

ELABORATION D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN POUR LE BASSIN VERSANT DU KOU

Présenté

par

M. Noufou GUIRE

***MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EAU ET
ENVIRONNEMENT***

Angelbert BIAOU, Docteur en Hydrologie/Hydrogéologie Enseignant-Chercheur (GVEA -2iE)

Nicolas GARDIN, Ingénieur Agronome (Génie rural)/Hydrologue) /Coopérant technique APEFE
en charge du projet d'accueil

Elie Serge Gaëtan SAURET, Ir Géologue de Conception, Doctorant en Sciences de l'eau et de
l'environnement à Université de Liège (ULg)

Dédicace

Tout revient d'abord à Allah le tout puissant, maître de l'univers. Je rends grâce à Allah, le détenteur du savoir à qui tout revient et sans lui le travail ne pouvait même commencer et se terminer. Louange et gloire à lui.

Je dédis ce travail :

- ✓ A ma mère et à ma mère adoptive Habibou BOULOU et Salimata ZONGO celles qui n'ont cessé de se sacrifier, me soutenir, m'encourager et prier pour moi. Merci Mamans sans vous je ne serais rien.
- ✓ A la mémoire de mes regrettés petit frère Issa GUIRE et grand- frère Daouda GUIRE et Fath Guiré qui ont été arrachés à notre affection.

Qu'ALLAH, Le Tout miséricordieux, les agrées et les accueille dans son paradis.

- ✓ A mon père Ousmane GUIRE qui est un guide pour moi. Merci pour les instructions et éducations, les sacrifices, encouragements et prières.
- ✓ A toute ma famille
- ✓ A tous mes amis à Ouaga et en Côte d'Ivoire.

Remerciement

Ce travail est l'œuvre de la coopération entre le 2iE et le projet d'appui à la gestion et à la protection des eaux souterraines dans la commune de Bobo Dioulasso

Au terme de ce travail il me va droit au cœur de remercier tous ceux qui ont apporté leur contribution à l'élaboration de ce document.

Mes remerciements vont d'abord à l'endroit de mon encadreur interne à 2iE Dr Angelbert BIAOU qui a permis que ce stage puisse se réaliser. Merci pour les conseils et les orientations, votre disponibilité et vos relectures.

Je voudrais exprimer ma gratitude à mon encadreur externe Mr Nicolas GARDIN, le coopérant technique en charge du projet. La définition des activités quotidiennes du stage lui revenait. Sa disponibilité, sa manière d'encadrer m'ont beaucoup impressionné. Merci pour nous avoir fait découvrir le projet et mettre à notre disposition les moyens pour réaliser ce travail.

Je voudrais également remercier Elie Serge Gaëtan SAURET, Doctorant au sein du projet. Ses corrections, remarques, suggestions, orientations et les outils mis à ma disposition ont permis au travail de s'accomplir.

Je remercie tous les enseignants du 2iE et l'administration pour la qualité de la formation et leur disponibilité.

Je souhaite remercier Mr Ahmed Kam gestionnaire de la base de données du projet, ainsi que les autres partenaires du projet, à savoir Mr, Farid Traoré, Midekor AKOLY qui n'ont ménagé aucun effort pour l'avancement de mon travail

.

Je tiens à remercier ma famille, mes amis pour leur soutien inconditionnel.

Enfin je remercie tous ceux qui de près où de loin ont contribué à l'élaboration de ce document et dont les noms n'ont pas été cités. Puisse ALLAH vous accorder sa grâce.

Résumé

Situé au Sud-Ouest du Burkina Faso, le bassin versant du Kou regorge d'importantes quantités d'eau. Cette ressource en eau du bassin est sollicitée pour la satisfaction de plusieurs besoins humains (AEP, cultures irriguées...). L'abondance de cette ressource en eau a eu pour conséquence le développement de plusieurs activités qui sont directement ou indirectement liés à celle-ci.

Ce fort potentiel en eau du bassin, demeure néanmoins la source de conflits liés à la satisfaction des besoins en eau.

De cette démarche est partie cette étude sur l'élaboration d'un Modèle Numérique de terrain pour le bassin du Kou qui vise à appuyer une partie des activités du projet sur l'étude de l'aquifère alluvial qui borde la rivière Kou et qui pourrait constituer une ressource en eau alternative pour certains usagers du bassin.

Il ressort de cette étude que le Modèle Numérique de terrain (MNT) réalisé à partir des images satellitaires d'une résolution de 15 m à une exactitude de 16,5 m et est acceptable pour restituer le réseau hydrographique au regard de la précision donnée par les deux modèles déjà disponible au sein du projet.

Mots clés : MNT, Aster, bassin du Kou

Abstract

Located at the south West of Burkina Faso, the Kou basin contains a great quantity of water. The abundance of water resource has lead to the development of several activities which are directly or indirectly connect to it with the consequence that water resources are more and more solicited to satisfy several human needs (AEP, irrigated crop...)

Given this great potential in water, the catchment area of Kou knows conflicts around the issue of water. Water being poorly distributed and wasted by place; it is therefore up to key manager to this resource to take adequate measure now to assure the durability without hold up area development.

The context presented here above has lead to the present study on the Digital Elevation model for the basin of Kou which endeavors to support one part of project activities on the study of alluvial aquifer which border the Kou River and which could constitute an alternative water resource for any users of the basin.

This study show that the exactitude of Digital Elevation model (DEM) is 16.5 m; realized from satellite images (Aster) with 15 m of resolution. It shows also that the DEM is acceptable to reconstitute network hydrographic by comparing the precision given by the SRTM model and South- West model.

Keywords: DEM, Aster, Kou watershed

Table des matières

Résumé	5
Abstract	5
Liste des figures	9
Liste des tableaux	11
Sigles et Abréviations	12
1. Introduction Générale	14
1.1. Contexte et Problématique	15
1.2. Objectif de l'étude	16
1.3. Méthodologie de l'étude	16
1.4. Résultats attendus	18
1.5. Organisation du rapport	18
2. Contexte général	19
2.1. Localisation Géographique	19
2.2. Climat	20
2.3. Sols	20
2.4. Relief et hydrographie	20
2.4.1. Relief	20
2.4.2. Hydrographie	21
2.5. Contexte géologique	21
2.6. Contexte hydrogéologique	23
2.7. Les activités socioéconomiques	27
3. Elaboration du Modèle Numérique de Terrain	28
3.1. Inventaire et analyse exploratoire non spatiale de l'existant	28
3.2. Généralité sur la télédétection	36
3.2.1. Principe et définition de la télédétection	36
3.2.2. Domaines d'application et avantage de la télédétection	37
3.3. Outils, Matériels et Méthodes	37
3.3.1. Outils	37
3.3.2. Matériels: Acquisition des images ASTER	38
3.3.3. Méthodologie d'exploitation des images ASTER	42
3.4 Résultat	49

4. Discussion des résultats.....	52
4.1 Comparaison du MNT avec les cartes topographiques : apports des outils d'analyses géostatistiques.....	52
4.1.1 Analyse exploration spatiale.....	52
4.1.1.1 Analyse exploration spatiale des modèles existants et le MNT.....	52
4.1.1.2 Analyse exploratoire spatiale du MNT et la plaine alluviale.....	55
4.1.1.3 Analyse exploration non spatiale.....	57
5. Discussion générale.....	60
5.1 A propos de l'imagerie satellitale.....	60
5.2 A propos des données d'entrées, la méthode d'interpolation et du logiciel utilisé.....	61
5.3 A propos de notre approche méthodologique et nos résultats.....	62
Conclusion.....	63
Bibliographie.....	65
Sites internet.....	66

Liste des figures

Figure 1: Localisation du Bassin du Kou.....	19
Figure 2: Principales formations géologiques du Bassin du Kou	23
Figure 3: Coupe Hydrogéologiques et géologiques de la région de Bobo Dioulasso (Sogreah, 1994).....	25
Figure 4: Plaine alluviale avec différentes unités (Masson, Garry, Ballais modifié par SIEE)	27
Figure 5: Histogramme du MNT Sud-Ouest avec les variantes statistiques	31
Figure 6: Histogramme du MNT SRTM avec les variantes statistiques	31
Figure 7: Histogramme de la Topo avec les variantes statistiques	32
Figure 8: Histogramme de l'écart topo et MNT Sud-Ouest	32
Figure 9: Histogramme de l'écart Topo et SRTM	33
Figure 10: Diagramme simplifié de la géométrie d'acquisition des images d'Aster	38
Figure 11: Composition colorée 321 des deux images Aster du bassin du Kou.....	40
Figure 12: Scène de deux images satellitaires Aster couvrant le bassin du Kou sans traitement préalable	43
Figure 13: La géométrie épipolaire.....	45
Figure 14: Image épipolaire des deux images Aster	48
Figure 15: Modèle Numérique de Terrain en nuance de gris	49
Figure 16: Modèle Numérique de Terrain en fausses couleur	50
Figure 17: MNT superposé sur le réseau hydrographique existant.....	51
Figure 18: Altitude du MNT Sud-Ouest en fonction du SRTM	53
Figure 19: Altitude du MNT en fonction du SRTM.....	53
Figure 20: Altitude du MNT en fonction du SRTM.....	54
Figure 21: QQplot du MNT en fonction de la plaine alluviale	55

Figure 22: Altitude du MNT en fonction de la plaine alluviale	56
Figure 24: Histogramme du MNT avec les paramètres statistiques	58
Figure 25: Histogramme de la plaine alluviale avec les paramètres statistiques.....	58
Figure 26: Histogramme de l'écart avec les paramètres statistiques.....	59

Liste des tableaux

Tableau 1: Ressources exploitées par les usagers.....	15
Tableau 2: Variantes statistiques du MNT Sud-Ouest et de l'écart	30
Tableau 3: Caractéristiques des sous système d'Aster (Aster handbook)	41
Tableau 4: Paramètres statistiques des élévations du MNT, de la plaine alluviale et de l'erreur.....	57
Tableau 5: Exactitude du MNT.....	60

Sigles et Abréviations

APEFE : Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger

ASTER: Advanced space borne Thermal Emission and Reflectance Radiometer

BD: Base de donnée

DGPS: Differential Global Positioning System

ENVI: Environment for Visualizing Image

EOS : Earth Observation System ou Système d'Observation de la Terre

ZIE : Institut Internationale de l'Ingénierie de l'Eau et l'environnement

GCP : Ground control points

GGQ : Grès à Granules de Quartz

GFB : Grès de Fô-Bandiagara

GFG : Grès Fins Glauconieux

GFR: Grès Fins Roses

GPS: Global Positioning System

IGB : Institut Géographique du Burkina

LPDAAC: The Land Processes Distributed Active Archive Center

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NASA : National Aeronautics and Space Administration

ONEA : Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement

PESO : Projet Eaux Souterraines

SIG : Système d'Information Géographique

SOGREAH : Bureau d'étude ingénieurs conseils

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

SDVI : Standard de l'Indice de Végétation Normalisé

SWIR: ShortWave Infrared

TIR: Thermal Infrared

UTM: Universal Transversal Mercator

USGS: United States Geology Survey

VNIR: Visible Near Infrared

1. Introduction Générale

Au Burkina Faso, pays agricole et sahélien, la disponibilité d'une eau abondante et de qualité, pour les besoins de la vie, du développement et de l'environnement est un problème majeur auquel il importe d'accorder une attention soutenue. A cet égard, le contexte naturel du Sud-Ouest et particulièrement son capital en eau, constituent une opportunité de développement pour cette région qu'il faut encourager et encadrer afin de préserver ce capital.

Le contexte du Sud-Ouest du Burkina ainsi que ses caractéristiques géologiques et hydrogéologiques favorable à l'accumulation d'importantes réserves en eau souterraine a encouragé les autorités à retenir les bassins du Mouhoun Supérieur, Mouhoun Inférieur, Comoé et Banifing pour la planification et la gestion des ressources dans le Sud-Ouest. (<http://srdis.ciesin.columbia.edu/cases/burkinafaso-003-fr.html>).

La Comoé et le Mouhoun sont deux cours d'eau permanents. A ces cours d'eaux pérennes s'ajoutent de nombreuses sources localisées dans les terrains sédimentaires du bassin du Kou (sous bassin du Mouhoun supérieur) et drainée par la rivière du Kou dont les eaux sont utilisées en aval pour l'irrigation d'un périmètre rizicole de 1040 ha (Sauret, 2007). Actuellement seule la source ONEA I est utilisée pour l'alimentation en eau potable de la ville de Bobo-Dioulasso.

Depuis un certain nombre d'années, des signes inquiétants semblent indiquer que cette ressource s'amenuise : tendance à la baisse du niveau de l'aquifère, diminution du débit du Kou, tarissement de certaines sources,...En outre, les activités agricoles principalement dominées par les cultures cotonnières et maraîchères et celles liées aux industries implantées dans la région constituent une réelle menace quant à la quantité et la qualité des eaux souterraines. Un devoir de gestion efficace et de protection de la ressource passe par la quantification des potentialités en eau de l'aquifère alluviale qui peut être utilisé comme ressource alternative. Le présent mémoire vise à améliorer l'état des connaissances des ressources en eaux souterraines de la région de Bobo Dioulasso ; à la gestion et à la protection de ces dites ressources. La thématique : «Elaboration d'un Modèle Numérique de Terrain pour le bassin du Kou » a donc été proposée par le Projet en charge de la protection et de la gestion des eaux souterraines exploitées dans la région de Bobo Dioulasso en collaboration avec l'Institut Internationale de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.

1.1. Contexte et Problématique

Le bassin du Kou est un sous-bassin du Mouhoun Supérieur, il a une superficie de 1860 Km². La population résidente est estimée actuellement à 644 000 habitants (Lorenzini, 2007); essentiellement regroupée dans l'agglomération urbaine de Bobo-Dioulasso seconde ville du Burkina Faso. Les réserves en eau relativement abondante de la région de Bobo Dioulasso plus particulièrement le bassin du Kou constitue un lieu privilégié d'expression et de satisfaction des besoins en eau pour les hommes qui y vivent, pour leurs activités productives et pour l'environnement.

L'abondance de ces ressources en eau a mené au développement de nombreuses activités qui sont directement ou indirectement dépendantes de celles-ci. Les différents usagers et les ressources exploitées dans le bassin du Kou de l'amont vers l'aval (Tableau 1) peuvent se résumer en quatre groupes :

1° l'Industriel et l'hydraulique villageoise : exploitent directement (par pompage) les aquifères du sédimentaire

2° l'ONEA : exploite les sources de Nasso

3° les maraîchers en bordure du Kou et du canal d'amenée : exploitent la rivière et l'aquifère alluvial

4° le périmètre de Bama : exploite les eaux restant du Kou qui lui est approvisionné grâce à un canal long de près de 11km

⇒ Les usagers plus en amont sont les plus favorisés, ceux de Bama sont totalement défavorisés

Tableau 1: Ressources exploitées par les usagers

Usagers	Ressources exploitées
Industriel et hydraulique villageoise	Aquifère du sédimentaire
ONEA	Sources de Nasso
Maraîchers	Rivière et aquifère alluviale
Périmètre de Bama	Reliquat des autres usagers

Cette situation concurrentielle voire conflictuelle dans l'utilisation des eaux s'est définitivement établie. De plus les activités urbaines et industrielles apparaissent comme une menace réelle à la préservation de la qualité des eaux.

Dans ce contexte, il importe que les gestionnaires des ressources en eau de ce bassin prennent dès maintenant les mesures adéquates pour en assurer la durabilité, sans entraver le développement de la zone. C'est dans ce sens que le projet "Appui à la gestion et à la protection des ressources en eau souterraine exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso" œuvre depuis 3 ans aux côtés de la Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts-Bassins et des autres structures actives dans le domaine de l'eau afin d'améliorer les connaissances sur ces ressources et de développer des outils destinés à en faciliter la gestion.

Une partie des activités de ce projet est dédiée à l'étude de l'aquifère alluvial qui borde la rivière Kou et qui pourrait constituer une ressource en eau alternative pour certains usagers du bassin (les maraîchers notamment). De ces activités, il est attendu: une délimitation précise de l'extension de l'aquifère alluvial, une caractérisation hydrogéologique de cet aquifère, une évaluation des interactions entre l'aquifère alluvial, la rivière Kou et les aquifères du Sédimentaire et enfin une modélisation des potentialités en eau de cet aquifère alluvial.

La présente étude vise à appuyer ces travaux sur l'aquifère alluvial puisqu'elle devra mener à l'élaboration d'un Modèle Numérique de Terrain le plus précis possible pour la plaine alluviale du Kou.

1.2. Objectif de l'étude

Cette étude a pour objectif global de modéliser la surface topographique dans le bassin du Kou, d'en déduire les directions d'écoulement d'eau de surface et de reconstituer le réseau hydrographique, en exploitant des points levés au DGPS, des photographies aériennes et des images satellite.

1.3. Méthodologie de l'étude

La méthodologie adoptée s'articule autour des points suivants:

1. Recherche documentaire. Celle-ci comprend:

- une revue documentaire qui consiste à faire le point sur les différentes études ayant porté sur la zone d'étude et ayant trait au thème. Notre regard s'est également porté sur des études similaires effectuées dans d'autres régions du monde;
- la prise en main des données hydrogéologiques et des images satellitaires;
- la prise en main des outils de traitement d'images (ENVI 4.3 et PCI Géomatica) et des SIG (ArcGIS 9.2). Cette phase inclut les techniques d'importation et d'exportation des données.

2. Visites sur le terrain. Elles ont eu pour but de faire:

- des observations sur les caractéristiques générales du site : nature du terrain, relief, végétation ;
- une appréciation in situ de la configuration actuelle du réseau hydrographique ;
- une appréciation visuelle de l'occupation de l'espace, les positions relatives des différents utilisateurs vis-à-vis du cours d'eau, etc. ;
- des observations de la manifestation des menaces sur la qualité des eaux.

3. Travaux de bureaux

- l'élaboration du MNT: Cette phase est la plus laborieuse. Elle comporte les points suivants :
 - ✓ le transfert des données dans le logiciel;
 - ✓ le prétraitement des images satellitaires : composition colorée, rognage des bordures noires, mosaïquage....;
 - ✓ la génération du modèle à partir de quelques applications (DEM Extraction...) du logiciel ENVI 4.3;
 - ✓ le renseignement sur les parties du MNT qui manquent d'information en faisant des levés topographiques avec un GPS;
- la validation consistera à vérifier la pertinence (la précision et l'exactitude) du modèle par une comparaison avec des MNT existant ayant déjà faits leur preuve (MNT-SW et SRTM).
- La comparaison avec des levés effectués avec une grande précision (+ ou - 1 cm) dans la zone d'étude (une cinquantaine de points)

1.4. Résultats attendus

Les Résultats attendus de ce stage sont :

- Modèle Numérique de Terrain (MNT) du bassin le plus précis possible et validé par des données collectées sur le terrain.

