs de pixel finales avant de partitionner les données en tuiles de 1° sur 1° avec un chevauchement d'un pixel. Pour corriger les valeurs d'altitude des surfaces des masses d'eau, le produit de données ASTER Global Water Bodies Database (ASTWBD) Version 1 a également été généré. La couverture géographique du GDEM ASTER s'étend de 83° Nord à 83° Sud. Chaque tuile est distribuée au format GeoTIFF et projetée sur le géoïde 1984 World Geodetic System (WGS84)/1996 Earth Gravitational Model (EGM96). Chacune des 22 912 tuiles de la collection contient au moins 0,01 % de surface terrestre

Cet ensemble de données a été obtenu en ligne sur le site <https://opentography.org>.

Tableau 1: Caractéristiques des MNT utilisés

Modèles numériques de terrain	Source	Résolution spatiale	Année de réalisation
SRTM	National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) et la National Aeronautics and Space Administration (NASA)	30 mètres	2000
COPERNICUS	Centre aérospatial allemand (DLR) et Airbus Defence and Space	30 mètres	2019
ASTER	National Aeronautics and Space Administration (NASA) et le ministère japonais de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI)	30 mètres	2000 à 2013
ALOS	Agence japonaise d'exploration aérospatiale (JAXA)	30 mètres	2006 à 2011

1.4. Matériel

Dans le cadre de ce mémoire le matériel utilisé est composé de :

- Microsoft Office Word pour rédiger le document de mémoire ;
- QGIS ;
- L'extension Soil and Water Assessment Tools (SWAT) pour QGIS pour la modélisation hydrographique ;
- Mendeley pour générer les références bibliographiques.

1.5. Méthodologie

L'extraction du réseau hydrographique pratiqué dans cette étude se base sur l'algorithme unidirectionnel baptisé D8 : « Deterministic eight neighbour », crée par O'Callaghan et Mark (1984). Il s'agit du suivi du ruissellement de l'eau, une méthode hydrologique qui s'appuie sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chacun des pixels à partir des valeurs

altimétriques du MNT, par simulation de l'écoulement de l'eau en surface, sachant que l'eau emprunte le chemin défini par la ligne de plus grande pente (Demargne, 2001).

Les étapes à suivre pour l'extraction du réseau hydrographique à partir du MNT sont :

- élimination des dépressions du mnt ;
- calcul du sens d'écoulement à partir des altitudes du mnt sans dépressions ;
- traitement des zones plates ;
- calcul de l'accumulation d'eau pour chaque cellule en fonction du sens d'écoulement ;
- extraction du réseau hydrographique.

Dans la pratique, il convient de comparer le réseau hydrographique généré à partir du modèle numérique de terrain au réseau numérisé à partir d'une carte topographique d'une échelle donnée sur la zone d'intérêt. Cependant l'approche adoptée dans cette étude consiste à effectuer une comparaison entre les réseaux hydrographiques de chaque MNT et un à un réseau hydrographique obtenu par Google Earth pour identifier le biais commis par une inspection visuelle.

1.5.1. Description de l'algorithme D8

Il s'agit de définir l'orientation générale suivie par l'écoulement en chaque élément de la grille. Le choix d'un azimuth se fait parmi les huit cellules qui l'entourent comme montré dans le schéma de la **Figure 3**. L'altitude du pixel est considérée comme celle du centre de la cellule. L'eau emprunte le chemin défini par la plus grande pente. Cette méthode retient le principe d'un cheminement naturel des eaux gouverné par la gravité et guidé par la topographie.

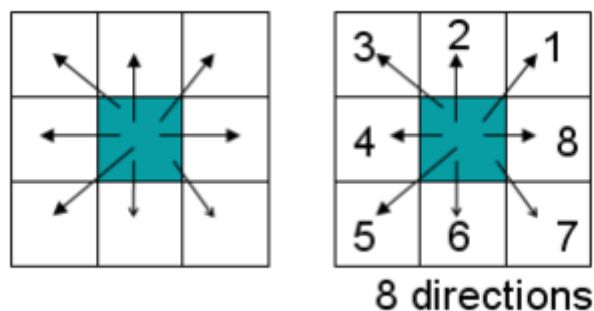


Figure 3 : Schéma de l'algorithme Deterministic eight neighbour,

Source : O'Callaghan et Mark (1984)

Une fois que les cheminements sont tracés, on calcule l'aire drainée pour chaque pixel. Cela représente juste le nombre de pixels amont convergeant vers celui-ci. Il est ensuite possible de déterminer le bassin versant à partir de son seul exutoire. En introduisant sa position, le logiciel extrait l'ensemble de mailles contribuant à l'écoulement dans ce point.