1.5. Organisation du rapport

Le rapport est subdivisé en 5 parties :

- La première partie concerne l'introduction générale. Cette partie parle du contexte et de la problématique, l'objectif, la méthodologie adoptée pour répondre aux questions soulevées, les résultats attendus et l'organisation du rapport.
- La deuxième partie est consacrée au contexte général de la zone d'étude. Elle met en exergue la zone d'étude, le climat, la végétation, les sols, le relief et l'hydrographie, le contexte géologique, le contexte hydrogéologique et les activités socioéconomiques.
- La troisième partie est consacrée à l'élaboration du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Elle parle du MNT en deux points à savoir :
 - ✓ La généralité;
 - ✓ L'inventaire et l'analyse exploratoire non spatiale
 - ✓ l'élaboration du Modèle Numérique de Terrain.
- La quatrième partie aborde la discussion des résultats, qui comprend la comparaison du MNT avec les cartes topographiques : apports des outils d'analyses géostatistiques.
- La cinquième partie termine le rapport par une discussion générale.

2. Contexte général

2.1. Localisation Géographique

Le bassin versant du Kou est un bassin de la rivière Kou affluent du fleuve Mouhoun (ex volta noire) qui est un des trois grands cours d'eau (Traoré, 2007) du Burkina Faso. Le bassin du Kou se situe à l'ouest du Burkina Faso, dans la province du Houet entre les longitudes 4°40'O et 4°10'O et les altitudes 11°N et 11°30N (Chérif, 2006). Il couvre une superficie de 1860 Km² et est drainée par la rivière Kou qui s'écoule vers le Nord-Est.

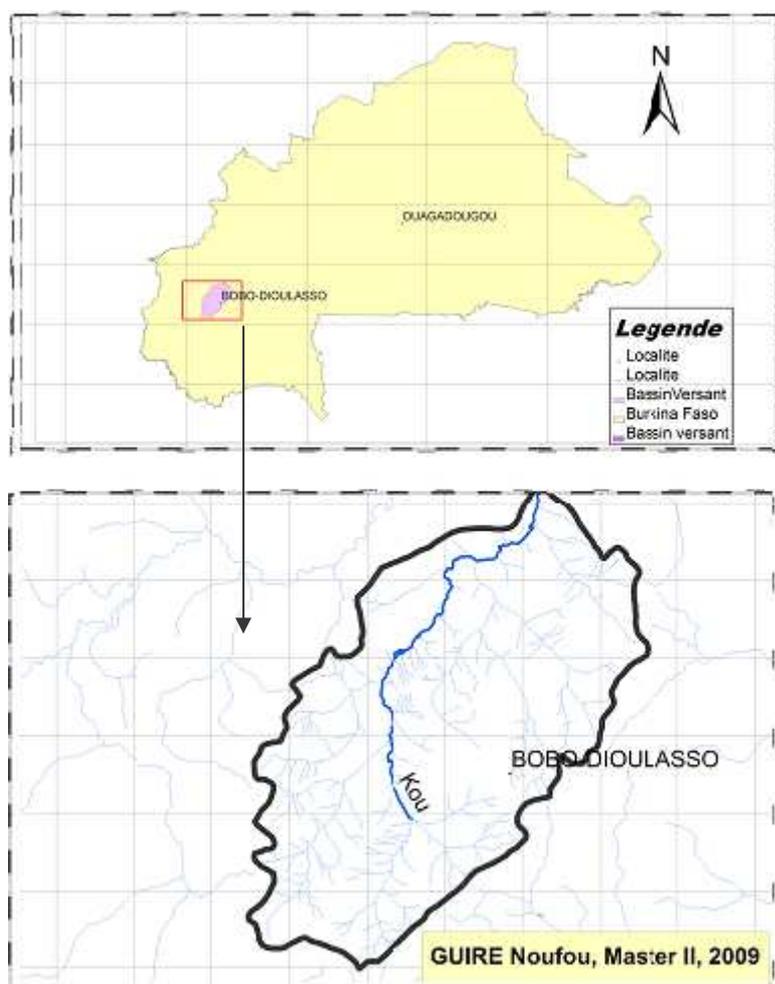


Figure 1: Localisation du Bassin du Kou

2.2. Climat

Le bassin versant du Kou est situé dans la zone soudanienne. Le climat est caractérisé par l'alternance de deux saisons, à savoir une saison pluvieuse qui s'étend de mai à septembre et une saison sèche qui s'étale d'octobre à mars. Contrairement au reste du pays, l'ensemble de la région est plus arrosé.

D'après Dakouré D., 2003 dans le bassin du Kou, la température de l'air varie entre la saison sèche et la saison humide. Les températures mensuelles maximales sont enregistrées en mai- juin et les minimales en janvier- février. La moyenne mensuelle est variable, entre 28° et 30°

2.3. Sols

D'après Sauret (2007), les sols du secteur d'étude sont :

- les sols peu évolués d'érosion sur matériaux gravillonnaires,
- les vertisols sur alluvions ou matériaux argileux,
- les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériaux sableux sols sablo-argileux,
- les sols ferralitiques.

Selon leur profondeur on distingue :

- les sols profonds (> 100m):
 - ✓ sols argileux-sableux en surface, argileux en profondeur,
 - ✓ sols limono-argileux en surface, argileux en profondeur,
 - ✓ sols sableux en surface, argileux en profondeur,
- les sols à faibles profondeurs (< 40 cm) : ce sont les sols gravillonnaires.

2.4. Relief et hydrographie

2.4.1. Relief

D'après Lorenzini, 2007, le bassin du Kou est un plateau qui culmine aux environ de 500 m d'altitude au Sud-Ouest et s'abaisse progressivement jusqu'à 300 m vers le Nord et le Nord-Est. L'altitude moyenne est d'environ 407 m. Au Sud-Ouest, les terrains sont fortement entaillés par le réseau hydrographique. Vers le Nord, se développent des plaines inondables. La falaise gréseuse de Banfora, assez marquée, limite le bassin versant vers l'Est.

2.4.2. Hydrographie

Le Kou est une rivière pérenne qui prend sa source à Kodara au Sud-Ouest de Bobo-Dioulasso à une altitude de plus de 500m et draine les eaux de surface de neuf sous bassins (Figure). (Sauret, 2007). On distingue :

- en amont de la rivière Kou, les sous bassins du Yengué, Suo, Farakoba et du Kiépé
- en aval, les sous bassins du Bango, du Wé, du Niamé et du Yakouba.

Les principales sources sont les sources de Nasso, situées à 15Km à l'ouest de la ville, qui consistent en 3 grandes sources : la Guinguette, l'ONEA I et l'ONEA II auxquelles s'ajoutent les cours d'eaux de Yengué, Suo, Farakoba et du Kiépé, le Niamé, le Bingbélé et la source de Pesso.

Au niveau des sources de la Guinguette le débit d'étiage du Kou est de l'ordre de (58 00 m³/h (Source BD PESO, 2009). En aval, à la confluence de Bingbélé, il est de 187 m³/h (Source BD PESO, 2007)

Une autre rivière, le Wolo de faible débit, draine aussi une partie des eaux de surface à l'Est du Kou.

2.5. Contexte géologique

Dans le bassin du Kou les formations géologiques rencontrées sont:

1. La Formation des Grès de Kwadara de Sindou (GKS), (sogréah, 1994)

Elle n'affleure pas dans la zone d'étude. Elle est constituée par des grès qui reposent en discordance sur le socle cristallin et leurs épaisseurs varient entre 90 m à 350 m. La falaise de Banfora rencontrée au Sud- Sud- Est de la zone d'étude est essentiellement dominée par cette formation. Elle borde en affleurement la falaise de Banfora du Nord-Est de Bobo-Dioulasso jusqu'à la frontière malienne.

2. La formation des Grès Fins Glauconieux (GFG) de Takalédougou

L'épaisseur de la formation varie entre 100 et 500 m. Sa partie inférieure est composée d'une alternance de grès grossiers conglomératiques glauconieux et de minces niveaux de grès très fins, silteux à débit schisteux. La formation se termine par des grès fins ou moyens à passées grossières. La formation est peu ou pas fracturée. On note l'occurrence d'une faille d'effondrement Nord-Est-Sud-Ouest de faible extension (figure 3) qui serait à l'origine des

sources de Nasso. La base des Grès Fins Glauconieux présente des « mud cracks » qui traduisent encore des épisodes d'émersion. L'apparition de glauconie témoigne ensuite d'un environnement marin franc, de plate-forme continentale. Une lacune d'érosion est notée au sommet de la formation.

3. La formation des Grès à Granules de Quartz (GGQ)

Cette formation s'observe au centre du secteur d'étude, dans le lit de la rivière Kou. Elle est composée de Grès fin quartzite fin à moyen avec des passées de grès grossiers à gros galets. Elle est marquée par la présence de granules de quartz. Son épaisseur varie entre 300 et 600 m. Elle est bien fracturée (Sauret., 2007).

4. La formation des Silstones de Argilites de et Carbonates de Guéna Souroukoudinga (SAC)

Elle affleure sur une large bande dans la région de la marre aux hippopotames (Bama et Wolonkoto). Elle débute au contact de celle des CGQ par des grès fins rose avec des passés de grès grossiers et de minces niveaux d'argilites et de calcaires dolomitiques. L'épaisseur de la formation est estimée à 300m

5. La formation des Grès Fins Roses (GFR)

De faible extension, les GFR occupent une superficie de 25Km² au niveau de la zone d'étude, à l'Ouest du village de Bama.

Cette formation se compose de grès fins, roses à violacés, finement lités et très micacés.

6. Les Dolérites et Gabbros

Ils affleurent abondamment aux extrémités Ouest et Nord du bassin du Kou, sous forme de dykes d'extension kilométrique, en sills et en sneck, soit sous forme de pitons ou de coulées. Toutes les formations précitées sont découpées par des failles orientées Nord est-Sud ouest et Nord ouest-Sud est. Ces failles seraient à rejets verticaux.

7. Les formations superficielles

Elles sont représentées par les latérites, les alluvions argileuses ou sablo-argileuses et les formations de recouvrement. Les formations de recouvrement sont des formations de décomposition du substratum gréseux. Elles sont constituées de sables plus ou moins argileux, à argiles plus ou moins sableuses avec une épaisseur atteignant près de 40m par endroit.

La figure 3 ci-dessous présente les principales formations géologiques du bassin versant du Kou.

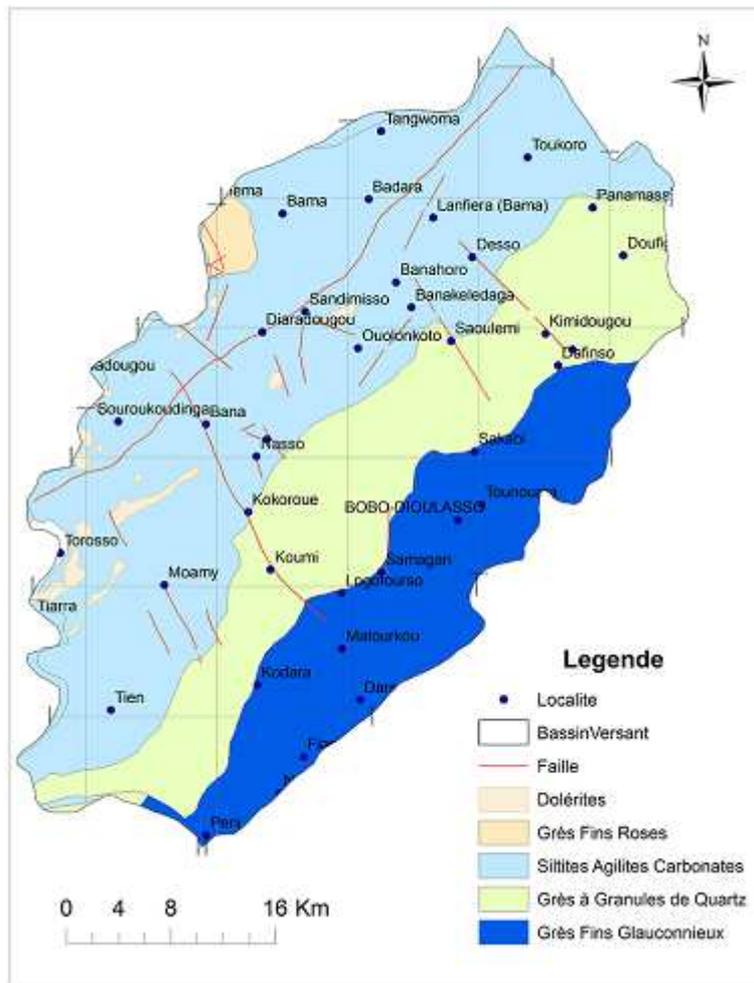


Figure 2: Principales formations géologiques du Bassin du Kou

2.6. Contexte hydrogéologique

Le contexte hydrogéologique de la zone d'étude est marqué par une alternance de dépôts perméables et peu perméables favorables à l'existence de couches aquifères. Dans le bassin du Kou, le nombre exact et l'extension des formations aquifères restent une énigme. Actuellement aucun forage profond n'a traversé toute la série sédimentaire pouvant donner des informations précises sur la puissance des formations aquifères et leurs limites. L'hypothèse retenue jusqu'ici par les acteurs serait l'existence d'une nappe d'eau unique hébergée au sein d'un aquifère multicouche (Sauret, 2007). Les différentes couches aquifères présentes donc dans la zone d'étude sont reconnues par des études antérieures. On observe du bas vers le haut :

1. L'aquifère des Grès de Kwadara Sindou (GKS)

D'après Sogreah, 1994, il repose soit sur des schistes très peu perméables, soit directement sur les granites du socle, en fonction de la morphologie du substratum ou de l'érosion. Les roches réservoirs sont composées essentiellement de grès et le toit de la nappe est constitué par des formations marines très peu perméables. Dans certains forages, des fortes hétérogénéités de conductivités électriques ont été observées : 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le Pz26 et 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le Pz13 (figure 3), probablement dues à la discontinuité de l'aquifère au contact du socle perméable. La valeur de transmissivité enregistrée lors de l'essai de pompage réalisé au Pz 13 avec un débit de l'ordre de 150 m^3/h est de transmissivité $10^{-3}\text{m}^2/\text{s}$ le coefficient d'emmagasinement spécifique vaut 10^{-4} .

2. L'aquifère des Grès Fins Glauconieux (GFG)

D'après Lorenzini., 2007, on retrouve à la base de l'aquifère GFG une épaisse série peu perméable de nature argileuse plus ou moins gréseuse, puis une série gréseuse et au sommet une couche peu perméable de nature argileuse. Cette nappe captive est sollicitée par certaines industries de la ville de Bobo-Dioulasso. Un test effectué sur le forage de la Brakina, situé dans la zone industrielle de Bobo-Dioulasso, avec un débit de 40 à 70 m^3/h , a donné une transmissivité de l'ordre de $7 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$. Le pH de ces eaux est relativement faible (5,3), et les conductivités électriques varieraient de 5 à 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces eaux sont également de type bicarbonaté calcique ;

3. L'aquifère des Grès à Granules de Quartz (GGQ)

Plusieurs observations de terrain ont conduit à admettre l'existence de 2 nappes au sein de la série GGQ. Celles-ci présentent une variation de la conductivité des eaux : de 75 à 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le GGQ inférieur, et de 5 à 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le GGQ supérieur.

Diverses analyses physico-chimiques ont confirmé la stratification de ces eaux. Les eaux de la partie supérieure ont un faciès de type chloruré calcique et celles de la base de type bicarbonaté calcique. Ces différentes nappes sont séparées de l'aquifère GFG par une couche d'argile plus ou moins gréseuse. La séparation entre les 2 niveaux aquifères est hétérogène et probablement discontinue, de type lenticulaire. Les roches réservoirs sont constituées par des grès très poreux et perméables. Le toit est composé de niveaux très peu perméables appartenant à la base du SAC. En ce qui concerne la productivité de l'aquifère, un essai de pompage (320 m^3/h) de longue durée sur le forage F3 a fourni une estimation de la transmissivité ($6 \times 10^{-2}\text{m}^2/\text{s}$) et du coefficient d'emmagasinement ($5,5 \times 10^{-4}$). Ces aquifères ont donc une très bonne productivité.

Cependant certains niveaux du GGQ inférieur sont de productivité médiocre ;

4. L'aquifère des Silstones Argilites et Carbonates de Guéna Souroukoudinga (SAC1)

Le mur de l'aquifère SAC est constitué d'une série d'argiles plus ou moins épaisses. L'roche aquifère est composée de grès très grossiers et glauconieux, et le toit est formé d'une épaisse couche de calcaire dolomitisé très peu perméable, sans aucun signe de karstification. Les eaux sont de type bicarbonaté magnésien. La productivité et les caractéristiques hydrodynamiques se limitent aux observations faites au cours du forage et à quelques petits essais de pompage de courte durée, et à faible débit. La transmissivité varie de $5,6 \times 10^{-4}$ à $1,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, selon les niveaux. Les conductivités électriques des eaux varient de 35 à 135 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

5. L'aquifère des Grès fins roses (GFR)

De faibles extensions, l'aquifère des GFR est constitué de grès quartzites très fins, micacés glauconieux, de couleur rose dominante. Il serait le réservoir d'une nappe peu épaisse moins profonde (la profondeur des eaux par rapport au sol est de l'ordre de 11m, Dakouré 2003). Cette nappe est captée par des puits traditionnels villageois dans le département Bama, Sakaby,...

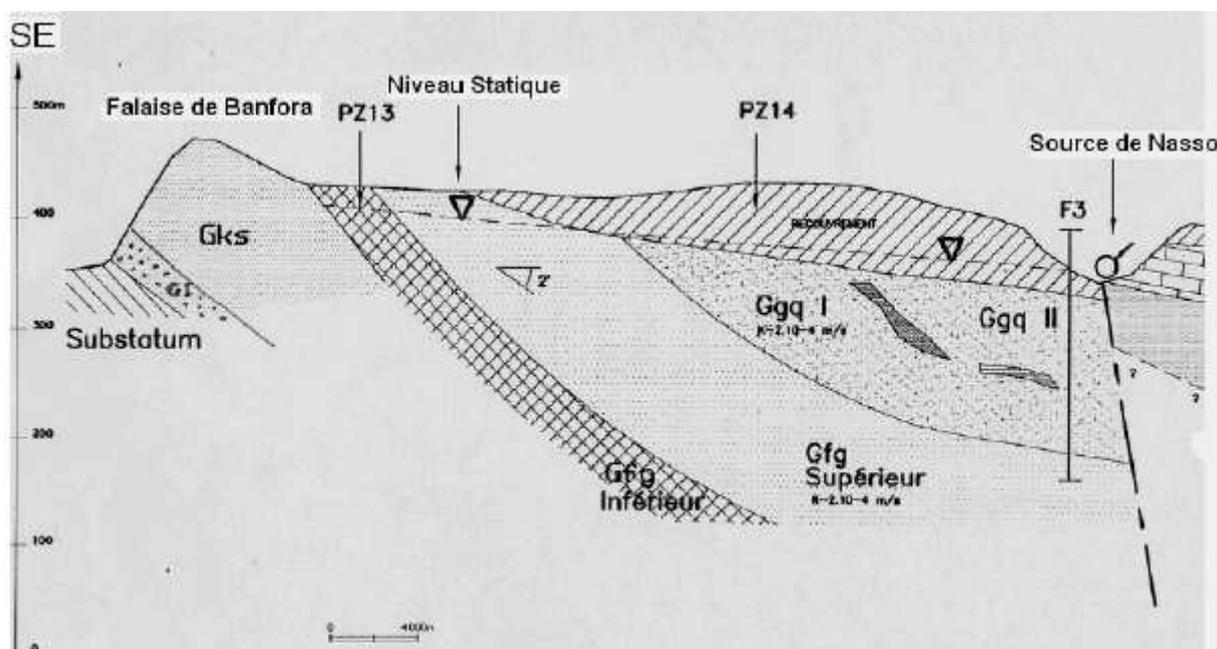


Figure 3: Coupe Hydrogéologiques et géologiques de la région de Bobo Dioulasso (Sogreah, 1994)

6. La plaine alluviale

Une plaine alluviale est la composition de trois éléments essentiels : le lit mineur, le lit moyen, le lit majeur et une nappe alluviale composée en majeure partie d'éléments fins. Les alluvions d'une plaine alluviale sont une roche meuble, composée de grains (ou de particules) entassés sans être soudés entre eux. On y trouve par granulométrie décroissante : des roches, des cailloux, des graviers, du gros sable, du sable fin, du limon, de l'argile (Poly, 1991). Une plaine alluviale est aussi décrite sous le vocable d'unités hydro géomorphologiques (figure 4) et ses limites sont circonscrites aux zones inondables d'un cours d'eau. L'aquifère de plaine alluviale, lorsqu'il existe reste le plus accessible, fournit d'importante quantité d'eau à faible profondeur et forme aux côtés des sources et aquifères souterrains profonds l'ensemble des eaux souterraines que l'on peut exploiter. Cette exploitation peut se faire dans les domaines de l'industrie, de l'agriculture que dans l'alimentation en eau potable des populations. Les matériaux des nappes alluviales, contrairement aux autres aquifères, sont faciles à creuser, même avec des moyens rudimentaires (pelle, pioche, tarière) ; Les puits ont de bons débits, dus à la bonne perméabilité générale des alluvions. L'alimentation de la nappe est très souvent importante, elle draine fréquemment l'eau provenant des nappes adjacentes (non alluviales) (Albinet, 1975) ; on peut donc pomper d'importantes quantités d'eau. La minéralisation de l'eau reste en général dans des limites acceptables, les éléments solubles des alluvions ayant déjà été dissous lors de leur dépôt. L'eau des nappes alluviales restent généralement de bonne qualité (sauf en cas de contamination) car longuement filtrée à travers les alluvions avant d'être recueillie et les bactéries ont été arrêtées ou sont mortes. Ces nappes présentent également des défauts : leurs alluvions sont très hétérogènes (zones perméables et imperméables). Les nappes alluviales se trouvent le plus souvent en interaction (échange d'eau) avec la rivière et/ou le substratum de la vallée si le lit de la rivière n'est pas colmaté ou si le substratum est perméable. La mise en place d'une plaine alluviale résulte des différents lits topographiques que la rivière a façonné dans le fond de vallée au fil du temps, au fur et à mesure des crues successives. (Ogou, 2008).

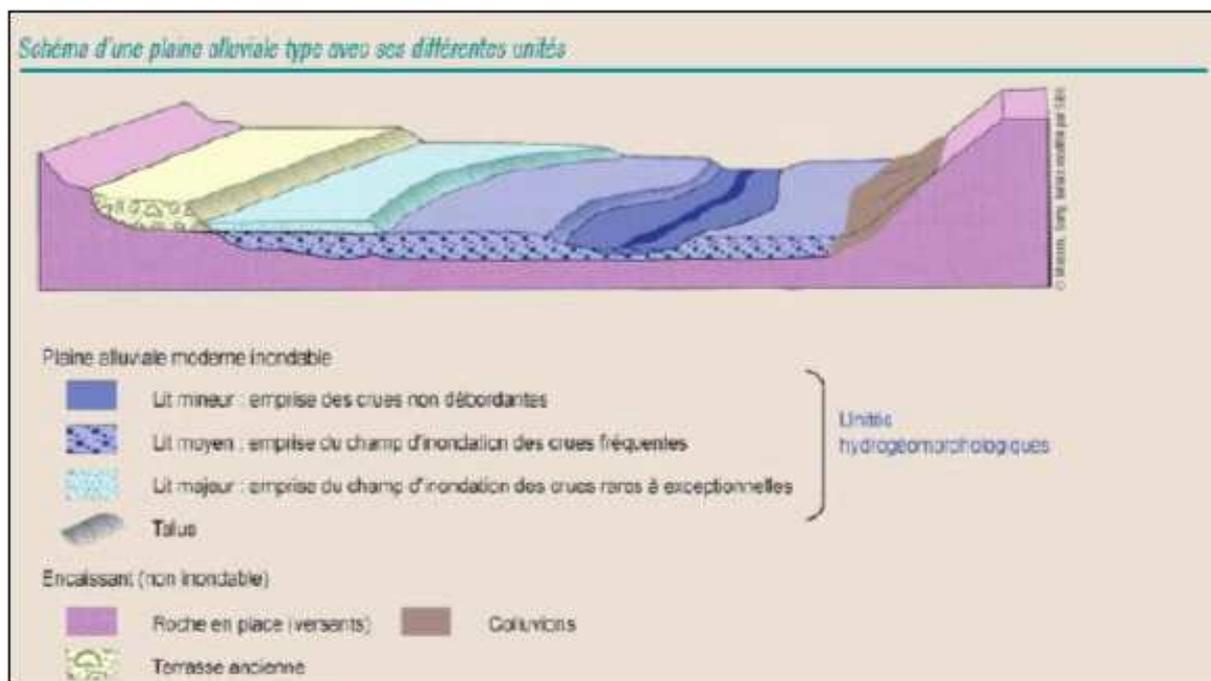


Figure 4: Plaine alluviale avec différentes unités (Masson, Garry, Ballais modifié par SIEE)

2.7. Les activités socioéconomiques

En plus de la demande en eau potable toujours croissante de la ville de Bobo-Dioulasso, demande actuellement satisfaite par les sources de Nasso (1380 m³/h), (Source PESO), le bassin connaît une intensification des activités agricoles le long du Kou qui se traduit par une exploitation sans cesse plus importante des eaux de la rivière. On dénombre aussi de nombreuses industries dans la commune de Bobo, 23 en 1997 dont 7 dans le domaine agroalimentaire et 7 dans l'industrie chimique (Dakouré D., 2003 ; Diallo., 2006). Certaines industries possèdent leurs propres forages en plus de l'alimentation en eau potable de l'ONEA.

3. Elaboration du Modèle Numérique de Terrain

3.1. Inventaire et analyse exploratoire non spatiale de l'existant

Trois modèles numériques sont disponibles au sein du projet :

- Le Modèle Numérique de Terrain SRTM (Shuttle Radar Topography Mission): c'est un modèle conçu par la NASA à partir d'images satellitaires. La taille des mailles est de 90 m x 90 m. (<http://srtm.csi.cgiar.org/Index.asp>)
- Le Modèle Numérique de Terrain élaboré par le projet pour tout le Sud-Ouest du Burkina Faso (par la suite désigné "MNT Sud-Ouest"): ce modèle a été conçu par le projet "Eaux Souterraines". Ce modèle a été généré à partir d'un ensemble de points levés avec précisions (points levés au DGPS, points topographiques de l'IGB,...) en utilisant l'outil "Topo to raster" du logiciel ArcGIS. Cet outil très performant permet d'élaborer des Modèles Numériques de Terrain qui restituent le réseau hydrographique sans aberrations (les directions d'écoulements simulées par le MNT sont les mêmes que les directions d'écoulements réelles). La taille des mailles du MNT Sud-Ouest est de 250 m x 250 m.
- Le modèle topographique de l'IGB : C'est un modèle mis en place par l'Institut Géographique du Burkina Faso (IGB). Il a été conçu à partir de la photogrammétrie (photos aériennes). L'ensemble des points de l'IGB obtenu à partir des photos aériennes a été généré sur une échelle de (1/200 000) avec une précision de l'ordre du dixième du dénominateur de l'échelle soit une précision de 20 m (Source, BD IGB).

Des analyses ont été faites pour tester la précision de ces deux modèles par rapport à leur utilisation pour des études qui nécessitent un Modèle Numérique de Terrain de grande précision.

En premier lieu, une analyse exploratoire non spatiale a été réalisée. Celle-ci concourt à interpréter les données sans tenir compte de leur répartition spatiale. Elle a pour but entre autres d'optimiser la compréhension de l'ensemble des données acquises, de détecter des valeurs anormales ou erronées, d'extraire des paramètres principaux capables de résumer l'ensemble. Il s'agira ainsi de représenter les données sous formes d'histogrammes et de procéder à son analyse mathématique (mode, minimum, maximum, médiane, moyenne) et de forme (écart type, variance) (Hélène, 2007).

Pour cela une analyse exploratoire non spatiale a été faite. Celle-ci a consisté à :

1. Générer un ensemble de points au sein de la zone d'étude à raison de 16 points au km².
L'obtention des points a été possible grâce à un découpage de notre zone d'études avec le MNT Sud-Ouest en exploitant les fonctionnalités « raster to point, editor, selection, field calculator, calculate geometry... » d'ArcGIS.
2. Calculer l'altitude donnée par la topographie (Z1), le MNT Sud-Ouest (Z2) et le SRTM (Z3) pour l'ensemble de ces points en exploitant les fonctionnalités de l'extension 3D Analyst de ArcGIS.
Ces altitudes ont été calculées en utilisant d'abord comme donnée d'entrée la topographie et comme donnée d'interpolation : le MNT Sud-Ouest. Puis on obtient en sortie les coordonnées X1, Y1 et l'altitude Z1 et Z2. Ensuite les coordonnées X1, Y1 et l'altitude Z1 et Z2 sont considérées comme donnée d'entrée et comme donnée d'interpolation : le SRTM. A la fin, on obtient les coordonnées X, Y des trois MNT et les altitudes Z1 (Topographie), Z2 (MNT Sud-Ouest) et Z3 (SRTM).
3. Calculer la différence d'altitude entre la topographie et le MNT Sud-Ouest (Z4) d'une part et entre la topographie et le SRTM (Z5) d'autre part pour chacun des points.
Les calculs ont été faits à partir des données topographiques de l'IGB car elles sont supposées d'une bonne précision par rapport aux autres modèles. Cela justifie notre choix de calcul par rapport aux données de l'IGB.
4. Transférer les coordonnées X, Y, Z1, Z2, Z3, Z4 et Z5 de ces points dans Matlab sous format texte pour le traitement statistique.
Ce traitement a consisté à construire des histogrammes et à calculer les paramètres statistiques à l'aide d'un code de calcul déjà établi (Danneels Gaëlle, 2008).

Tableau 2: Variantes statistiques du MNT Sud-Ouest et de l'écart

	Min	Max	Mean(m)	Geomean	Médiane	Variance (s ²)	Ecart type (s)	P25	P75
ZSW	292,43	638,60	385,89	379,07	356,06	5810,73	76,23	326,00	437,50
ZSRM	298,58	546,74	385,32	379,29	357,64	4967,36	70,48	327,90	443,30
ZTOPO	292,00	791,00	393,48	384,81	355,00	7981,12	89,34	328,75	454,00
ZSW-ZTOPO	-173,14	8,39	-7,59		-0,26	562,75	23,72	-4,33	1,65
ZSRM-ZTOPO	-298,95	21,04	-8,16		2,18	1683,08	41,03	-3,61	6,23