L'étape suivante du traitement consiste à distinguer les pixels « rivière » des pixels « versant » dans le bassin. En définissant une valeur seuil d'aire drainée, le réseau est reconstitué par l'ensemble de mailles dont l'aire drainée est supérieure à ce seuil. Toutes les autres sont les mailles « versant ». Plus la valeur du seuil sera élevée et plus la densité de drainage sera faible, au risque de ne pas représenter des cours d'eau existants. L'estimation de ce seuil est importante car les processus hydrologiques sont différents suivant que l'on se trouve sur un versant ou en rivière. La définition d'un seuil optimal a été proposée dans plusieurs travaux. En général, ils utilisent la distribution spatiale de l'altitude ou de la pente qui sont liées à la densité du réseau hydrographique (Montgomery et Foufoula-Georgiou, 1993). La méthode la plus utilisée est d'adopter des valeurs de seuil arbitraires et comparer le résultat visuellement avec le réseau représenté dans les cartes topographiques du bassin (Yildiz, 2002).

1.5.2. Paramètres de l'algorithme D8

Les paramètres nécessaires à la mise en marche de l'algorithme sont : le nombre de cellules pris en compte par l'algorithme et la superficie de la zone d'intérêt. Ces paramètres sont les seuls variants dans l'algorithme D8, nos travaux sont axés autour de ces paramètres ou seuils. Le tableau suivant présente ces paramètres pour chacun des MNT.

Tableau 2: Paramètres et seuils utilisés

Nombres de cellules	Superficie (Km ²)
100000	94,08
900000	846,8
1800000	1694

Chapitre 2 : Résultats et Discussion

2.1. Introduction

Ce chapitre présente dans un premier temps, les résultats obtenus après l'application de la méthodologie présentée plus haut ainsi que leurs interprétations puis dans un second temps une discussion de ces résultats.

2.2. Présentation des MNT

La délimitation des modèles numériques de terrain sur la zone d'étude a été faite suivant le rectangle équivalent à la zone d'étude. Il s'agit d'une transformation purement géométrique du bassin versant. Les figures ci-après les présentent.