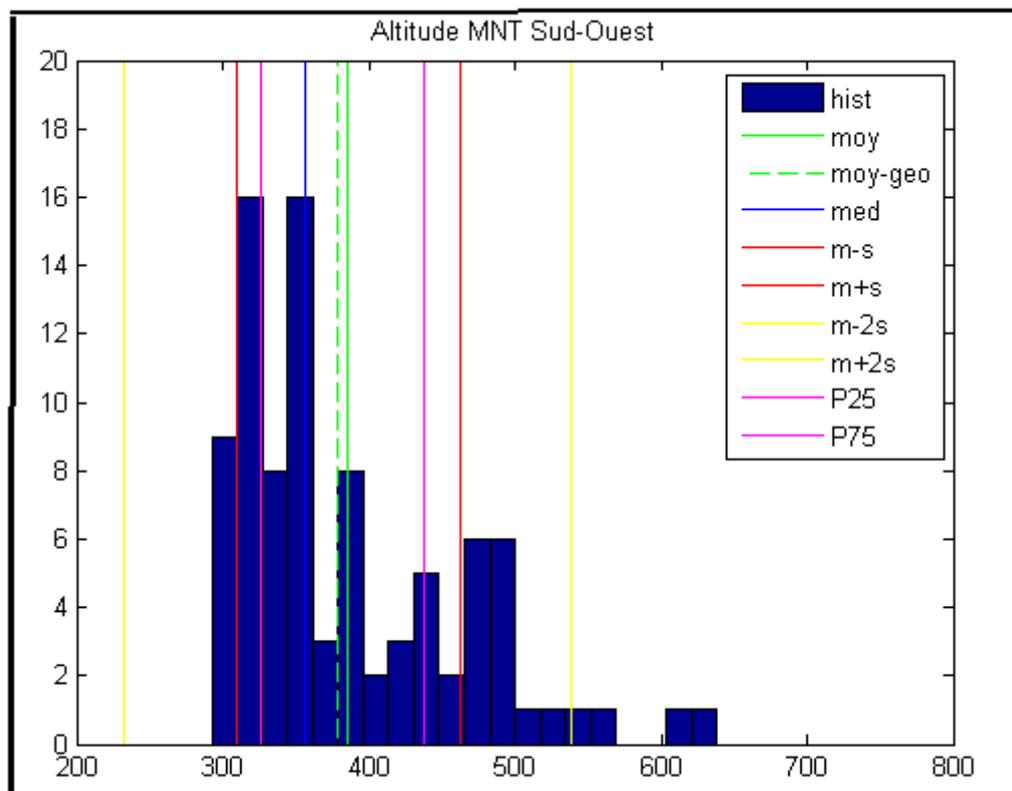


Figure 5: Histogramme du MNT Sud-Ouest avec les variantes statistiques

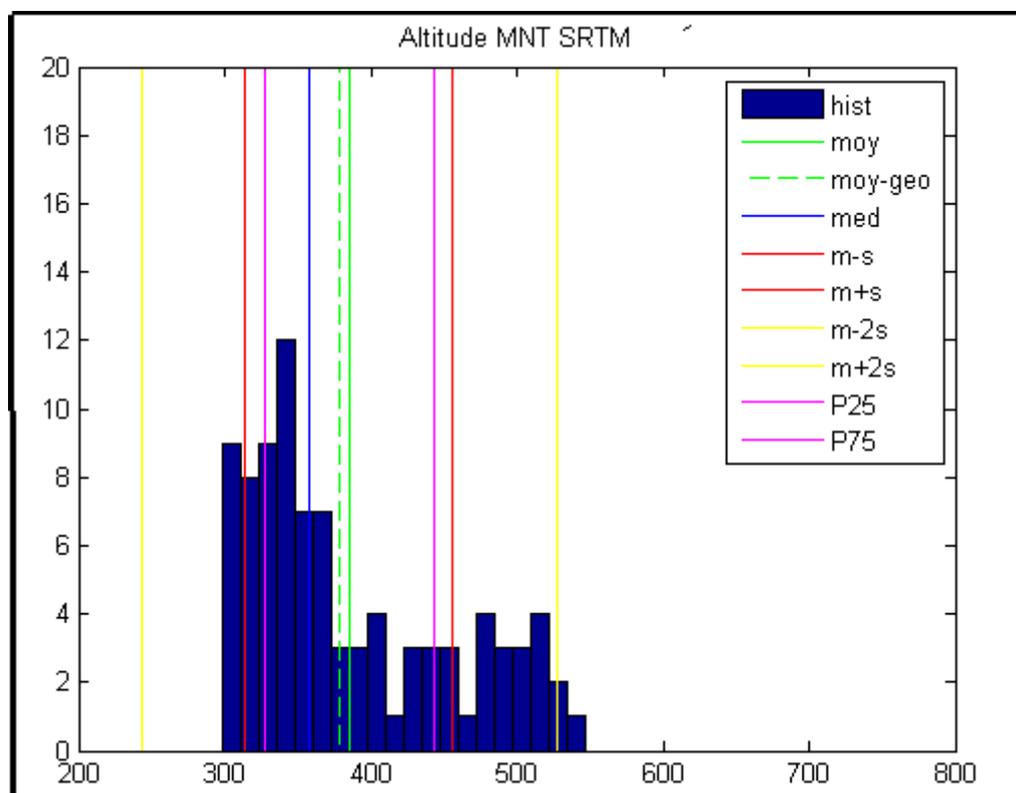


Figure 6: Histogramme du MNT SRTM avec les variantes statistiques

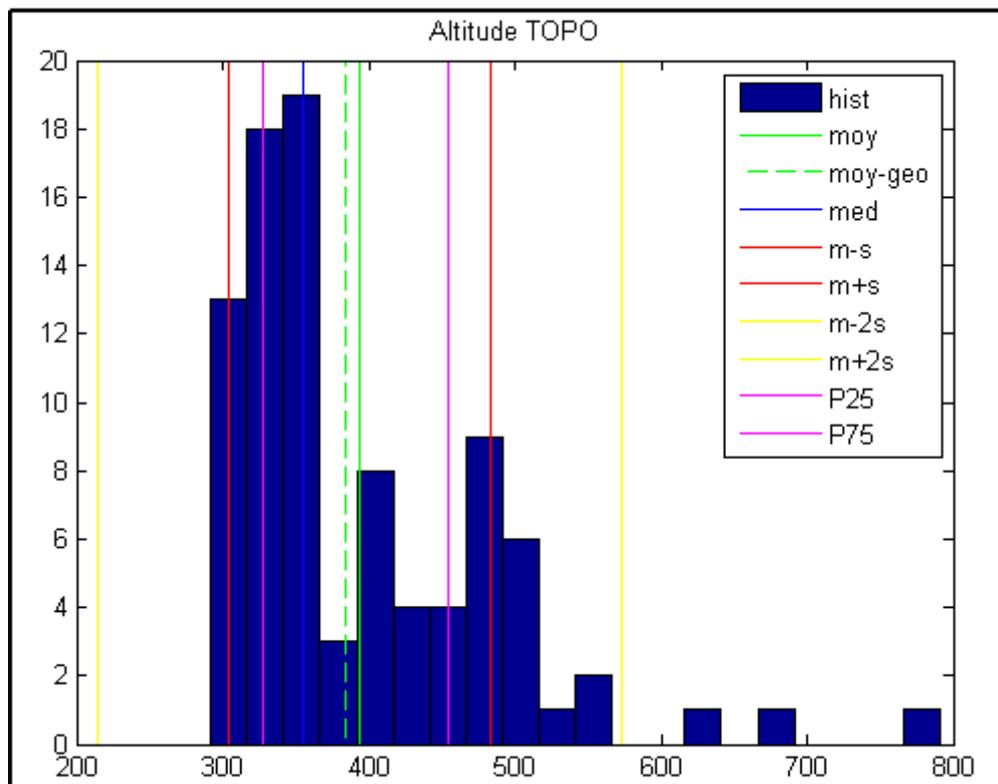


Figure 7: Histogramme de la Topo avec les variantes statistiques

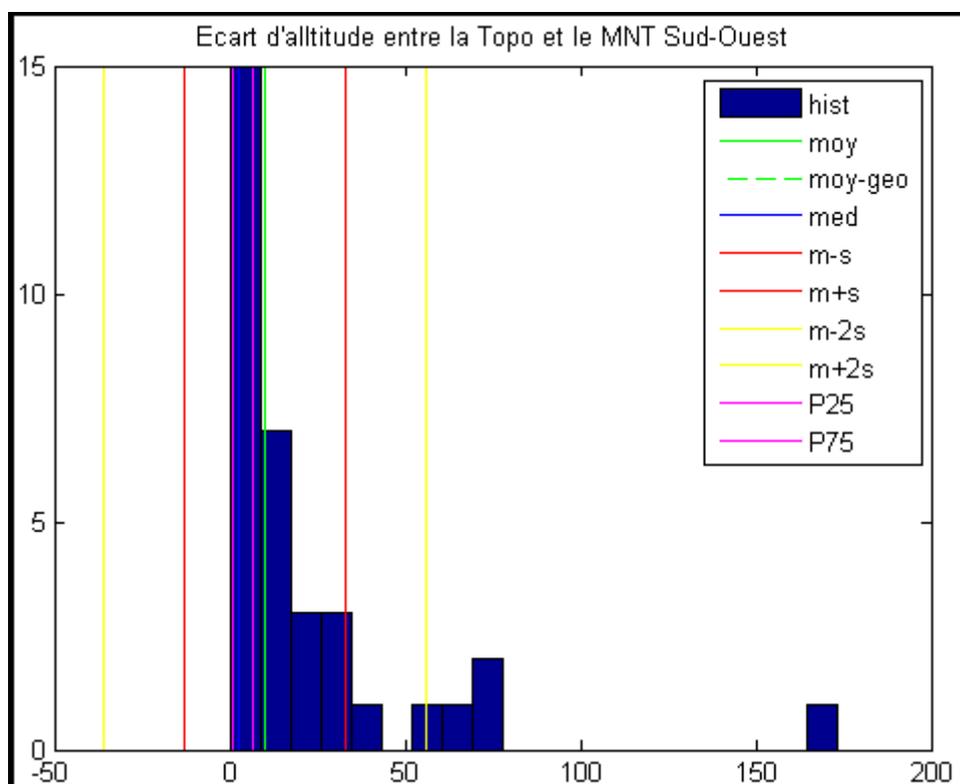


Figure 8: Histogramme de l'écart topo et MNT Sud-Ouest

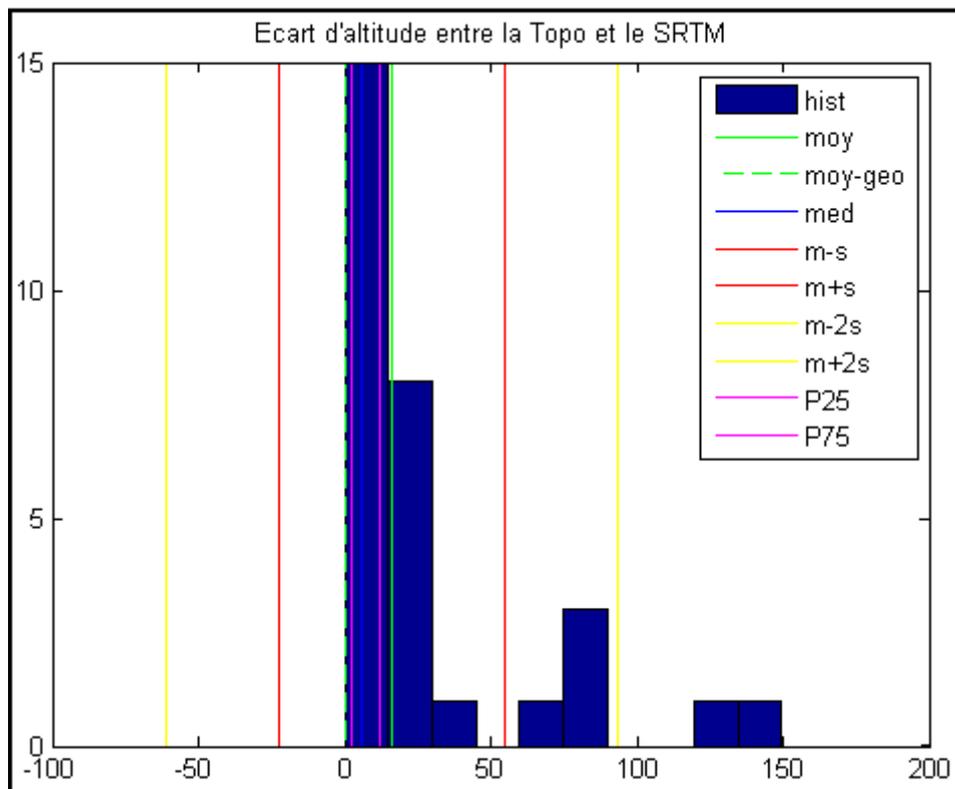


Figure 9: Histogramme de l'écart Topo et SRTM

Avant de procéder à l'analyse des paramètres statistiques une définition des différents paramètres est nécessaire :

- ✓ Le mode : c'est la valeur qui correspond à la plus forte fréquence d'observation
- ✓ La médiane : c'est la valeur qui représente le milieu d'une série statistique
- ✓ Le percentile (P25-P75) : c'est la valeur telle que 25% ou 75% des observations lui sont inférieure
- ✓ La moyenne arithmétique : c'est le centre de gravité des valeurs d'une série statistiques
- ✓ La variance : c'est la moyenne arithmétique du carré des écarts à la moyenne
- ✓ L'écart type : c'est la racine carré de la variance
- ✓ Une distribution symétrique : c'est une distribution de type normale dont la moyenne arithmétique correspond à la médiane
- ✓ Une distribution asymétrique : c'est une distribution de type log normale dont la moyenne géométrique correspond à la médiane.

Les histogrammes des altitudes du MNT Sud-ouest, du SRTM et de la Topographie (figure 5, 6 et 7) présentent tous une asymétrie positive c'est-à-dire que la queue de la distribution s'étire vers les valeurs les plus élevées.

Les histogrammes des écarts présentent aussi une distribution asymétrique.

L'analyse des paramètres statistiques s'est faite par rapport celui de la topographie et des forages levés au DGPS.

1. Analyse comparée du Modèle Numérique de Terrain Sud-Ouest et les côtes topographiques

Les paramètres statistiques montrent que les altitudes du MNT Sud-Ouest et de la topographie sont respectivement comprises entre 292,43 et 638,60 m et entre 292 et 791 m, leurs moyennes arithmétiques sont différentes comprise entre 385,89 m pour le MNT Sud-Ouest et 393,48 m tandis que leurs médianes sont relativement égales. Ce qui permet de dire que l'altitude moyenne du Sud-Ouest est de 393,48 m pour les côtes topographiques et de 385,89 m pour le modèle Sud-Ouest et que 50% des altitudes des deux modèles sont presque les mêmes. La variance et l'écart type ainsi que l'interquartile (P25-P75) sont les plus élevées pour la topographie que pour le MNT Sud-ouest ce qui montre que la distribution des valeurs de la topographie a une plus grande dispersion que celle du MNT Sud-Ouest. Cette dispersion est due à une plus grande discontinuité des valeurs de la topographie contrairement à celle du MNT qui sont beaucoup plus lissées (proches les unes des autres)

2. Analyse comparée du Modèle SRTM et les côtes topographiques

La même analyse est faite pour le SRTM. Les paramètres statistiques montrent que les altitudes du SRTM et de la topographie sont respectivement comprises entre 298,58 et 546,74 m et entre 292 et 791 m, leurs moyennes arithmétiques sont différentes comprises entre 385,32 m pour le SRTM et 393,48 m pour les côtes topographiques de l'IGB tandis que leurs médianes sont relativement proches. La médiane montre que 50% des altitudes des deux modèles sont presque les mêmes. La variance et l'écart type ainsi que l'interquartile (P25-P75) sont les plus élevées pour la topographie que pour le SRTM ce qui montre que la distribution des valeurs de la topographie a une plus grande dispersion que celle du MNT Sud-Ouest. Cette dispersion est due à une plus grande discontinuité des valeurs de la topographie contrairement à celle du SRTM qui sont beaucoup plus lissées (continues)

Les valeurs de l'écart (erreur) du SRTM sont comprises entre -298,95 et 21,04 m avec une moyenne de -8,16 m, un écart type égal à 41,03 m et une médiane de 2,18 m. Tandis que celui du MNT Sud- Ouest est -173,14 et 8,39 m avec une moyenne de - 7,59, un écart type de 23,72 et une médiane de -0,26 entre. Cela nous permet de dire qu'il y'a un biais entre les valeurs du SRTM et celle de la topographie d'une part et entre les valeurs du MNT-Sud-Ouest et la topographie d'autre part.

Conclusion : Le nombre de points trouvés (90 points) dans la zone d'étude à partir de l'outil « Analyst 3D » d'ArcGIS 9.2 pour réaliser les statistiques étant faible il nous est difficile de tirer des conclusions définitives quant à l'exactitude des deux modèles. Mais l'analyse nous permet d'apprécier la qualité des modèles. En effet l'analyse montre que l'écart est important pour les deux modèles. Sur cette base les deux modèles ne sont pas assez exacts pour réaliser des applications hydrologiques. Car notre objectif est d'extraire un réseau de drainage aussi précis que possible pour actualiser notre réseau de drainage qui date de 1957 (Joost Wellens, source orale) et levé au mieux les altitudes des différents ouvrages (forages, piézomètre...) dans la zone d'étude dans la perspective de la modélisation de la plaine alluviale.

Les grandes applications du MNT en hydrogéologie, étant l'extraction du MNT, du réseau hydrographique, des bassins versants, la réalisation de la carte des pentes, de la carte d'occupation des sols et l'identification des zones potentielles de décharge des nappes par la déviation standard de l'Indice de Végétation Normalisé (SDVI) et par l'indice de rupture de pente, il ressort par conséquent que la précision et l'exactitude de ces applications dépendent donc de la qualité du MNT.

Les deux modèles ne répondant pas aux objectifs fixés par le projet pour des études de grandes précisions, il a été nécessaire d'établir un autre modèle basé sur des images satellitaires en utilisant la technique de la télédétection.

3.2. Généralité sur la télédétection

3.2.1. Principe et définition de la télédétection

D'après WU., 2003 cité par Midekor., 2008, le principe de la télédétection, repose sur l'acquisition de signaux de radiation ou de réflexion de l'objet, par exemple, l'utilisation des sols, par un capteur à distance installé sur différentes plates-formes (telles que l'avion, le satellite) en utilisant les bandes visibles, infrarouge et micro-onde. On distingue la télédétection passive (la perception et l'enregistrement du rayonnement naturel ou de la réflexion de l'énergie solaire des objets) et la télédétection active (illumination des objets précis puis collecte de l'information à partir de la réflexion de l'énergie émise par la plate-forme elle-même)

La télédétection se définit comme une technique permettant l'acquisition d'information bio-géophysique à la surface de la terre sans contact direct avec ceux-ci. Elle est basée sur la mesure du rayonnement électromagnétique réfléchi par des objets. Elle fait référence aux premiers types de capteurs qui opèrent dans le domaine allant du visible à l'infrarouge. Les caractéristiques fondamentales des images de télédétection sont la résolution spectrale, radiométrique et spatiale.

La résolution spectrale se réfère à un intervalle de longueur d'onde spécifique dans le spectre électromagnétique qu'un capteur peut enregistrer (Simonett)(Simonet, 1983)

La résolution spatiale correspond à la plus petite tâche au sol qu'un capteur peut détecter et dont la réflectance diffère de son environnement. On exprime la résolution des images par la taille couverte par un pixel ou « picture image » (Yésou, 1993).

La résolution radiométrique d'un capteur décrit sa capacité à reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique.

La mise en place d'un modèle Numérique de Terrain nécessite l'acquisition des données spatiales (images satellitaires) obtenues à partir de la télédétection.

3.2.2. Domaines d'application et avantage de la télédétection

L'objectif principal de la télédétection est de cartographier les ressources terrestres et d'en effectuer le suivi. Elle est utilisée pour la gestion des ressources naturelles dans le domaine de la géomorphologie, le climat, la végétation, l'hydrologie l'agriculture, la géologie, l'hydrogéologie etc...

Son principal avantage est que les observations faites par télédétection contribuent à la gestion intégrée de l'environnement et des ressources naturelles, car l'environnement et tout ce qu'il renferme peuvent être observés comme un seul et même système. Aussi par rapport aux techniques de levée classiques, la télédétection par satellite est précise et rentable, et permet d'obtenir des données en temps utile (Midekor, 2008)

3.3. Outils, Matériels et Méthodes

3.3.1. Outils

Dans la réalisation des objectifs de ce travail des outils sont utilisés pour sa mise en œuvre à savoir le logiciel de télédétection ENVI 4.3 et le logiciel de système d'information géographique ArcGIS 9.2.

Le logiciel de télédétection RSI Envi 4.3 (Environment for Visualizing Image) est un des plus puissants outils qui permet l'analyse, l'extraction rapide, facile et exacte de l'imagerie géospatiale. ENVI fournit une visualisation intégrale des données et une analyse d'images de tailles et de types divers. Dans le cadre de cette étude, ENVI a été utilisé d'abord pour l'affichage des données sous forme d'images, puis pour la manipulation de ces images. La manipulation des images dans la zone d'étude comprend la définition de la projection ou la reprojection d'images, la conversion d'image jusqu'à l'extraction du MNT.

Le logiciel ArcGIS 9.2 est un logiciel de Système d'Information Géographique permettant de visualiser, interroger, analyser et mettre en page les données. Il fournit des outils interactifs pour explorer, sélectionner, afficher, éditer, analyser, symboliser et classifier les données ou pour créer automatiquement, mettre à jour ou gérer les métadonnées.

ArcGIS 9.2 comprend Arcatalog, ArcMap et ArcToolBox.

3.3.2. Matériels: Acquisition des images ASTER

Dans le cadre de cette étude les données utilisées sont les données fournies par le capteur ASTER.

ASTER (Advanced Space borne Thermal Emission and Reflectance Radiometer) est un capteur multispectral lancé en 1999 à bord du satellite Terra de la NASA. ASTER couvre une large région spectrale avec 14 bandes allant du visible à l'infrarouge thermique avec une résolution spatiale, spectrale et radiométrique élevée. (Hélène, 2007).

Aster est constitué de 14 bandes avec trois différents sous système (Tableau 1)

- VNIR (Visible and Near- infrared): 3 bandes :

Les bandes du VNIR sont 1, 2 et 3. La bande 3 est divisée en deux : la 3N qui est enregistré suivant le nadir et la 3B qui est obtenue en vision arrière. Il existe 64 secondes entre le moment où la 3N est acquise et l'acquisition de la 3B pour la même zone (Figure 10). Ceci permet d'obtenir des images stéréoscopiques (image du visible et proche infrarouge). L'utilité des bandes du VNIR c'est qu'elle fournit des images 3N et 3B avec un rapport B/H de 0,6 ce qui est proche de l'idéal pour générer des modèles Numériques de Terrains (Hirano, 2003). L'avantage majeur des images 3N et 3B réside dans le fait qu'elles soient acquises à quelques secondes d'intervalle donc sous les conditions environnementales et de luminosité presque uniformes.

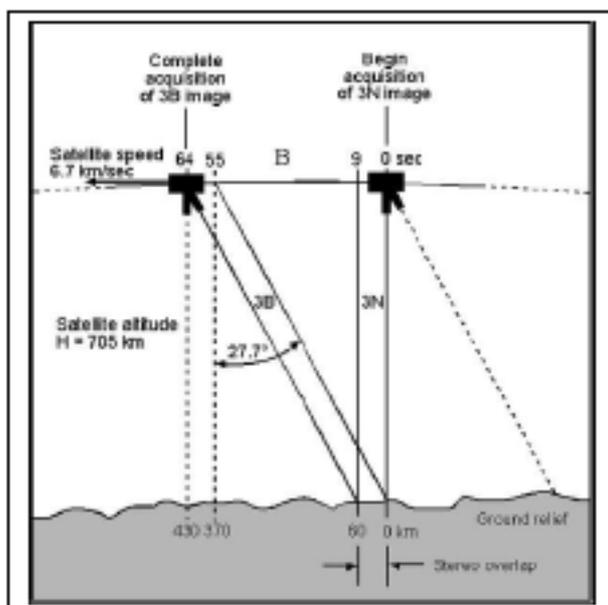


Figure 10: Diagramme simplifié de la géométrie d'acquisition des images d'Aster (modifié à partir de <http://asterweb.jpl.nasa.gov/> par Toutin, 2002 cité par Hélène, 2007)

- SWIR (ShortWave Infrared): 6 bandes

Le SWIR comporte six bandes de résolution spatiale 30m qui sont les bandes 4, 5, 6, 7, 8 et 9. L'utilité des bandes du SWIR est qu'elle permet de créer des compositions colorées ainsi que des rapports des bandes. Ceux-ci est très utile en cartographie géologique spécialement pour l'identification des roches et des types d'altération hydrothermale (Yamaguchi et al., 1998, 2001 in Rouskov., 2005).

La bande 4 correspond à la région spectrale où la plupart des roches et des minéraux ont une réflectivité maximale. Les bandes 5 et 9 couvre la région du moyen Infrarouge où la plupart des ions OH⁻ et carbonates présentent des pics d'absorption. Par exemple le rapport de la bande 4/5 permet de mettre en évidence les altérations hydrothermales et l'alunite (sulfate naturel de potassium et d'aluminium) (Hélène, 2007). La Kaolinite et la montmorillonite sont mises en évidence par le rapport 4/6, alors que le rapport 4/7 montre la présence de calcite (Rouskov, 2005).

Les bandes du SWIR sont également utiles à la cartographie des sols. Elles permettent aussi une différenciation des états d'humidité.

- TIR: 5 bandes

Le TIR (Thermal Infrared) comporte 5 bandes de résolution spatiale 90 m qui sont les bandes 10, 11, 12, 13, 14. L'utilité des bandes spectrales TIR est qu'elles peuvent être utilisées pour générer des cartes de silices abondantes dans une zone. (<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/guesthome.jsp>)

Pour ce travail, c'est la bande 3 du VNIR qui nous intéresse. Elle présente deux composantes 3N et 3B idéales pour la réalisation d'étude stéréoscopique. L'avantage de cette bande est que la composante 3N avec les bandes 1 et 2 couvre la même portion de territoire et les bandes 1 et 2 peuvent être superposées pour créer un composé en couleur (Figure 11). Elle permet également de réaliser des Modèles Numériques de Terrain et est utile pour des études géomorphologiques.

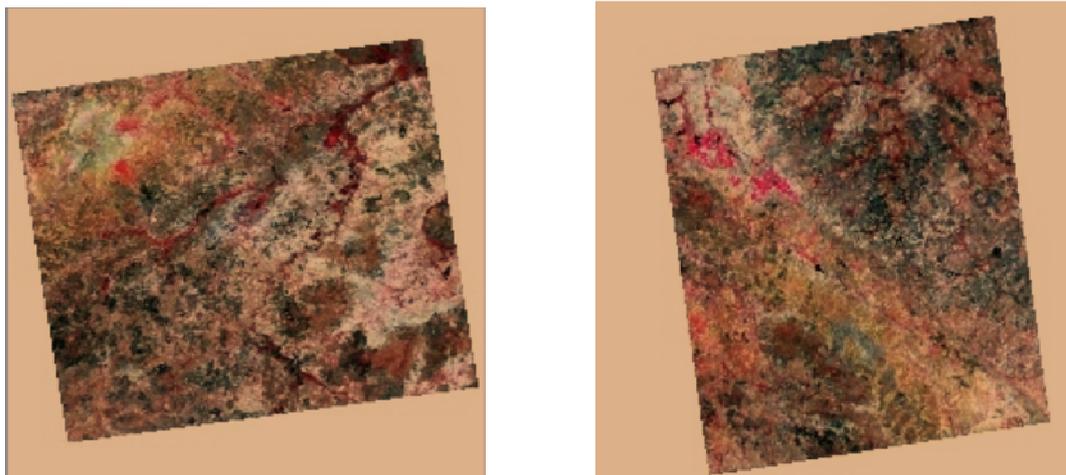


Figure 11: Composition colorée 321 des deux images Aster du bassin du Kou

Tableau 3: Caractéristiques des sous système d'Aster (Aster handbook)

Sous systèmes	Bandes spectrales	Régions spectrales (μm)	Résolution spatiales (m)
VNIR	1	0,52-0,60	15
	2	0,63-0,69	
	3N	0,78- 0,86	
	3B	0,78-0,86	
SWIR	4	1,60-1,70	30
	5	2,145-2,185	
	6	2,185-2,225	
	7	2,325-2,285	
	8	2,295-2,365	
	9	2,360-2,430	
TIR	10	8,125-8,475	90
	11	8,475-8,825	
	12	8,925-9,275	
	13	10,25-10,95	
	14	10,95-11,65	

Source (Hélène, 2007)

La résolution des images ASTER (15 mètres) fournit suffisamment de détails pour permettre une gamme importante d'applications tout en gardant une scène suffisamment grande de 60 Km \times 60 Km.

Ces images ont été obtenues à partir du site internet d'EOS (Earth Observation System ou Système d'Observation de la Terre) à travers le centre LPDAAC (The Land Processes Distributed Active Archive Center) qui est établi comme une partie d'EOS. Il est chargé de la réception, de la correction, de l'archivage et de la distribution des images ASTER.

3.3.3. Méthodologie d'exploitation des images ASTER

Différents types d'images sont fournis par le capteur ASTER dont les données de niveau 1 (Level 1 ou L1). Celui-ci comporte deux types de données : les images L1A qui contiennent des données brutes avec des coefficients de correction géométriques, les coefficients de calibration radiométriques calculés et apposés mais non appliqués. Quant aux images L1B, elles sont obtenues à partir des L1A en leurs appliquant ces coefficients pour des corrections géométriques et radiométriques ([http:// asterweb.jpl.nasa.gov/data_products.asp](http://asterweb.jpl.nasa.gov/data_products.asp)). Les images qui sont utilisées pour notre travail sont les images L1B obtenues après traitement.

Pour élaborer la méthodologie, deux scènes (zone couverte par le satellite) d'images satellitaires ASTER de décembre 2001 couvrant presque l'ensemble du bassin du Kou ont été utilisées (Figure 13) :

- Image Ast_L1B_00312282001105313_20081217171754_28373.hdf
- Image Ast_L1B_00312282001105322_20081217171754_28328.hdf

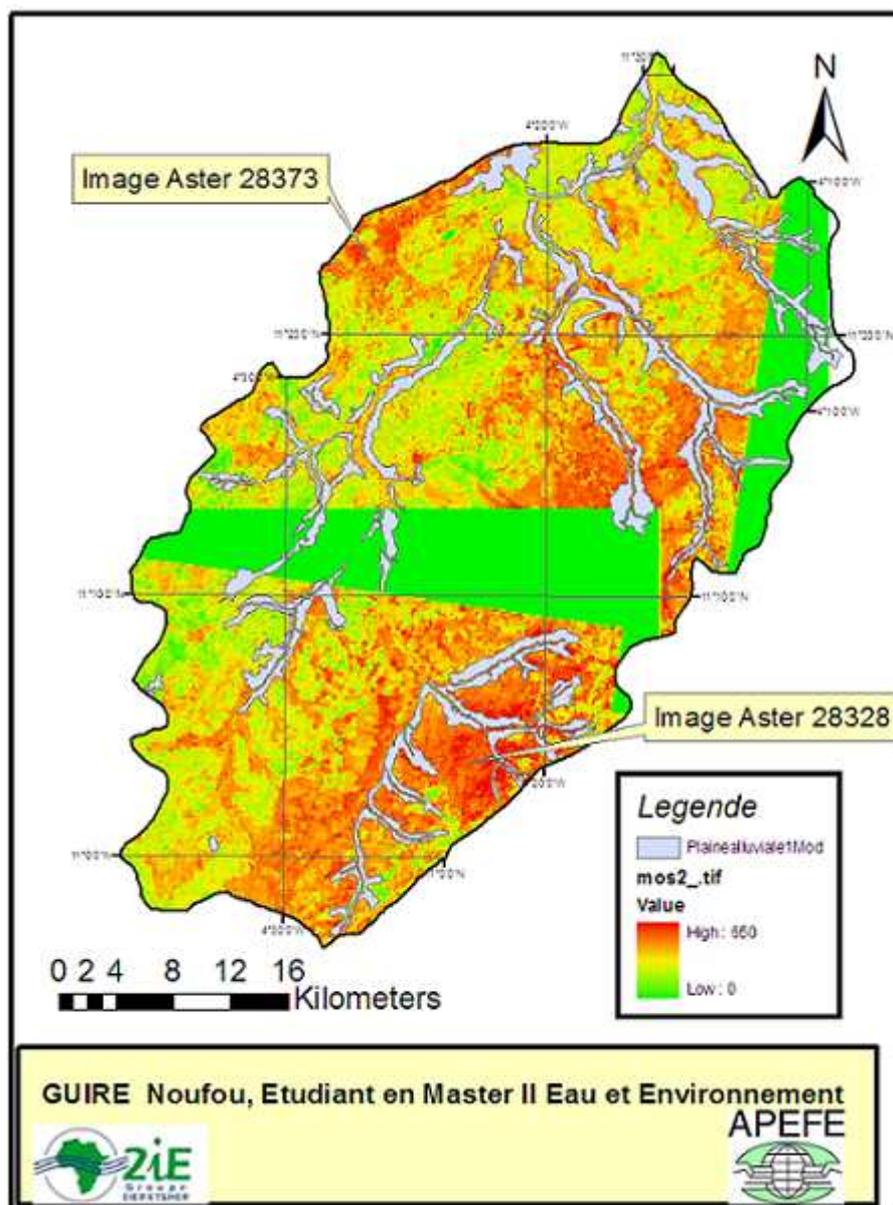


Figure 12: Scène de deux images satellitaires Aster couvrant le bassin du Kou sans traitement préalable

3.3.3.1 Traitement des images

Les images dont nous disposons sont des images L1B déjà converties, corrigées, orthorectifiées (correction de l'effet de parallaxe que présentent les images du SWIR) et géoréférencées (mettre les images dans un système de coordonnées géographiques et par la suite dans un système de projection qui se trouve être ici le système UTM projeté dans la zone 30N pour pouvoir superposer ultérieurement les images aux autres cartes qui sont dans ce système). Elles n'ont pas nécessité de traitement particulier.

3.3.3.2 Extraction du Modèle Numérique de Terrain

Le modèle numérique de terrain a été réalisé avec L1B à l'aide du logiciel ENVI 4.3 à partir de la paire stéréoscopiques 3N et 3B.

L'extraction du modèle numérique de Terrain (MNT) s'est faite en plusieurs étapes. On distingue dans le processus d'extraction d'un MNT trois points principaux pour obtenir un résultat satisfaisant : la création de l'image épipolaire, de l'image de parallaxe et le géocodage.

- Création des images épipolaires (Figure 4)

Si m est la projection sur une image d'un point M vu par un capteur en position C_1 , le point qui correspond sur l'autre image, lorsque le capteur est en position C_2 , appartient à une droite (C_1C_2) appelée ligne épipolaire. Le rapport entre m et cette droite est défini par la matrice fondamentale. Les images épipolaires sont les traces du plan épipolaire (C_1, C_2, M) sur chaque image. Lorsque le point M bouge, les points e_1 et e_2 restent fixes. Ce sont les épipôles. Ils correspondent à l'endroit où le capteur en position C_1 « voit » le capteur en position C_2 .

Le fait qu'un point au sol et les deux centres optiques appartiennent au plan épipolaire implique que pour un point donné sur une image, le point qui lui correspond sur l'autre image appartient à une ligne dont on connaît la position. L'identification des points homologues est donc facilitée car l'espace de recherche est restreint aux lignes épipolaires.

(http://www.ipgp.jussieu.fr/~delorme/doc/extraction_MNE.pdf)

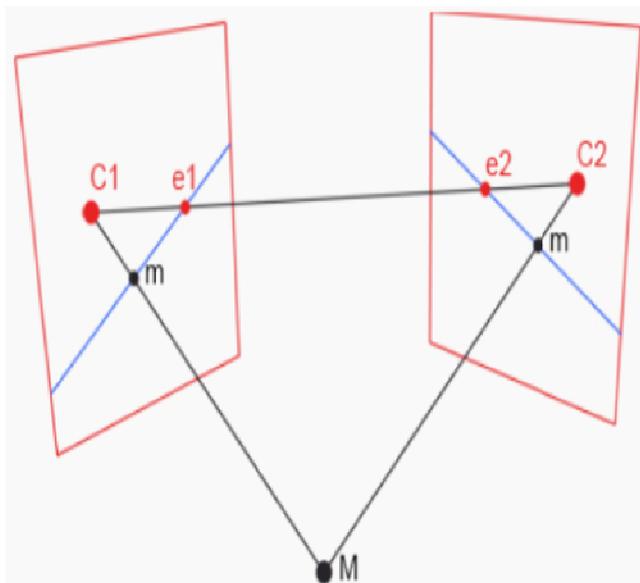


Figure 13: La géométrie épipolaire

- Création de l'image de l'image de parallaxe
L'image de parallaxe stocke la différence entre les coordonnées en x des points homologues le long des droites épipolaires. Cette différence est utilisée pour construire le MNT. La qualité de l'image de parallaxe a donc une influence sur celle du MNT.
- Géocodage
A partir de la projection épipolaire, le MNT est ré-projeté dans une projection et dans les unités définies par l'utilisateur (WGS UTM 1984 Zone 30N). Cette étape implique un ré échantillonnage (déterminer une fraction de taille correspondant au pixel) à la taille de pixel spécifiée.

Le MNT peut être relatif ou absolu. Un MNT absolu est calé avec des coordonnées géodésiques (référentiel horizontal) et avec le niveau moyen de la mer (référentiel vertical). Des points de contrôle au sol (*Ground control points*; GCP) et de *tie points* sont nécessaires afin d'obtenir un MNT absolu. Tandis qu'un MNT relatif est réalisé sans référence de localisation et donc sans *tie point*. Un MNT relatif présente moins de précision que le MNT absolu

Dans notre cas il s'agit de créer un MNT absolu dont les principales étapes sont les suivantes (ENVI Online Help, 2007).

- 1) La définition des données : Elle consiste à sélectionner les deux images du couple stéréo 3N (image de gauche) et 3B (image de droite)
- 2) La sélection des *Ground control points* : Elle consiste à sélectionner des GCPs soit de manière interactive, soit à partir d'un fichier. Dans notre cas la sélection s'est faite de manière interactive car nous ne disposons pas des coordonnées des images des deux couples de paire stéréo.
- 3) L'étape 3 (Vue, ajout et édition des GCPs) permet de voir, d'ajouter et d'éditer les GCPs de manière interactive. Elle montre à travers les coordonnées des images du couple stéréo les pixels sélectionnés sur les images 3N et 3B. Elle permet également de faire des comparaisons entre les coordonnées prédites par les images et les coefficients polynomiaux rationnels (rational polynomial coefficients ; RCP) et les vraies coordonnées de la carte (X, Y, Z) afin de pouvoir déterminer les GCPs qui sont valides ou non. Cette comparaison permet de faire des ajustements sur les images et faire des mises à jour.

Cette étape nécessite un minimum de quatre GCPs pour réaliser le modèle de calcul mais un plus grand nombre contribuera à mieux réaliser l'ajustement. Dans notre cas 89 GCPs ont été introduits et repartis le mieux possible sur les images. Nos GCPs sont les bornes géodésiques (bornes dont les coordonnées sont connues avec précision) du Burkina Faso prises à l'échelle du bassin du Kou, les levées au DGPS des forages et les points topographiques du bassin du Kou.

La sélection des GCPs permet de mettre les deux images (3N et 3B) dans le même système de coordonnées.

- 4) La collection des *Tie points* servent à informer explicitement le logiciel qu'un pixel manuellement sélectionné (ici un GCP) sur la 3N correspond au pixel manuellement sélectionné sur la 3B. Cette partie propose trois façons de définir les *Tie points* : La génération automatique de points par ENVI, le choix de *Tie points* par l'utilisateur ou l'importation à partir d'un fichier. Dans notre cas la génération automatique de points par ENVI a été utilisée. Les paramètres sont les suivants : le nombre de *Tie points* et la taille de la fenêtre de recherche (représente un extrait de l'image dans laquelle la fenêtre glissante cherche la corrélation de topographie pour placer un *Tie point*). Ainsi les deux images étant Co-registrées, la seule différence qui peut exister pour un même GCP sur la 3N et sur la 3B est une différence de parallaxe qui servira à calculer l'élévation et c'est ce que l'on cherche à extraire à travers le MNT. L'effet de parallaxe est dû à l'angle de prise de vue qui est différente pour la 3N (vision au nadir donc à 90°) et la 3B (vision arrière avec un angle de 27,7°) (Hélène, 2007). Après la collection des *Tie points* le modèle de calcul est réalisé, permettant la création d'image épipolaires.

- 5) L'étape 5 (Vue, ajout et édition de *tie points*) : A ce niveau on a la possibilité d'éditer, ajouter, ou supprimer des *Tie points*. Le but est d'obtenir une répartition homogène sur la zone commune aux deux images. A ce niveau également l'erreur maximum autorisée pour pouvoir passer à l'étape suivante est de 10 pixels. La valeur du Maximum Parallax permet de contrôler cette erreur globale induite par l'ensemble des *Tie points*.
- 6) La génération d'images épipolaires : Une fois les *Tie points* définis les images épipolaires sont créées à partir des paires stéréo 3N et 3B précédemment définies en se basant sur le modèle mathématique (la géométrie épipolaire). Les coefficients du modèle mathématique sont utilisés dans des équations de transformations qui convertissent la paire stéréo 3B en une image épipolaire qui est conjuguée à la 3N (Figure 9 & 10).
- 7) L'étape 7 (Définition du système de projection du MNT) permet de définir la projection, l'étendue et la résolution du MNT. La résolution est ici égale à un pixel de l'image soit 15m, la projection (UTM, Zone 30N, WGS 1984)
- 8) L'étape 8 consiste à la sélection des paramètres d'extraction (géocodage, méthode d'extrapolation). Il s'agit ici de définir la taille de zone dans laquelle l'utilisateur souhaite améliorer la performance de l'image, déterminer le niveau de détail du terrain et spécifier où sauvegarder le résultat du MNT. Dans cette partie le géocodage et l'extrapolation par la méthode de triangulation ont été réalisés pendant la phase d'extraction du MNT
- 9) L'étape 9 (Examen du résultat du MNT): il s'agit d'examiner et/ ou d'éditer le résultat du MNT. L'édition consiste à corriger les pixels et les valeurs d'élévation erronées en utilisant des filtres. Dans notre cas l'édition du MNT à consister en l'application du « Smooth » ensuite du « Median Filter ». Ces filtres permettront de trouver les pixels pour lesquels la corrélation n'est pas bonne. Le premier filtre permet d'améliorer les valeurs basses sur un contour basé sur la spécification de la taille du pixel (3*3 pixels) et le second avec une fenêtre de 11*11 pixels permet de remplacer les pixels d'une région sélectionnée par la valeur médiane du voisin. Le MNT ainsi généré a été enregistré dans un format d'échange pour être lu dans ArcMap 9.2 où se fera l'extraction des paramètres hydrologiques.