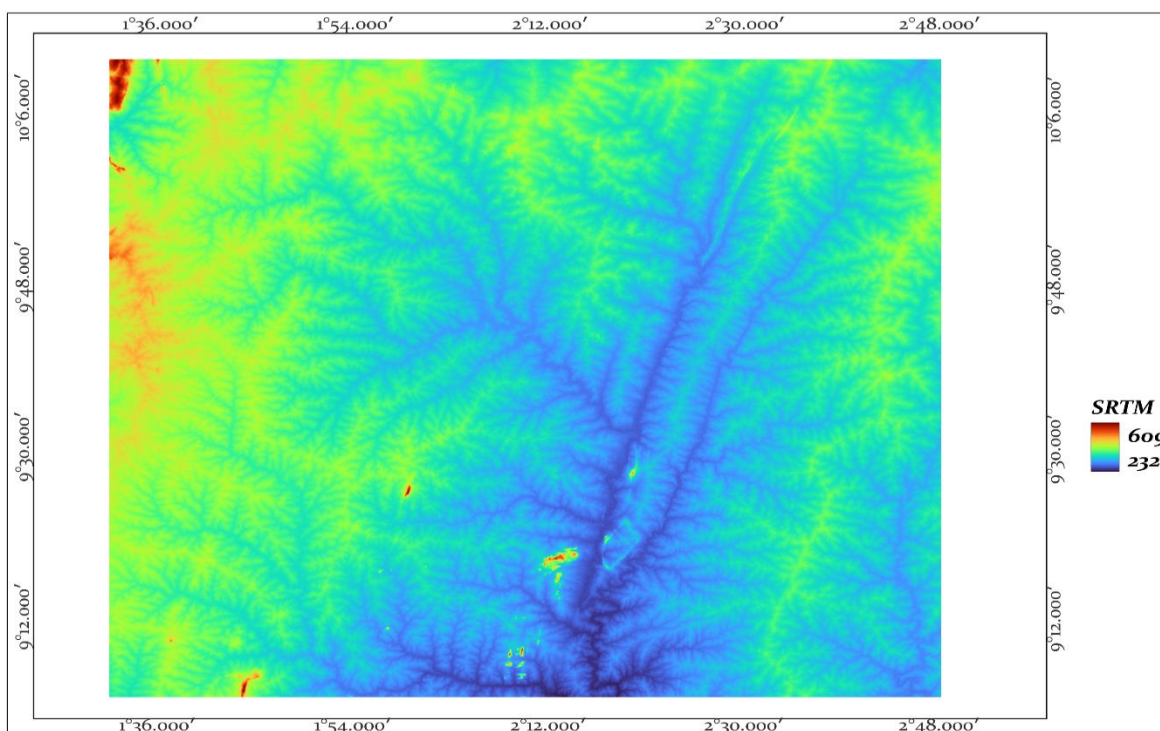


Figure 4: Délimitation du MNT SRTM suivant le rectangle équivalent

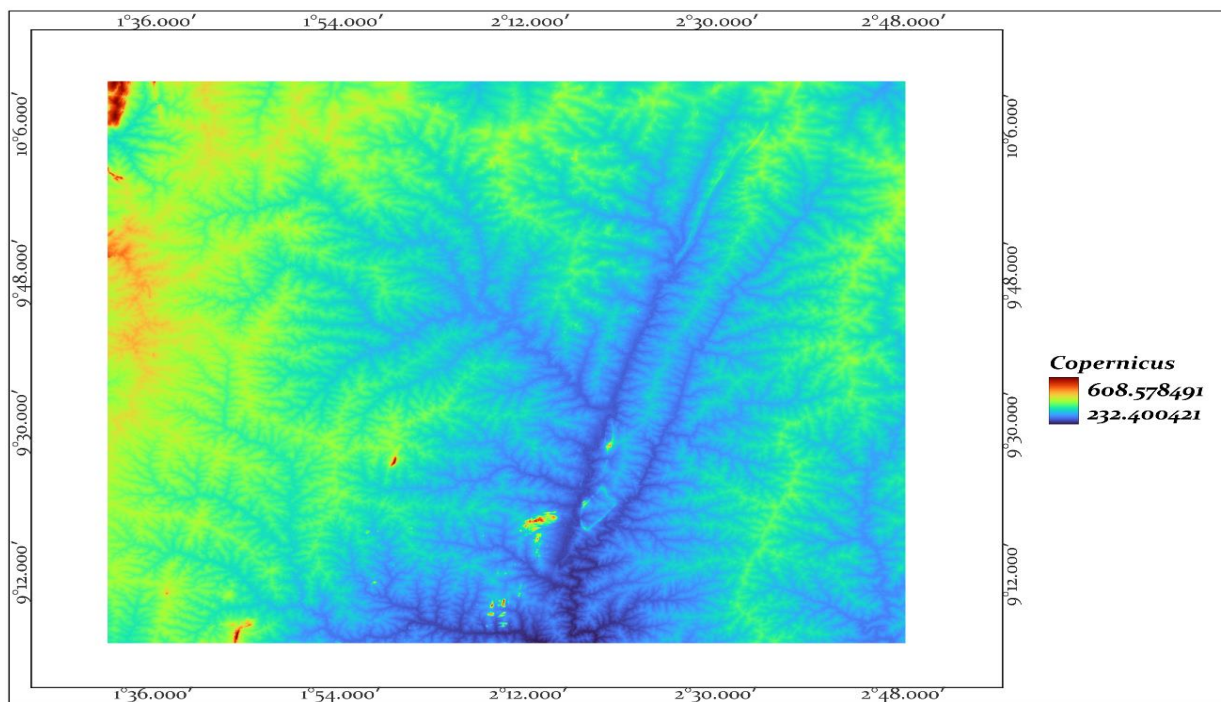


Figure 5: Délimitation du MNT Copernicus suivant le rectangle équivalent

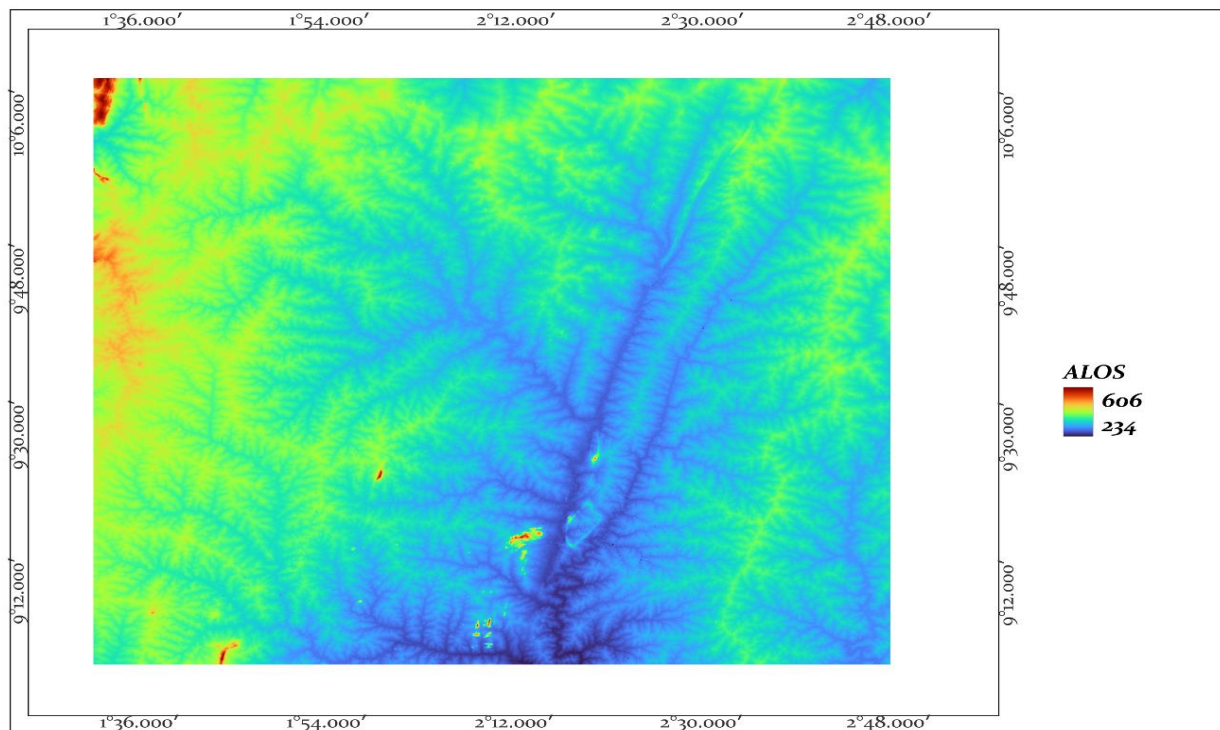


Figure 6: Délimitation du MNT ALOS suivant le rectangle équivalent

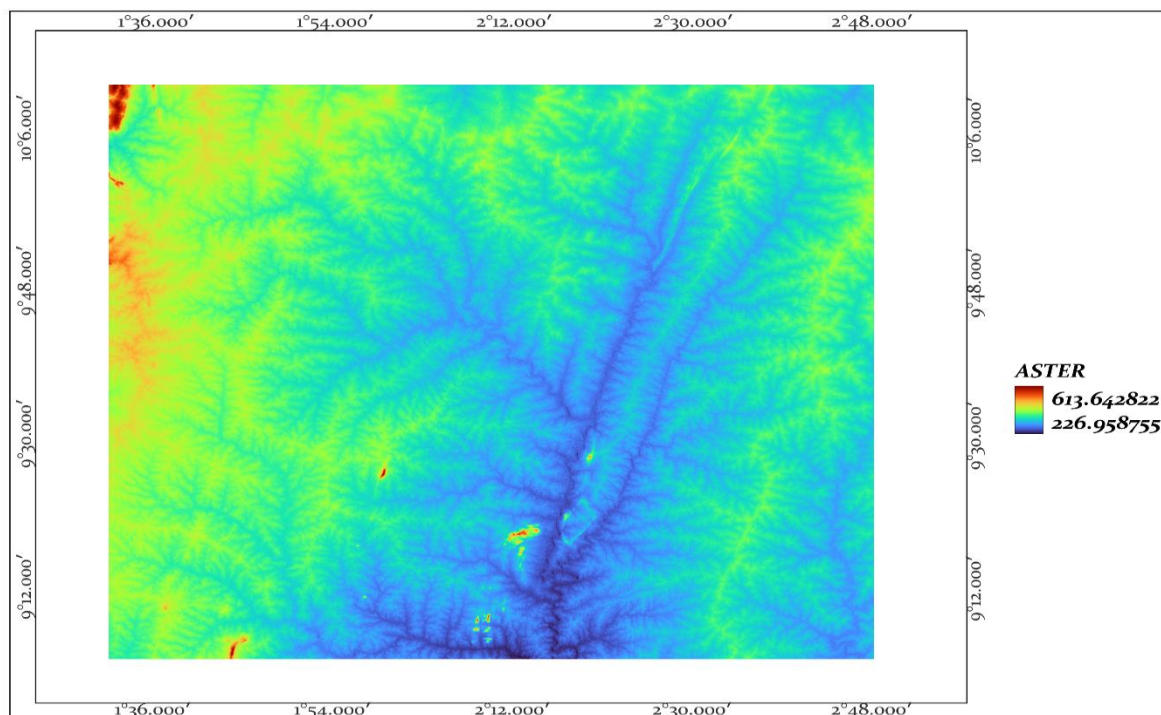


Figure 7: Délimitation du MNT ASTER suivant le rectangle équivalent

Tous les modèles numériques de terrain ont été découpés suivant la même section de découpage. Sur les figures 4, 5, 6 et 7 nous pouvons observer un contraste de diverses couleurs permettant de marquer les différences d'altitudes entre les lignes hydrographiques présentes. A première vue il n'y a aucune dissemblance, cependant les altitudes minimum et maximum varient légèrement ce qui sous-entend déjà des dissemblances au niveau de la modélisation hydrographiques.

2.3. Modélisation hydrographique

Les figures 8, 9 et 10 présentent le réseau hydrographique généré sur les MNT du SRTM, Copernicus, ALOS et ASTER pour les paramètres tels que le nombre de cellules considérées à 1800000 et la superficie à 1694 Km², le nombre de cellules considérées à 900000 et la superficie 846,8 et le nombre de cellules considérées à 100000 et la superficie 94,08.