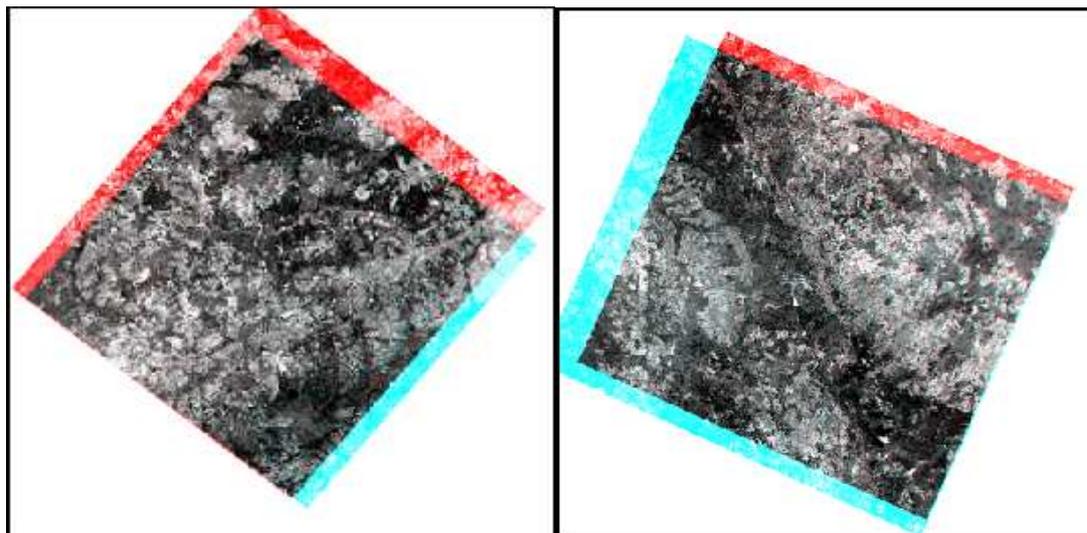


Figure 14: Image épipolaire des deux images Aster

3.4 Résultats

La figure 15 montre le modèle Numérique de Terrain extrait de l'image Aster de décembre 2001, visualisé en nuance de gris. Les altitudes variant de 174 à 855 m concernent toute la zone couverte par les images satellitaires.

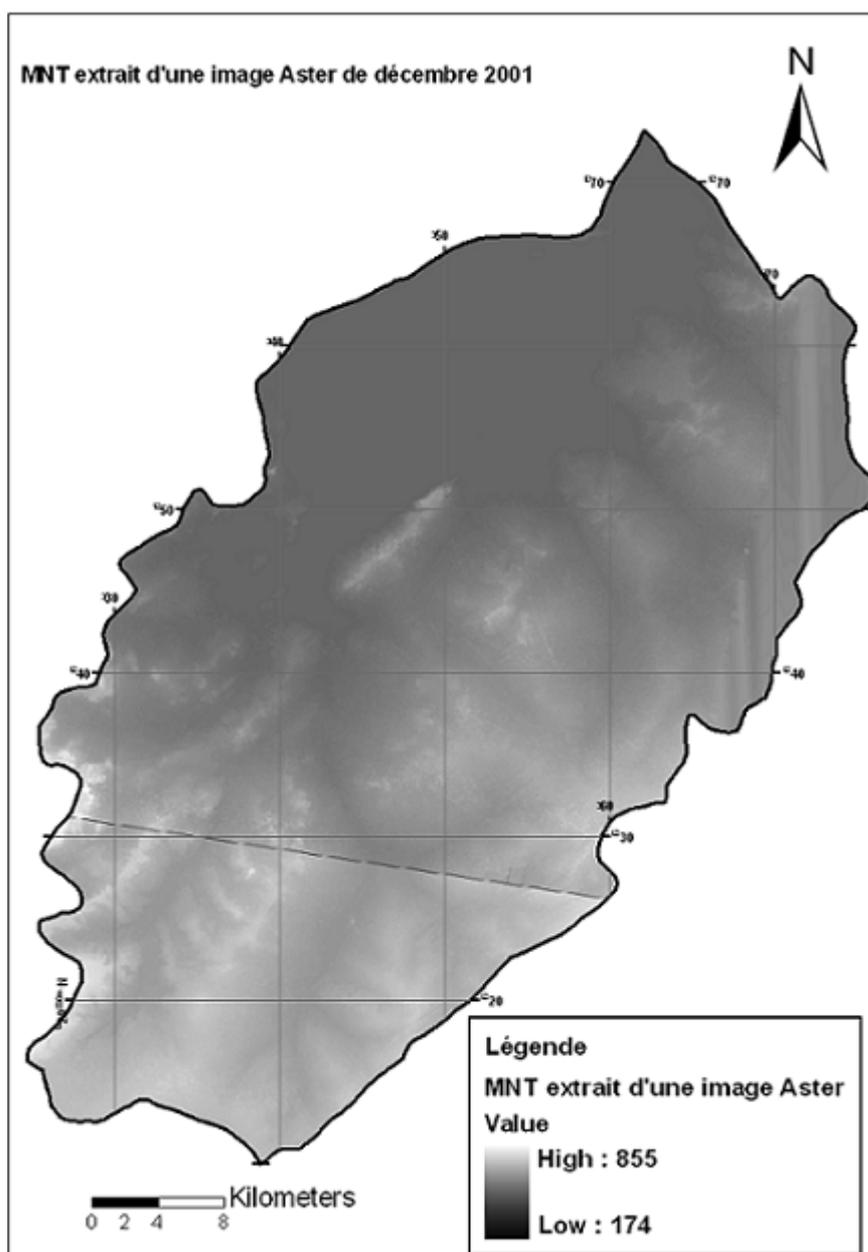


Figure 15: Modèle Numérique de Terrain en nuance de gris

Elle montre que les altitudes les plus élevées en blanc sont notées sur les localités de Peni, Kodara, Matourkou. Pour mieux décrire les variations de la topographie, les altitudes ont été subdivisées en différentes classes et visualisées en fausses couleurs (Figure 16)

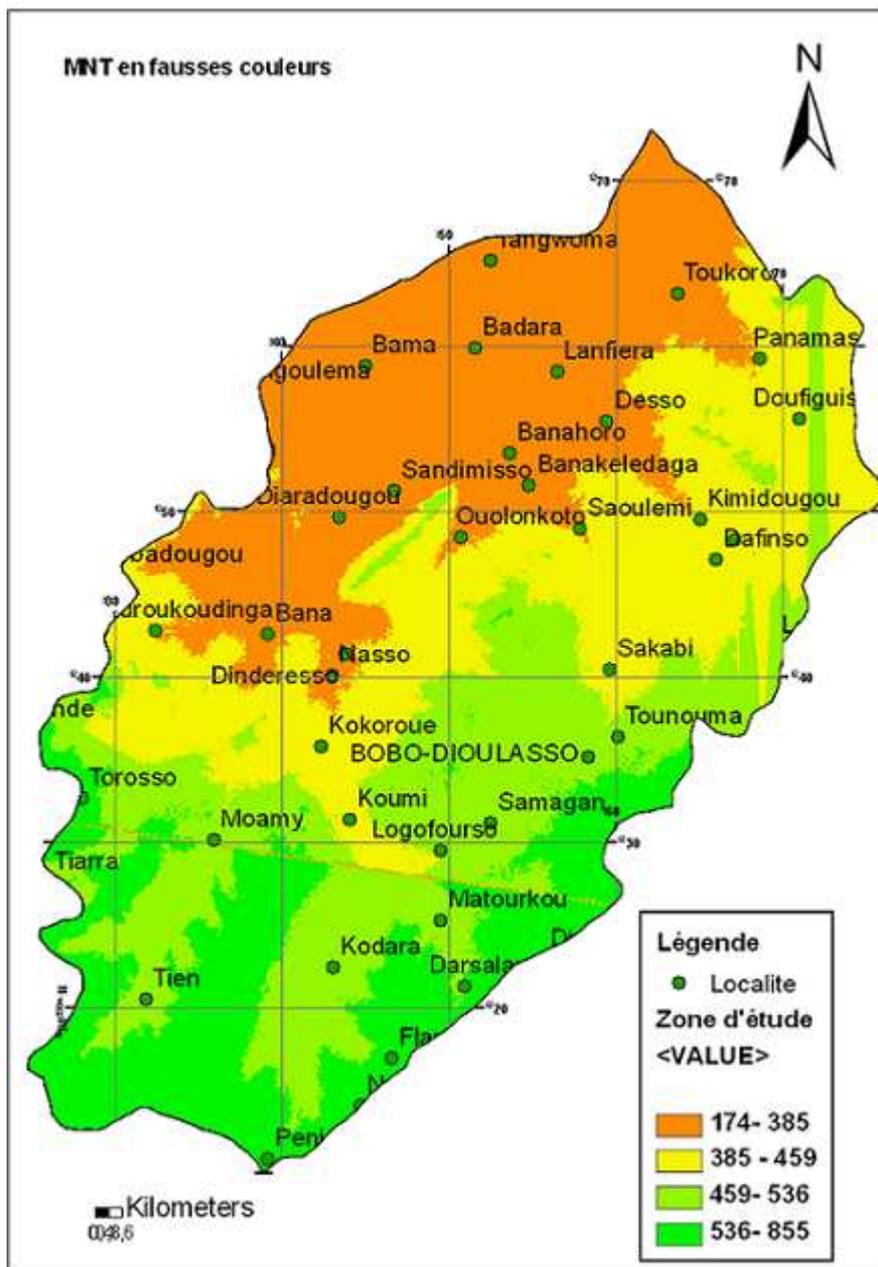


Figure 16: Modèle Numérique de Terrain en fausses couleur

La figure 16 montre que les altitudes comprise entre 174 m et 385 m sont situées dans les localités de Sangoulema, Nasso, Dinderesso. Dans les localités de Kokoroué, Dafinso, Sakabi, Koumi, les altitudes sont comprises entre 385 m et 459 m.

Dans les localités de Kodara, Tien, Moamy, les altitudes sont comprises entre 459 m et 536 m. A Dingasso, Peni, les altitudes sont les plus élevées comprises entre 536 m et 855 m.

L'une des possibilités de vérification de notre MNT est de le superposer notre MNT avec le réseau hydrographique actuel (figure 17). Il s'agit de voir si, par exemple, les rivières qui sont bien visibles sur le MNT ne correspondent pas à des zones d'altitudes élevées. Cela serait une aberration et enlèverait toute correction au MNT. Dans notre cas on voit que les rivières sont bien représentées par des dépressions.

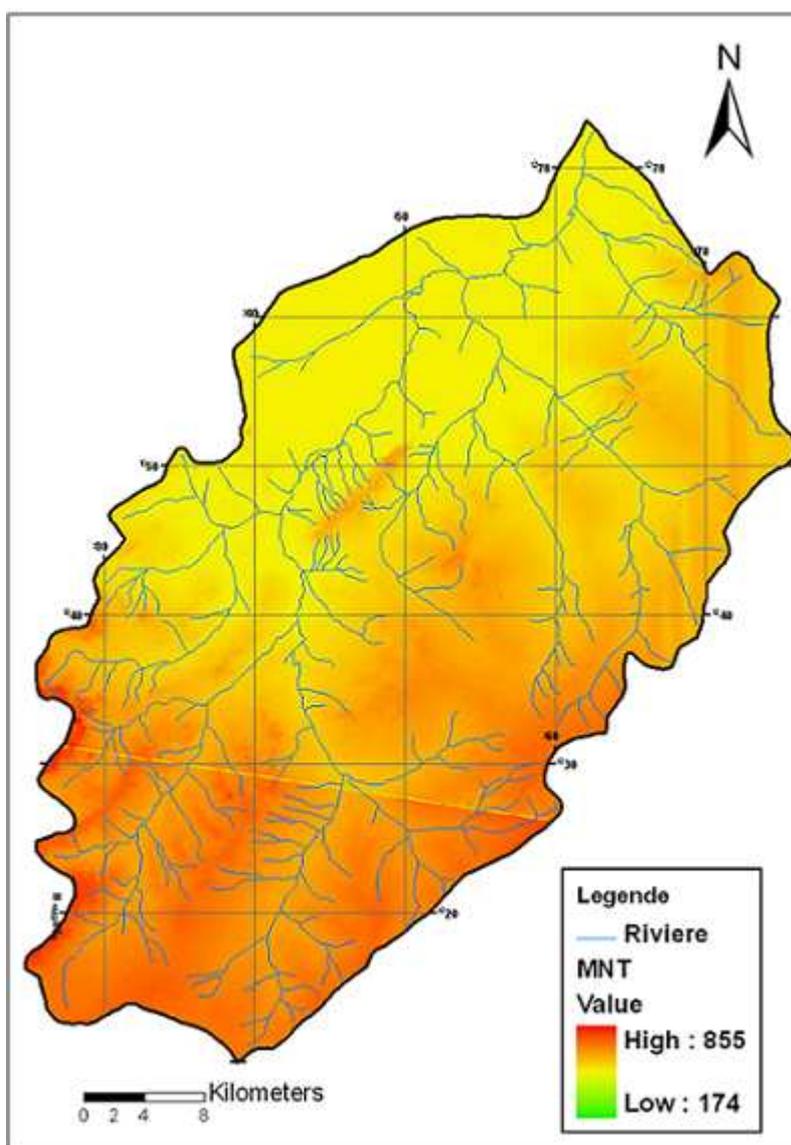


Figure 17: MNT superposé sur le réseau hydrographique existant

4. Discussion des résultats

4.1 Comparaison du MNT avec les cartes topographiques : apports des outils d'analyses géostatistiques

Pour vérifier la validité du MNT, nous avons utilisé les outils de mathématiques et de statistiques spatiales. Pour ce faire une première comparaison est faite à partir des points de validations. Il s'agit de représenter graphiquement les altitudes des trois MNT (SRTM, Sud-Ouest et MNT élaboré) et procéder à une analyse deux à deux des modèles.

Puis une deuxième comparaison a été faite, basée sur des résultats issus du MNT réalisé avec l'image Aster et des altitudes de l'IGB, des forages levées au DGPS et de la plaine alluviale en vue de tester l'exactitude de notre modèle. Ces altitudes sont constituées en fichier Shape file appelé données topographiques et est considéré comme base d'interpolation pour le MNT Final.

Pour cela l'outil « Spatial Analyst 3D » d'ArcGIS 9.2 va nous permettre de calculer les altitudes des différents modèles dont la procédure de calcul est décrite plus haut (au point 3.1). Les altitudes ainsi générées sont enregistrées sous format texte pour être lu dans Matlab et Excel, qui nous a servi à l'analyse mathématique et statistique. Celle-ci comprend : une analyse exploratoire non spatiale et une analyse exploratoire spatiale

4.1.1 Analyse exploration spatiale

4.1.1.1 Analyse exploration spatiale des modèles existants et le MNT

Les comparaisons des distributions spatiales des valeurs du MNT avec les modèles SRTM et MNT Sud-Ouest et celles du MNT Sud-Ouest avec le SRTM se sont faites à partir d'un Hscatter plot et sont représentées à partir à la figure 19, 20 et 21.