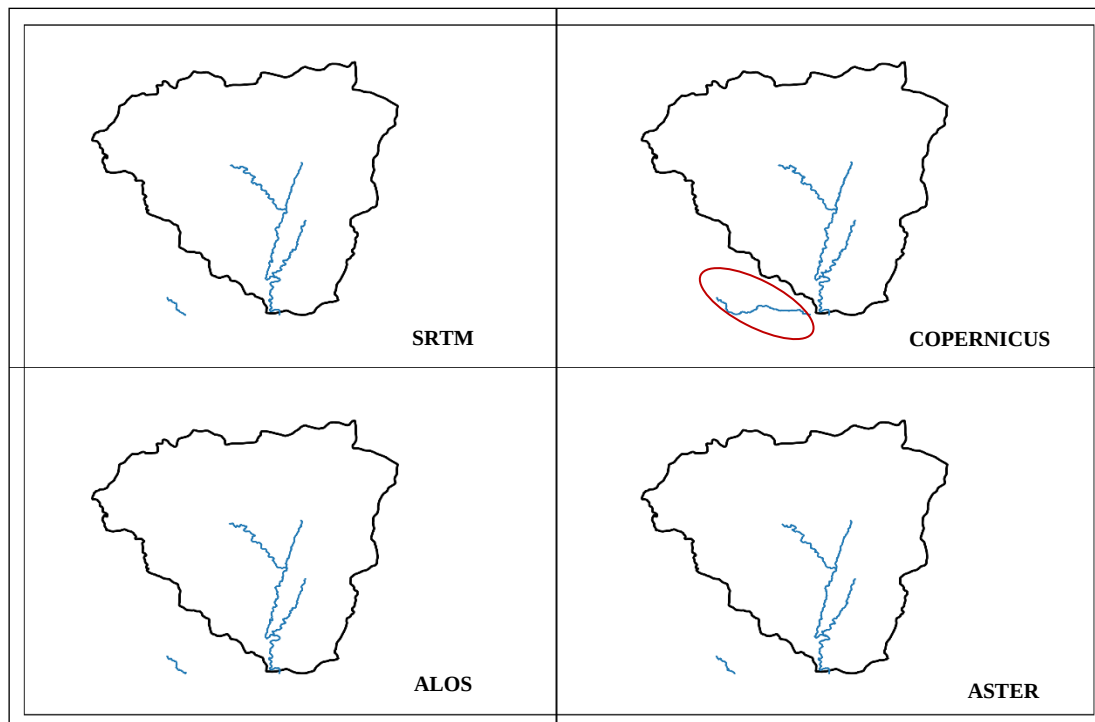


Figure 8: Extraction du réseau hydrographique pour 1800000 cellules et une superficie 1694 Km²

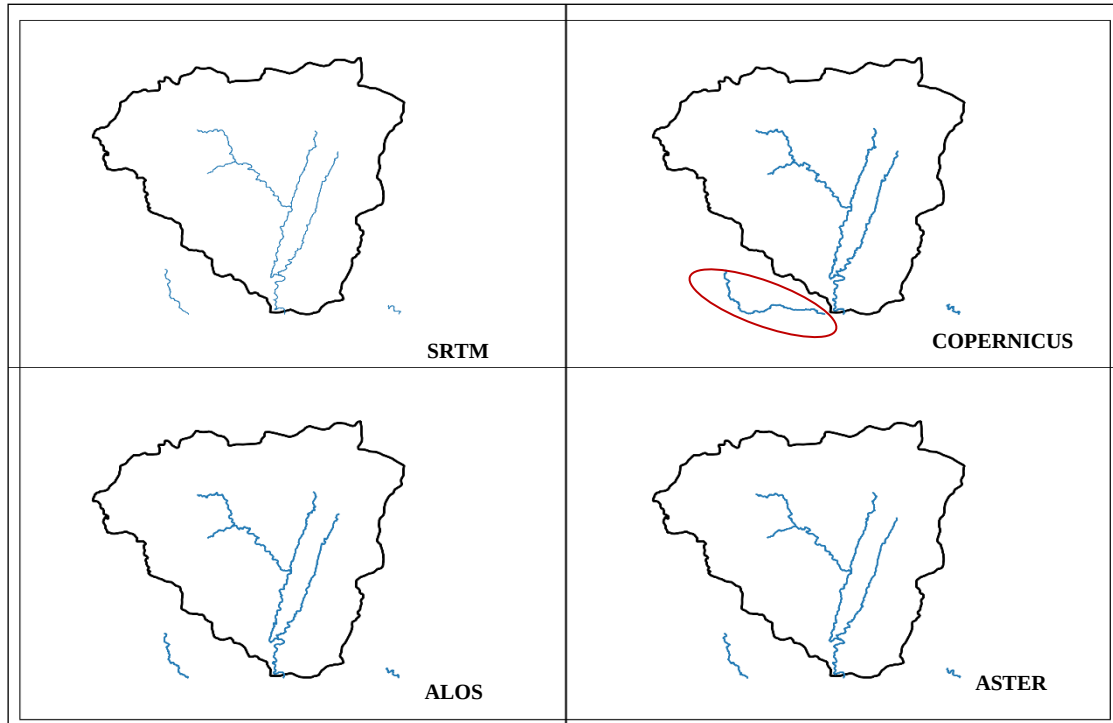


Figure 9: : Extraction du réseau hydrographique pour 900000 cellules et une superficie 846,8 Km²

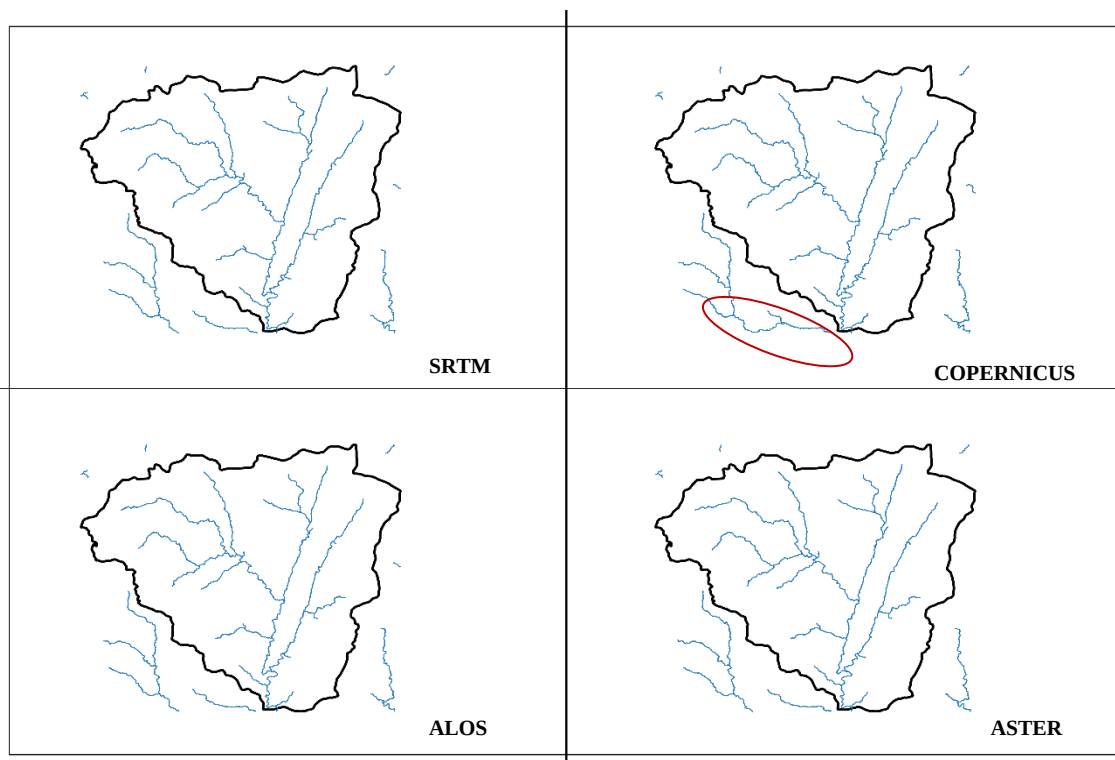


Figure 10: Extraction du réseau hydrographique pour 100000 cellules et une superficie 94,08 Km²

La comparaison effectuée à cette section se base uniquement sur les seuls paramètres définis à la section méthodologie. En ce qui concerne ces paramètres ou seuils, seul le nombre de cellules pris en compte joue un rôle capital. En effet, plus le nombre de cellules considérées est petit plus le réseau hydrographique se densifie et plus il est grand plus le réseau s'affine. Sur l'ensemble des modélisations hydrographiques effectuées et en prenant en compte de la variation de ses paramètres pour chaque MNT, on remarque que le modèle numérique de terrain Copernicus a un réseau hydrographique plus dense que les modèles numériques de terrains ALOS, ASTER et SRTM. Plus le nombre de cellules considérées augmente plus le réseau hydrographique s'affine, cependant dans le cas du modèle numérique de terrain Copernicus, pour les nombres de cellules considérées de 900000 et 1800000 où le réseau hydrographique s'affine à l'identique pour les MNT ALOS, ASTER et SRTM, le modèle numérique de terrain Copernicus est un peu plus épais comme le montre le cercle rouge sur la **figure 8** et la **figure 9**.

Ceci pourrait être dû à plusieurs facteurs comme la nouveauté des données Copernicus, la prise en compte de l'actualisation de l'occupation du sol lors de la réalisation du Copernicus. Par ailleurs les modèles numériques de terrain ALOS, ASTER et SRTM semblent présentés très peu de dissemblances par une inspection visuelle, ce qui pourrait donc laisser penser qu'ils sont

tous plus fiables à utiliser que les modèles numériques de terrain Copernicus pour des applications hydrologiques.