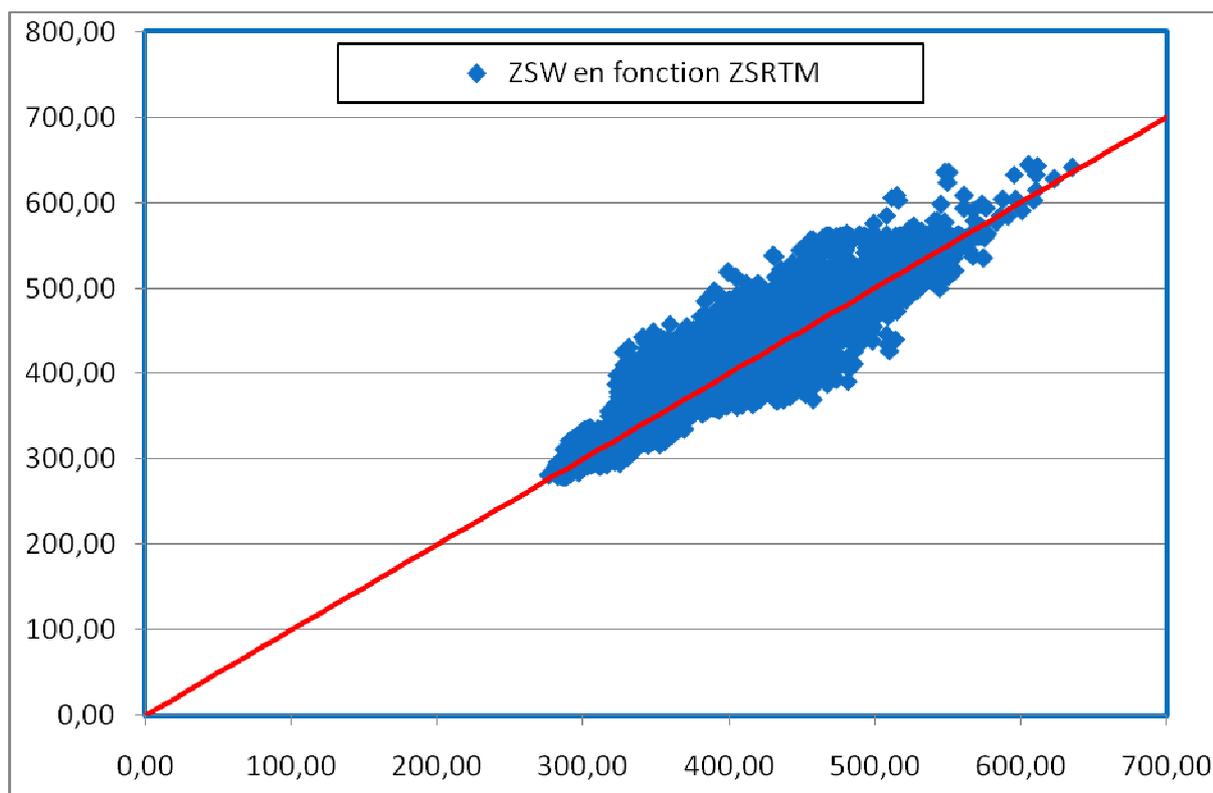


Figure 18: Altitude du MNT Sud-Ouest en fonction du SRTM

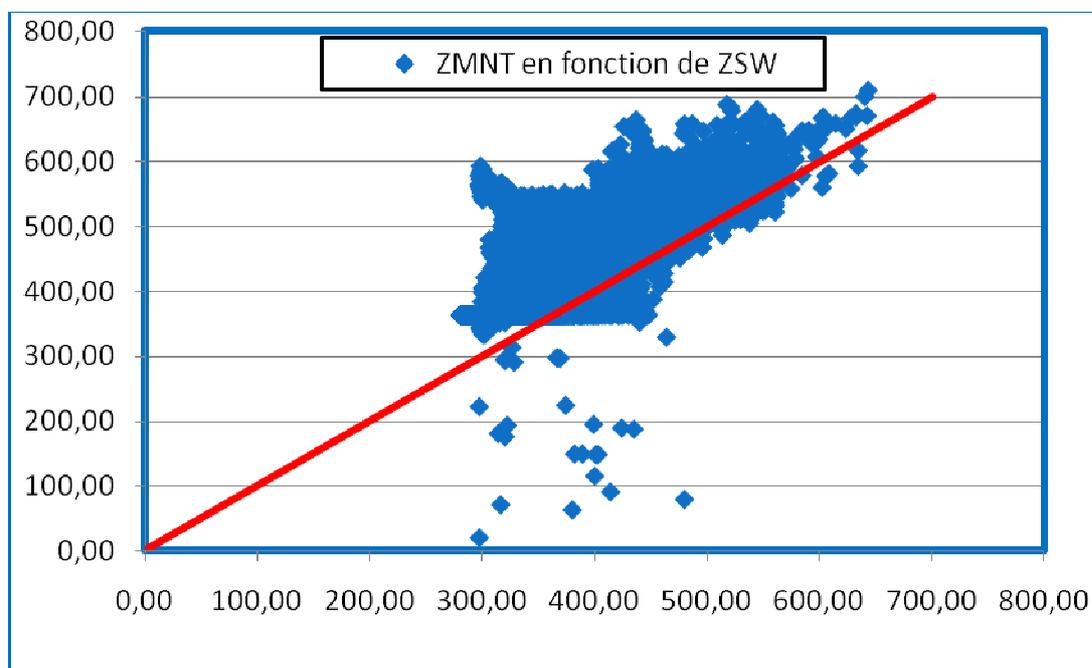


Figure 19: Altitude du MNT en fonction du SRTM

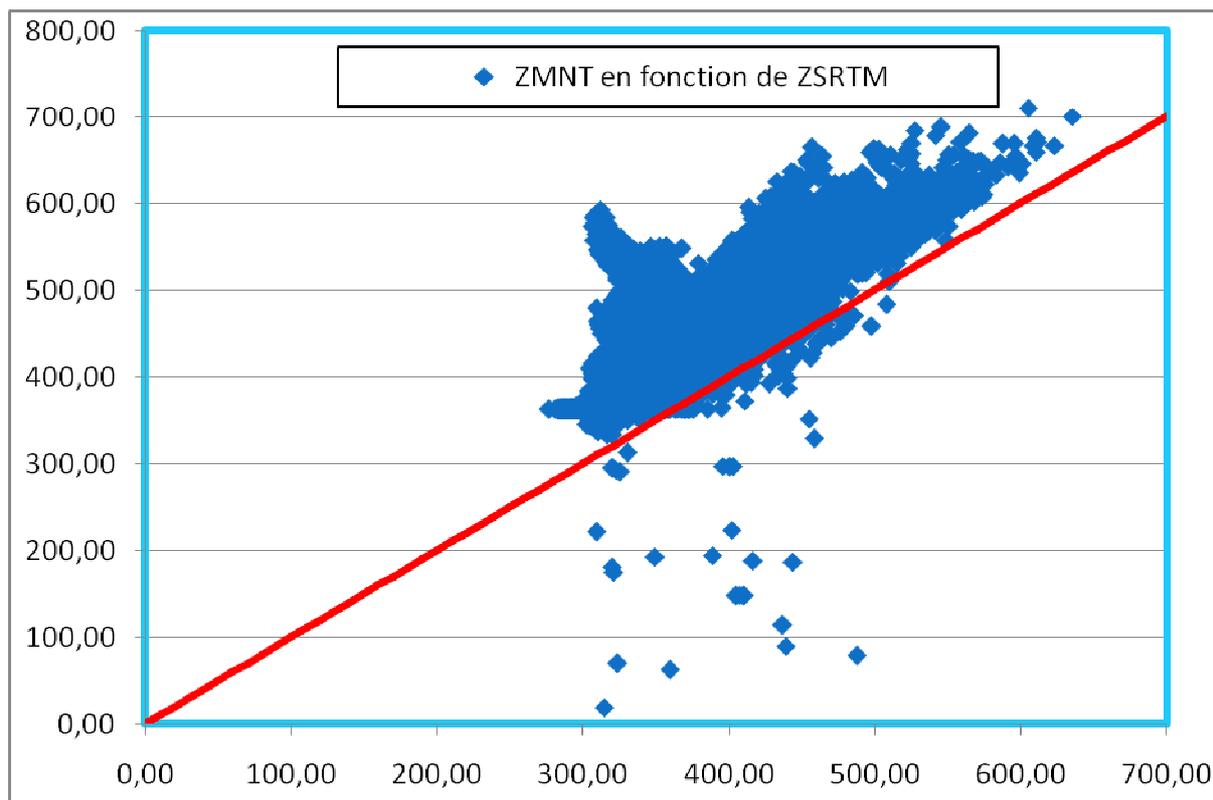


Figure 20: Altitude du MNT en fonction du SRTM

Le Hscatter plot représente ici l'ensemble des valeurs MNT en fonction du MNT Sud-Ouest et du SRTM d'une part et du MNT Sud-Ouest en fonction du SRTM d'autre part par rapport à la bissectrice. Une telle représentation permet d'identifier des concepts comme le biais ou offset et le gain relatifs à une mesure suivant la distribution du nuage par rapport à la bissectrice. On parlera de biais (qui entraîne une inexactitude de la mesure) lorsque le nuage de point s'aligne sur une droite mais décalée (vers le haut ou vers le bas) de la bissectrice. Le gain correspond au fait que le nuage de points s'aligne sur une droite qui forme un certain angle avec la bissectrice. Dans notre cas pour le MNT Sud-Ouest le nuage de points est plus ou moins bien aligné le long de la bissectrice tandis qu'il ne l'est pas pour le MNT. Ce qui veut dire qu'il n'y a ni biais ni gain pour le MNT Sud-Ouest et un biais systématique et un gain pour le MNT. Le MNT tend à surestimer les altitudes. Tout porte à croire que les modèles sont différents et que les modèles SRTM et Sud-Ouest tendent vers la réalité. Mais ne perdons pas de vue que les images utilisées pour générer le MNT ont une résolution de 15 m et le modèle SRTM a une résolution 90 m et le MNT Sud-Ouest a une résolution de 250 m. Il faut dire que l'avantage et l'inconvénient des modèles SRTM et Sud-Ouest est que le SRTM utilise des images de basses résolution (90 m) et cela suppose que l'erreur minimum commise par le capteur pour détecter le plus petit élément à la surface de la terre correspond à un pixel de 90 m. Son avantage est qu'il est libre d'utilisation et son acquisition ne requiert pas de difficultés car il est disponible gratuitement sur internet. Il est utilisé pour

des études qui ne nécessitent pas des MNT de grande précision. Tandis que le MNT Sud-Ouest a été généré à partir de la fonction « Topo to raster » d'ArcGIS et en utilisant comme donnée de base, les données de l'IGB d'une précision appréciable (photo aérienne d'une résolution de 4 à 5 m, DGPS utilisé pour les données de calage,) avec pour contrainte le réseau de drainage existant qui oblige le modèle à être plus précis. Mais l'inconvénient est que le code de calcul utilisé par ArcGIS est un code mathématique qui ne tient pas compte des réalités hydrogéologiques. Aussi le réseau de drainage actuel qui date de 1957 a des imprécisions par rapport à la réalité du terrain.

Sans vouloir trop porté un jugement précoce sur la précision et l'exactitude de notre modèle une deuxième analyse est faite avec des données levées au Théodolite sur la plaine alluviale.

4.1.1.2 Analyse exploratoire spatiale du MNT et la plaine alluviale

La comparaison de la distribution spatiale des valeurs du MNT et de plaine alluviale s'est faite à partir d'un QQplot et d'un Hscatter plot et sont représentés ci-dessous.

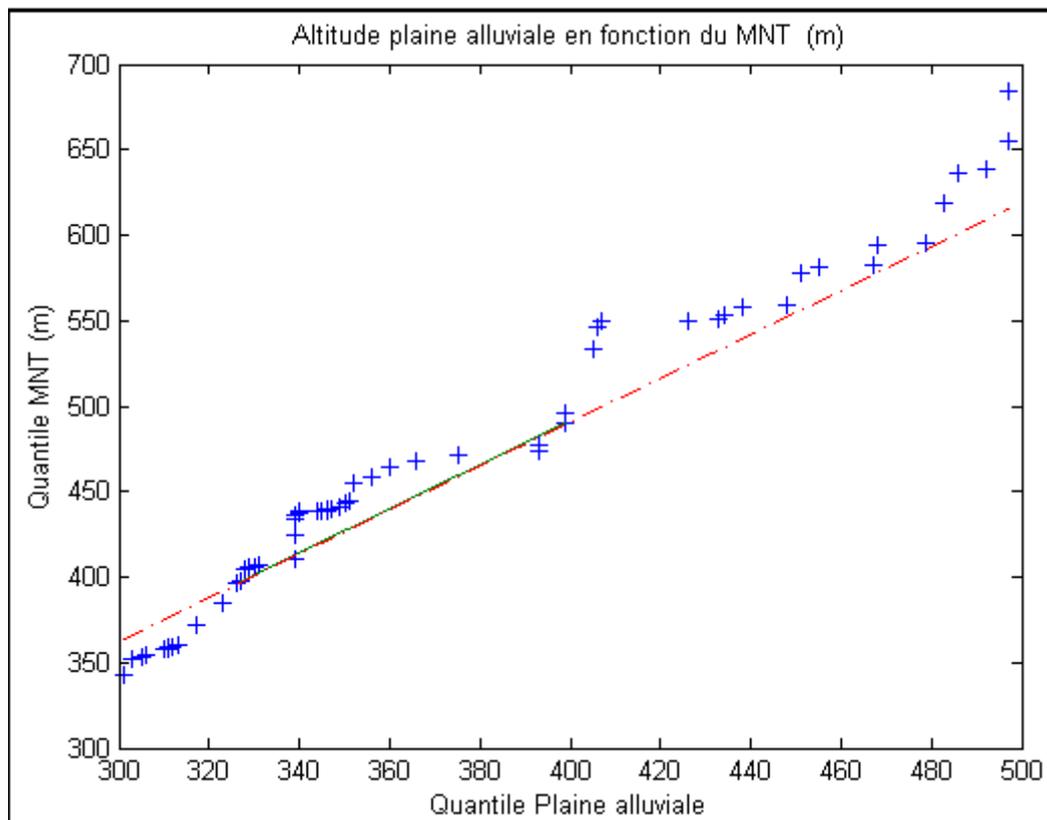


Figure 21: QQplot du MNT en fonction de la plaine alluviale

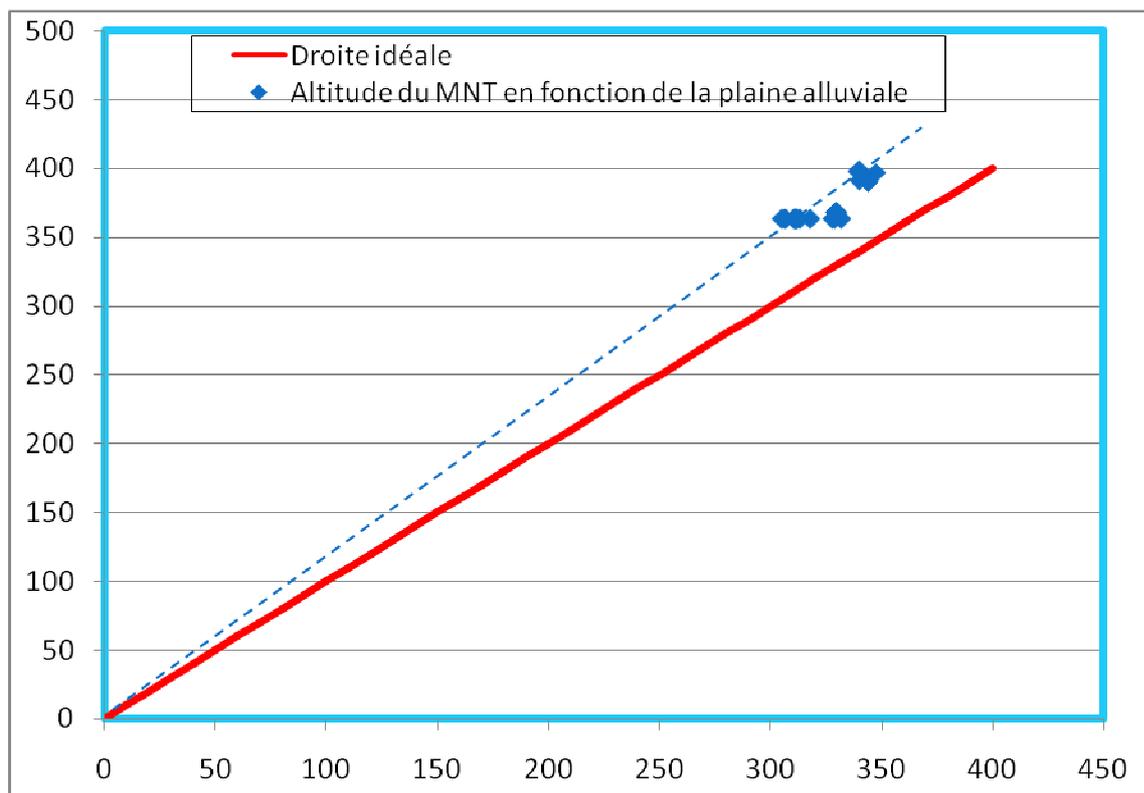


Figure 22: Altitude du MNT en fonction de la plaine alluviale

L'analyse de notre modèle suppose l'acquisition de forts points afin de permettre une bonne analyse dans l'optique de montrer la pertinence de notre modèle. Ce qui n'a pas été le cas. Pour ce faire des données levées au théodolite sur la plaine alluviale ont été utilisées pour faire l'analyse.

Le QQplot (Quantile- Quantile- Plot) représente les quantiles du MNT en fonction de ceux de la plaine alluviale par rapport à une droite de référence de 45° qui diffère de la bissectrice, il nous renseigne sur le type de distribution. Si la distribution est normale les points seront alignés sur la droite (source, Help Matlab 7.1). Le QQplot montre que les valeurs sont moins alignées suivant la droite. Ce qui montre une moins grande corrélation des valeurs et une distribution anormale.

Le Hscatter montre que le nuage de points ne s'aligne pas sur la bissectrice (droite idéale). Ce qui montre qu'il y a un biais systématique. Une faible dispersion vers les valeurs les plus élevées est de l'ordre de 300 m et 350 m où les altitudes de la plaine alluviale sont relativement les plus élevées et entre 360 m et 400 m où ce sont les valeurs du MNT qui sont relativement les plus élevées on peut dire ces dernières ne sont pas exactes. Une mesure est dite exacte si elle fournit en moyenne une valeur identique à la valeur moyenne et ce, même si les résultats apparaissent fort bien dispersés (Pirard, 2006). Ce qui n'est donc pas le cas

pour notre modèle. Mais notre modèle s'avère précis car les images que nous utilisons ont une résolution de 15 m et aussi une mesure est dite précise si elle exprime la faible dispersion de l'erreur par rapport à une tendance centrale (Pirard, 2006).

4.1.1.3 Analyse exploration non spatiale

L'analyse qui est faite ici consiste à montrer l'exactitude de notre MNT à partir des variables statistiques (Tableau 3 & 4).

Tableau 4: Paramètres statistiques des élévations du MNT, de la plaine alluviale et de l'erreur

	Min	Max	Mean	Geomean	Mode	Médiane	Variance (s ²)	Ecart type (s)	P25	P75
ZMNT	363,00	398,19	371,52	371,30	363,00	365,50	166,09	12,89	363,00	368,00
ZPA	305,22	347,52	324,40	324,16	329,38	329,30	160,67	12,68	311,47	330,49
ZMNT-ZPA	31,07	58,48	47,12	46,39	38,62	47,47	65,20	8,07	38,62	52,29