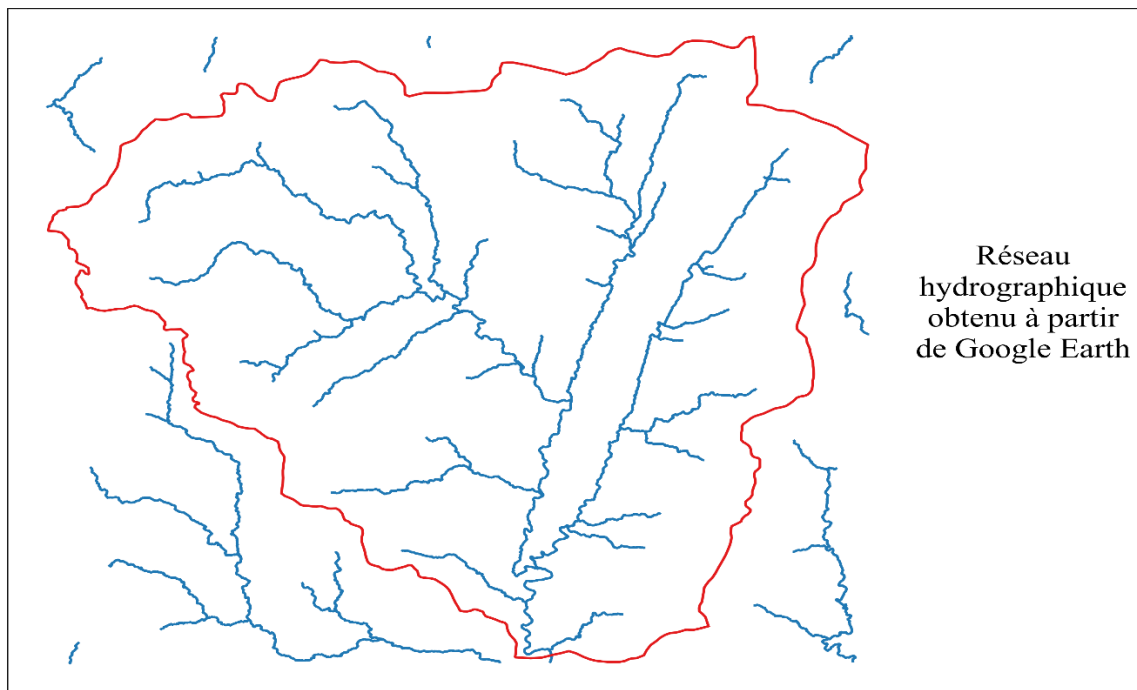


Figure 11: : Le réseau hydrographique obtenu par Google Earth

La **figure 11** présente le réseau hydrographique obtenu par Google Earth.

Google Earth est un logiciel développé par la société Google, permettant une visualisation de la Terre avec un assemblage de photographies aériennes ou satellitaires. Il permet non seulement la visualisation mais aussi la superposition, l'évaluation, la superposition et la création de données géospatiales.

La figure ainsi obtenue à partir de Google Earth présente une forte similitude avec le réseau hydrographique généré par Copernicus pour les paramètres de nombre de cellules considérées à 100000 et la superficie 94,08 Km². Etant considéré comme notre réseau de référence et compte tenu de la forte ressemblance entre réseau hydrographique obtenu par Google Earth et celui généré à partir du MNT Copernicus, on déduit que le MNT Copernicus est le plus fiable d'entre ces modèles numériques.

2.4. Discussion

Dans ce mémoire nous avons réalisé une modélisation hydrographique dans le but d'évaluer la performance de quelques MNT utilisés dans la sous-région. A l'instar de beaucoup d'autres études précédentes, il est difficile voire impossible de trouver un modèle de référence concret.

En effet, la comparaison des réseaux hydrographiques sur chaque MNT est très délicat car chaque modèle numérique de terrain semble être le plus précis possible. N'ayant pas un réseau hydrographique de référence concret auquel comparer nos résultats nous avons procédé à l'extraction suivant des seuils. Ces seuils définissent le degré de finesse du réseau. Il ressort des résultats donc que le modèle numérique de terrain Copernicus est le plus fiable car garde un réseau hydrographique beaucoup plus épais que les autres modèles numériques de terrain à des seuils identiques, ce qui a d'ailleurs été confirmé par la forte ressemblance du réseau hydrographique extrait à partir de ses données au réseau hydrographique de référence obtenu sur Google Earth. Ceci pourrait être dû au fait qu'il est généré sur la base de modèles numériques de surface prenant en compte la végétation et l'occupation du sol et fait partie d'un ensemble de données géospatiales très récentes. Il est donc possible que les MNT Copernicus révèle alors des caractéristiques topographiques récentes qui n'avaient pas pu être prises en compte par les autres modèles numériques de terrain.

Le biais commis sur les MNT ALOS, SRTM et ASTER est certes faible comparé au réseau hydrographique de référence mais nous supposons que cela est dû à la taille de la zone d'étude car les mêmes travaux effectués à une échelle topographique plus vaste révéleraient certainement un biais beaucoup plus conséquent. Il paraît donc plus fiable d'utiliser le modèle numérique de terrain Copernicus pour des modélisations hydrologiques.

Par ailleurs, Li et Wong, (2010) dans leurs travaux montrent que les meilleurs résultats sont obtenus si les nombres de cellules sont relativement petits. Ceci semble diverger de nos résultats car nos meilleurs résultats nous ayant permis les comparaisons sont obtenus pour des nombres de cellules relativement grands. Toutefois, les travaux de Li et Wong, (2010) ont porté sur des modèles numériques de terrain à résolutions spatiales et sources différentes pour montrer leurs impacts sur les applications hydrologiques.

Conclusion et perspectives

Cette étude a évalué les performances des modèles numériques de terrain (MNT) sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. Elle permettra aux chercheurs de partir sur la base des résultats obtenus pour effectuer un choix de modèle numérique de terrain à des fins de modélisation hydrologique.

Cette évaluation a été menée en comparant les réseaux hydrographiques générés à partir de quatre différentes sources de MNT à même résolution spatiale. L'extraction de ces réseaux hydrographiques s'est appuyée sur l'algorithme D8. L'interprétation des résultats s'est axée sur les paramètres fondamentaux pour la mise en marche de l'algorithme à savoir le nombre de cellules pris en compte par l'algorithme et la superficie de drainage sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.

Les résultats montrent que même lorsque le nombre de cellule pris en compte par l'algorithme et la superficie de drainage sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou varient, il existe sur le plan visuel une forte ressemblance entre les réseaux générés à partir des MNT ALOS, SRTM et ASTER. Par contre on peut remarquer une dissemblance entre ces réseaux et le réseau hydrographique généré à partir du MNT Copernicus. Cette dissemblance s'accroît au fur et à mesure que le nombre de cellule pris en compte par l'algorithme et la superficie de drainage sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou augmentent. De plus, on remarque que le réseau généré à partir du MNT Copernicus paraît plus dense.

En termes d'analyse, le MNT Copernicus apparaît plus fiable face aux autres modèles. Cela pourrait se justifier par plusieurs facteurs dont le premier à considérer est l'innovation apportée par les données de Copernicus car ce sont les plus récentes et second une prise en compte de l'occupation du sol lors de la réalisation du Copernicus.

Les travaux scientifiques sur un bassin versant peuvent donc être fortement impactés par le choix du MNT. Dans notre cas, les MNT ALOS, SRTM et ASTER sont peu recommandés. Ainsi il est plus judicieux d'opter pour le MNT Copernicus pour effectuer des travaux sur le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

Cette étude appelle à des perspectives. Il existe des méthodes de correction de modèle numérique de terrain pour améliorer la qualité des réseaux hydrographiques extraits (Ex : la méthode de correction par incrustation du réseau de référence sur la surface du MNT, ...).

Toutefois, ces méthodes regorgent d'insuffisances, ce qui les limite à une faible amélioration du biais initial même après correction du modèle numérique de terrain. On pourrait aussi opter pour l'évaluation de la performance des MNT par la modélisation hydrologique ou encore reprendre les mêmes travaux à une échelle spatiale plus grande.

Références bibliographiques

- Bamory Kamagate. Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant en milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé). Hydrologie. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2006. Français. (NNT :)
- Buakhao, W., & Kangrang, A. (2016). DEM Resolution Impact on the Estimation of the Physical Characteristics of Watersheds by Using SWAT. *Advances in Civil Engineering*, 2016, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2016/8180158>
- Demargne C. (2001). La qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation des crues. Thèse de doctorat. Université de Marne-la-vallée. 275p.
- Hiepe, Claudia: Soil degradation by water erosion in a sub-humid West-African catchment: a modelling approach considering land use and climate change in Benin , Bonn, 2008. - Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Judex, Michael; Röhrig, Rüdiger; Schulz, Oliver; Thamm, Hans-Peter; (ed.) (2009): IMPETUS Atlas du Bénin. Résultats de recherche 2000-2007. Troisième édition. Département de Géographie, Université de Bonn, Allemagne (french version), 128 pp, hdl:10013/epic.42484.d002
- J. Charleux Demargne. Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants. Sciences de l'environnement. Doctorat Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne la Vallée, 2001. Français. (NNT :).
- J. Charleux Demargne, C. Puech. Qualité des MNT pour l'hydrologie. Méthode de diagnostic de la qualité d'extraction du réseau hydrographique et des limites de bassins versants à

- partir d'un MNT. *Revue Internationale de Géomatique*, 2000, 10 (3-4), pp.335-357.
<hal-02580905>
- Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y. et Gualde R., (1993) : Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. Edition ORSTOM; 540 p.
- Li, J., & Wong, D. (2010). Effect of DEM sources on hydrologic applications. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, 251-261.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2009.11.002>
- Montgomery D et Dietrich W., (1989). Source areas, drainage density and channel initiation. *Water resources Research*, 25:p. 1907-1918.
- Nazari-Sharabian, M., Taheriyoun, M., & Karakouzian, M. (2019). Sensitivity Analysis of the DEM Resolution and Effective Parameters of Runoff Yield in the SWAT Model : A Case Study. *Aqua*. <https://doi.org/10.2166/aqua.2019.044>
- O'Callaghan J, et Mark D., (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Graphics Image Processes*, 28 :p. 323-344.
- Yildiz O. (2002). An Investigation of the Effect of Drainage Density on Hydrologic Response. Kirikkale University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kirikkale-TURKEY
- Zannou, A. (2011). Analyse et modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin : cas du bassin de l'Ouémé à Bétérrou. These de doctorat. Cotonou, Bénin : Université d'Abomey-Calavi.