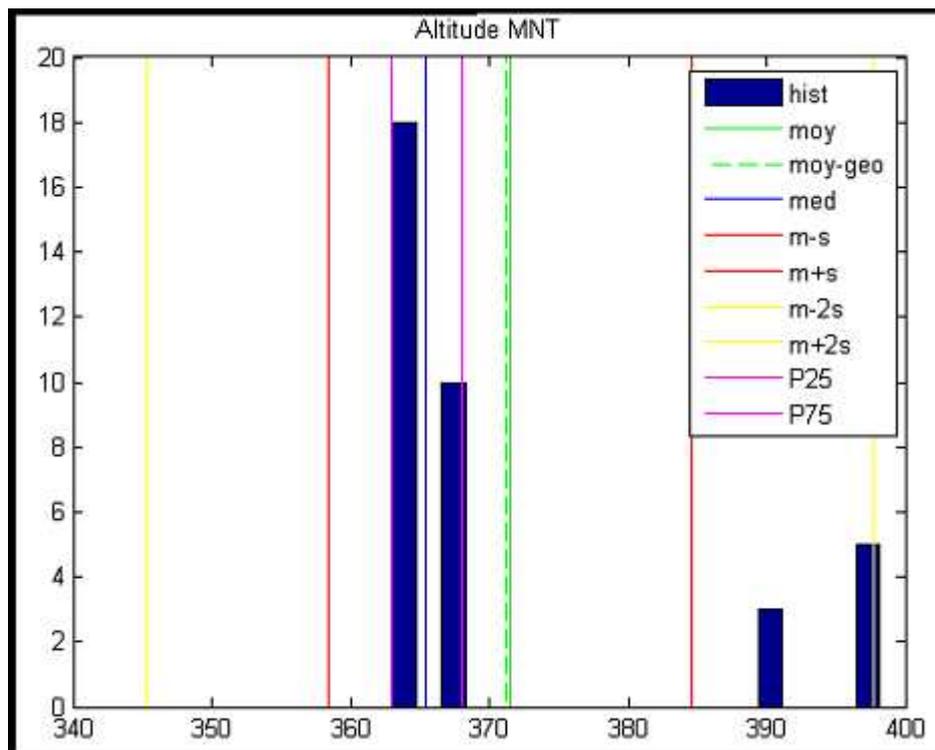


Figure 234: Histogramme du MNT avec les paramètres statistiques

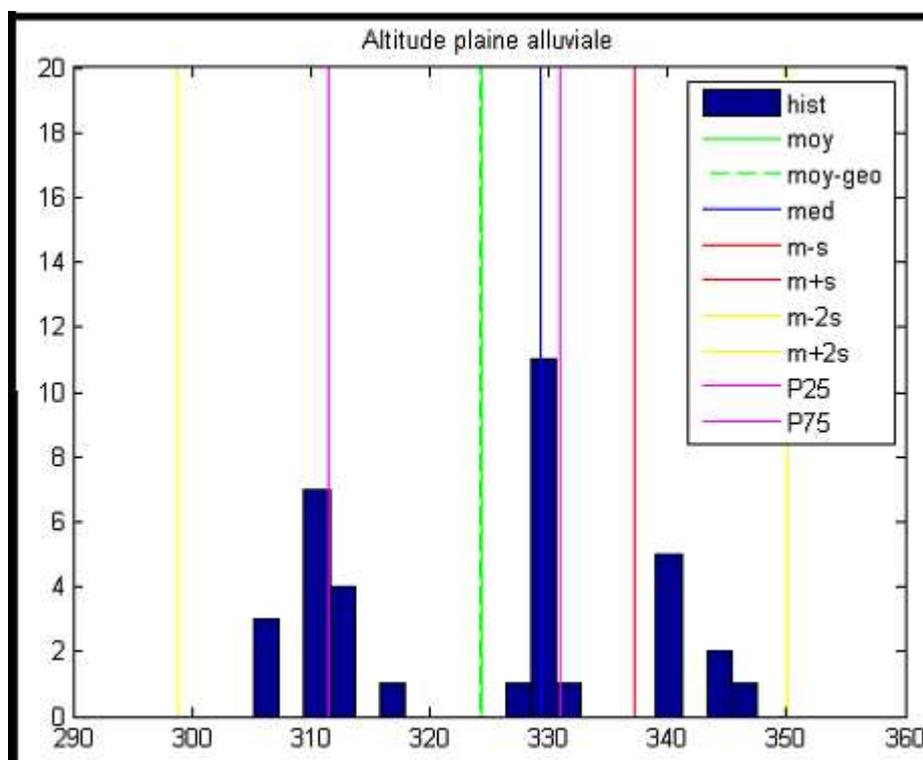


Figure 24: Histogramme de la plaine alluviale avec les paramètres statistiques

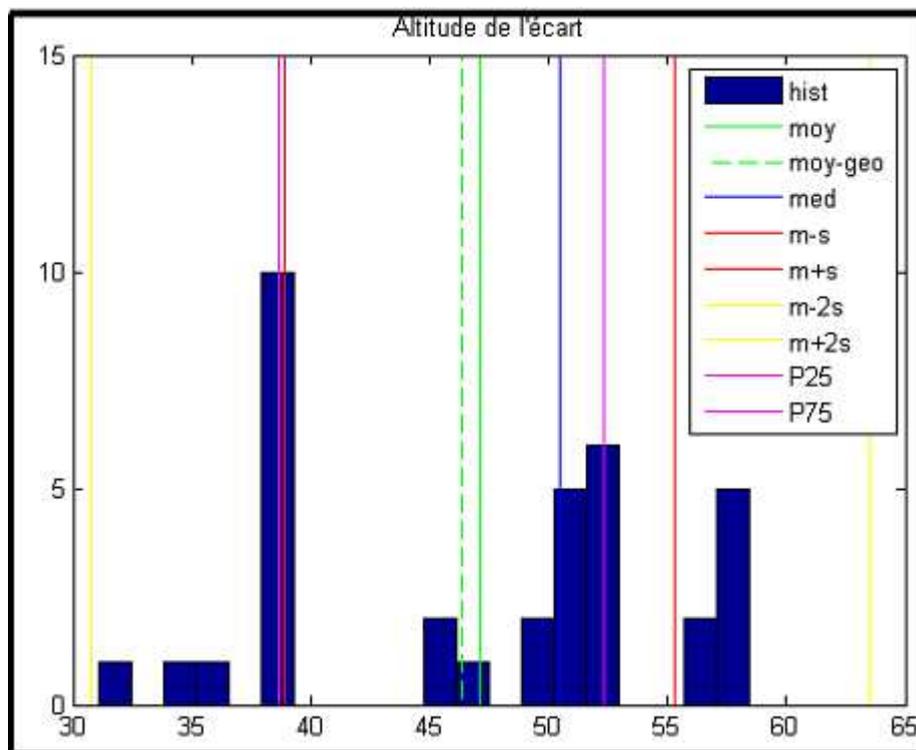


Figure 25: Histogramme de l'écart avec les paramètres statistiques

Les histogrammes des altitudes du MNT et de la plaine alluviale (figure 17 et 18) présentent une asymétrie positive c'est-à-dire que la queue de la distribution tend vers les valeurs les plus élevées. Le mode est égale 363 m pour le MNT et à 329,38 pour la plaine alluviale

Les paramètres statistiques montrent que les altitudes du MNT et de la plaine alluviale sont respectivement comprises entre 305,22 m et 347,52 m et entre 363 m et 398,38 m, leurs moyennes arithmétiques sont différentes comprise entre 371,30 m pour le MNT et 324,16 m tandis que leurs médianes sont différentes. Ce qui permet de dire que l'altitude moyenne pour le bassin du Kou est de 371,30 pour le MNT et de 324,16 pour la plaine alluviale et que 50% des altitudes du MNT ont une valeur égale à 365,50 m et 329,30 pour la plaine alluviale. La variance et l'écart type sont les mêmes pour le MNT que pour la plaine alluviale tandis que l'interquartile (P75-P25) sont les plus élevées pour le MNT que pour la plaine alluviale. Ce qui permet de dire que 75% des altitudes du MNT sont inférieures à 368 m et 25% sont inférieurs 330,49 m tandis que pour la plaine alluviale 75% altitudes sont inférieurs à 330,49 m et 25% sont inférieurs à 311,47 m. Les interquartiles montrent que la distribution des valeurs du MNT a une plus grande dispersion que celle de la plaine alluviale et que cette dispersion due à une plus grande discontinuité des valeurs du MNT contrairement à celui de la plaine alluviale qui sont lissées.

Les valeurs de l'erreur sont comprises entre 31,04 m et 58,48 m avec une moyenne de 47,12 m, un écart type égal à 8,07 m et une médiane de 50,47 m. Cela nous permet de dire qu'il y'a un biais systématique des valeurs du MNT.

Pour une distribution symétrique la moyenne arithmétique est égale à la médiane (Cf Tableau 4). Dans notre cas si on suppose que les valeurs de l'erreur présentent une distribution symétrique alors le calcul des valeurs $[m-s, m+s]$ et $[m-2s, m+2s]$ permet de quantifier l'erreur sur le MNT (Tableau 5) et montre que l'exactitude du MNT est de 16,49 m.

Tableau 5: Exactitude du MNT

	m-s	m+s	m-2s	m+2S
	358,93	385,11	345,84	398,20
	312,50	337,80	299,85	350,46
	38,63	55,11	30,38	63,36
Exactitude	16,49			

Conclusion : La comparaison des altitudes du MNT et celle de la plaine alluviale montre une corrélation moins importante (Cf QQplot). Mais le nombre de points utilisés pour les analyses étant faible. Il nous est difficile de tirer des conclusions quand à l'exactitude (16,49 m) de notre MNT. Mais il reste assez précis pour nous permettre de réaliser les applications hydrologiques. Cette précision est lié à la résolution de nos images et liée aussi au fait que le réseau hydrographique existant superposé à notre MNT correspond aux zones de basses altitudes.

5. Discussion générale

5.1 A propos de l'imagerie satellitale

Une question se pose alors quant à l'utilisation des données issues de la télédétection : faut il avoir recours à la télédétection à haute ou à basse résolution ?

Les images Aster utilisées ont une résolution de 15 m cela suppose que l'erreur commise par le capteur sur le plus petit élément détectable à la surface est de 15 m. De plus le type de relief étant relativement élevé, les ouvrages moins espacés dans la zone, des images de haute résolution pourraient donner de l'information détaillée sur les altitudes de la zone.

La diversité des rivières étant importante dans la zone d'étude, le réseau hydrographique ne peut être restitué, en termes de télédétection que par l'imagerie à haute résolution.

D'un côté, les images haute résolution, pour ce genre de suivi régulier, auront tendance à donner plus de détails qu'il n'en faut, et restent inaccessibles à beaucoup de scientifiques du fait de leur coût d'acquisition assez élevé et de leur résolution temporelle.

Pour l'extraction d'un MNT de très grande précision, il est préférable de se tourner vers les images Quikbird qui ont une résolution de 60 cm dans l'invisible et 2 m dans le visible.

5.2 A propos des données d'entrées, la méthode d'interpolation et du logiciel utilisé.

L'objectif de cette étude est la réalisation d'un MNT. Cela consistait à utiliser des données d'entrées qui soient connues avec précision et à extraire un modèle qui utilise une méthode d'interpolation qui minimise les écarts, avec un logiciel qui extrait le MNT sans aberration.

Très vite s'est posé le problème de données dans la mesure où les données connues avec précision ne couvraient pas l'ensemble de notre zone d'étude et de plus, le nombre de points était moindre par rapport à la taille de nos images. Ce manque d'information dans certaines zones a pu conduire à des valeurs très aberrantes sur le MNT.

Certes il existe des données capables de renseigner le MNT mais ces données ne sont pas d'une bonne précision car elles sous-estiment par endroit des altitudes qui étaient supposées être fortes dans cette zone. Donc des données de calibration précise sont nécessaires pour rendre le modèle plus exact.

Quant à la méthode d'interpolation, il faut dire que le logiciel ne nous donnait pas le choix de choisir l'interpolation que nous souhaitions afin de minimiser les erreurs sur le MNT. La triangulation a des inconvénients comme des avantages. L'un de ses avantages est qu'elle ne demande pas assez de points pour faire des calculs, juste au minimum trois points. Mais l'inconvénient est que la triangulation ne permet pas de minimiser les écarts des erreurs pour des points très distants les uns des autres. Alors que d'autres logiciels comme PCI Geomatica, ERDAS ont plusieurs méthodes d'interpolations : la triangulation, l'inverse de la distance au carré, le spline... et peuvent permettre de minimiser les valeurs aberrantes à travers le choix de la méthode d'interpolation.

Le logiciel ENVI 4.3 est un logiciel très puissant dans le traitement des images satellitaires mais ne donne pas un MNT de grande précision due à la restriction de ses fonctions. Par exemple ENVI 4.3 ne permet pas de choisir des points de contrôles (GCPs) à partir d'autres images satellitaires mais PCI Géomatica le permet. Aussi les filtres qu'utilisent ENVI sont limités. Il ne permet pas de faire par exemple de faire le « Erode Holes filter », qui permet

de trouver les pixels pour lesquels la corrélation n'est pas bonne. Dans l'optique de disposer d'un MNT plus exact il serait intéressant d'utiliser le logiciel PCI Geomatica.

5.3 A propos de notre approche méthodologique et nos résultats.

Le but originel de cette étude était la réalisation d'un Modèle Numérique de Terrain pour le bassin du Kou. Cela consistait en l'étude des différentes étapes de la réalisation du MNT

Très vite s'est posé le problème dans la génération *des tie points* et l'entrée des points de contrôles dans le logiciel. En effet ces étapes apparues comme étant les plus complexes dans l'extraction du MNT, dans la mesure où une correction manuelle devrait être faite pour minimiser l'effet de parallaxe et l'entrée aussi manuelle des points de contrôles parce que nos images ne disposaient pas des coefficients polynomiaux rationnels (RPC) pour permettre une entrée automatique des données dans le logiciel.

La pertinence du modèle est en partie conditionnée par le maximum parallax qu'il convient de réduire au maximum voire à zéro si possible, et les GCPs qu'il convient de lever correctement au risque de surestimer directement les altitudes de notre bassin.

Plutôt que de faire une seule extraction dans laquelle nous aurions peut être eu des valeurs aberrantes, nous avons choisi d'extraire plusieurs modèles dans la recherche de modèles pertinents nous permettant d'estimer au mieux les altitudes dans notre bassin versant.

Le constat général qui est fait est qu'aucun des modèles extraits, ne semble prépondérant par rapport à un autre. Tout au plus certains modèles ont été meilleurs que d'autres, ou pour être consensuel, un modèle a donné des résultats qui, pour nous sont dans les proportions acceptables. Ceci en ayant une vue globale des références d'altitudes dans notre bassin versant.

Conclusion

Au terme de cette étude sur le Modèle Numérique de Terrain pour le bassin du Kou, nous ferons quelques constats qui sont les suivants :

de part sa complexité, l'extraction du Modèle Numérique de Terrain pour le bassin du Kou a nécessité plusieurs essais d'extraction.

Cette diversification des essais se justifie tout d'abord par la volonté de caractériser au mieux le MNT.

L'emploi de plusieurs essais différents, a ensuite comme autre but, de palier à l'absence de valeurs dans certaines zones de nos images. Pour ce faire, nous avons augmenté au fur et à mesure les *tie points* et en même temps réduit au maximum possible le maximum parallax afin de permettre une bonne corrélation entre les différents points et donner une bonne précision à notre MNT.

Beaucoup de difficultés ont été rencontrées au cours de l'extraction de notre MNT. Les données utilisées ont été recensés à partir de sources différentes. Dans certaines de ces sources, ont été constatées des lacunes. Et quand ces données étaient complètes, il est arrivé parfois qu'elles soient de mauvaise qualité (exemple : les données topographiques)

Nous avons tenté de palier à la faiblesse des données du terrain en ayant recours à d'autres données de l'IGB. Mais les données dont nous avons été en possession sont aussi critiquables à plus d'un titre :

- ✓ les écarts observés entre les premières données et les secondes données de l'IGB n'étant pas uniforme d'un point à un autre.
- ✓ Les données sont de l'ordre du dixième dénominateur de l'échelle (1/200 000) soit une précision de 20 m. alors que nos images sont d'une précision de 15 m.

La liste des défaillances liées, en général, à la qualité des données n'est pas exhaustive, mais au-delà de l'aspect fondamental quant à la qualité des données d'entrées, est qu'elle influence considérablement la qualité des données de sorties du modèle.

Nous estimons n'avoir pu apporter des réponses sur la précision et l'exactitude du MNT pour le bassin versant du Kou, mais nous supposons que la précision et l'exactitude sont conditionnées par la qualité des images Aster, la qualité des données d'entrées et aussi l'outil d'extraction.

Le MNT extrait est sujet à caution, dans la mesure où il repose sur les données d'entrées dont la précision n'est pas exempte d'erreur.

Toutefois sur la base de nos critères de convergence à savoir le réseau hydrographique existant, (qui doit correspondre aux faibles altitudes pour le MNT) et les valeurs de référence dans la zone, nous avons obtenu un MNT assez intéressant.

Bien sûr que ce résultat doit être confirmé (ou infirmé), dans le cadre d'une autre extraction à partir d'un autre Logiciel (exemple : PCI Géomatica).

Enfin, nous voudrions faire quelques recommandations quant à une éventuelle suite à donner à cette étude.

- ✓ Une campagne de levés topographiques de terrain (GCPs) sur l'ensemble du bassin avec un DGPS afin de calibrer par rapport au bassin du Kou les données issues de la télédétection.
- ✓ Une campagne de levés topographiques de terrain (points de validation) sur l'ensemble du bassin avec un DGPS afin de réaliser une bonne validation du MNT.
- ✓ L'utilisation d'un autre logiciel comme PCI Geomatica pour une éventuelle extraction pourrait améliorer l'exactitude du MNT.
- ✓ Une possibilité d'acquisition des images Quikbird pour augmenter la précision du MNT.
- ✓ Pour palier aux artéfacts sur le MNT un post-traitement avec un « 3D Visual semi automatic edition » (développé par le centre canadien de télédétection) permet d'améliorer l'exactitude du MNT final de 10% en lieu et place du post-traitement par interpolation automatique (Hélène, 2007).

Bibliographie

Dakouré, D. (2003). Etudes hydrogéologique et géochimique de la bordure Sud-Est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso-Mali), Essai de Modélisation thèse de Doctorat. Parie VI- Pierre et Marie Curie.

Traoré, F. (2007). Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso. Mémoire de DEA en Sciences de Gestion de l'Environnement, Université de Liège.

Fufjida, H. B. (2005). ASTER DEM PERFORMANCE IEEE Transaction on Geoscience and remote Sensing, vol 43, N° 12, December, 2005, 2701-2714.

D.M. Hélène. (2007). Contribution à l'hydrogéologie du système aquifère de horst de Ndiass dans le bassin sédimentaire sénégalais:apport de technique de télédétection optique et SIG à la caractérisation des états de surface. Mémoire de Diplôme D'étude Approfondies (DEA) en Sciences Appliquées, Université de Liège.

(Idrissa, 2006). Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou (Projet GEau). Mémoire EIER.

Lorenzini, G. (2007). Etude du bassin d'alimentation des sources de Nasso (Bobo- Dioulasso, Burkina Faso), <<Etat des ressources en eaux souterraines du bassin du Kou>>, Mémoire d'ingénieur Civil Géologue. Bobo- Dioulasso.

Akoly, A. M. (2008). Etude environnementale sur l'intensification de l'utilisation de la ressource eau par les utilisateurs agricole du Kou à l'aide de la télédétection. Mémoire de fin d'étude.

Ogou, C. (2008). Etude des Potentialités aquifères de la plaine alluviale du Kou entre Nasso et Diarradougou, Mémoire d'ingénieur de l'équipement rural. Bobo-Dioulasso.

Pirad. (2006). Cours d'Analyses Spatiale des Géo-Environnementales (GES).

Rouskov, K. P. (2005). Some Applications of the Remote sensing in Géology by using of Aster. S E S 2005 scientific conference "Space, Ecology, Safety" with international participation, Varna, Bulgaria.

Sauret, E. S. (2007). Contribution à la compréhension hydrogéologique du Système aquifère dans le bassin du Kou, Mémoire de fin d'Etude de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA). Bobo-Dioulasso.

Simonett, D. The development and principles of Remote Sensing chapter 1 in Manual of Remote Sensing, edited by Colwell Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry.

SOGREAH. (1994). Etudes des ressources en eau de la zone sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso- Modélisation des GKS, GFG, GGQ et SAC, Utilisation des modèles MONA, ESTRA, TRAFIT, SIMUTRA, DRH-HB.

Toutin, T. (2002). Three-Dimensional Topographic Mapping with ASTER stereo data in rugged topography. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol 40, N°10, October, 2002. 2241-2247.

Yamuchi Y., K. T. Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). IEEE Transaction on Géoscience and Remote Sensing, 36, 1062-1071.

Yésou, H. (1993). Analyses d'images satellitaires radar et optiques: optimisation et intégration des données. Apport à la géologie structurale et minière. Thèse es Sciences, Univ. L.P de Strasbourg, France, 199.

Sites internet

1. www.aquadoc.fr/IMG/pdf/08_memoire_inondation_Hers_Favre_partie_03_A_fin.pdf
2. <http://srdis.ciesin.columbia.edu/cases/burkinafaso-003-fr.html>
3. http://www.ipgp.jussieu.fr/~delorme/doc/extraction_MNE.pdf

