



MODELISATION HYDRAULIQUE DE L'AFFLUENT PRINCIPAL DE LA RETENUE DE WEDBILA AU BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES

Présenté et soutenu publiquement le 26/10/2015 par **Mabênin KONE**

Travaux dirigés par :

Dr Lawani Adjadi MOUNIROU
Enseignant, Chercheur au 2iE

M. Francis GUYON
Assistant Technique APEFE au Ministère de l'Agriculture et de la Sécurité Alimentaire

Dr Eric HALLOT
Chercheur au Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale de l'Université de Liège

Dr Dial NIANG
Enseignant, Chercheur au 2iE

M. Kofi Sewa Da SILVEIRA

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr Harouna KARAMBIRI

Membres et correcteurs : M. Ousmane Roland YONABA
M. Arnaud François Xavier QUENUM

Promotion [2013/2014]

CITATION

L'eau prend une importance croissante dans notre vie. Apprendre à la gérer, c'est apprendre à maîtriser sa rareté mais aussi ses excès, à assurer l'alimentation en eau potable, agricole et industrielle, à l'utiliser pour créer de l'énergie et à maintenir la qualité de notre environnement. Cette gestion exige l'élaboration de méthodes adéquates et l'usage d'outils afin de minimiser les risques d'inondation ou d'étiage. L'accès à la ressource en eau est vital tant dans les pays développés que dans les pays en voie de développement et tout indique que son mode de partage constitue un des grands défis du début du troisième millénaire. Les ressources en eau souterraine et de surface ainsi que le potentiel hydraulique d'un pays, bien que renouvelables, sont en effet limités et menacés tant par les activités industrielles, urbaines qu'agricoles.

Source : Thèse de Souad RIAD, Lille 1, 2003

DEDICACE

A ma mère.

A mes mères

*A toutes ces braves femmes battantes
qui lorsque le soleil pointe, reprennent
la quête du bien-être des leurs avec la
conviction de lendemains meilleurs.*

A mon amie, ma sœur Fatou SIDIBE

A Binta Audrey SIDIBE

A VOUS, NOS PARENTS...

REMERCIEMENTS

Toute ma gratitude au *SEIGNEUR TOUT PUISSANT, INFINIMENT DOUX* par qui tout est possible.

A mes parents et toute ma famille pour leurs bénédictions et soutien.

A BAMBA Yacouba... Mon admiration et la joie des yeux de mon âme sont tiens. Merci pour ta présence depuis mon vœu d'entrer à 2ie ; de même que TUO Souleymane par qui je t'ai connu.

A l'Etat ivoirien qui a pris en charge ces trois années de formation, d'expérience et de découverte.

A Monsieur KONE Daouda Soukpafo

A tout le personnel administratif et aux enseignants de 2iE.

A Son Excellence Monsieur Abdou TOURE : Ambassadeur de Côte d'Ivoire près le Burkina Faso et le Niger ; à Madame YAGO du service étudiant et tout le personnel de l'ambassade.

A la WBI, l'APEFE, le MASA pour ce thème de mémoire innovant : ce fût fort intéressant et enrichissant pour nous.

Au Dr Eric HALLOT de l'Université de Liège

A l'Ir Didier de THYSEBAERT du Service Public de Wallonie

Remerciements spéciaux à Monsieur Francis GUYON : pleins succès et satisfaction...

A Monsieur SANKANDE de la DGRE

Au Dr MOUNIROU pour son suivi et sa rigueur au travail : vos remarques ont été très pertinentes.

A Messieurs SYLLA Adama(les deux), au Pr SAKO Aboubacar, mon oncle DOUMBIA Nouho

Au Dr Bruno BARBIER du CIRAD

A toute la famille SAVANE à Ouagadougou et toutes ces charmantes personnes connues à travers eux ...

A Assita, Imam Ismael TIENDREBEOGO, Fatima et toutes mes sœurs du CERFI

A Messieurs KOITA Mahamadou, Dial NIANG, Lawani Adjadi MOUNIROU, Kofi Sewa Da Silveira, Severe FOSSI.

A Monsieur SOME Corentin

A toute la promotion 2013/2014 ; plus particulièrement OUATTARA Konimba Mamadou, LIASU Taju Olatundé et GORE Abibata. De même que tous mes compatriotes de l'AEISI-2iE et les communautés sœurs de 2iE.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la finalisation de ce document.

A ces êtres chers rappelés à Dieu, qui me manquent tant...

RESUME

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du troisième résultat du programme PADI à savoir la protection des retenues d'eau d'irrigation. Ce programme porte sur trois sites pilotes : Wedbila, Mogtedo et Kierma et nous nous sommes intéressés au premier site.

Le barrage de Wedbila, à Koubri, fut construit en 1975 par l'ODE. Cette retenue a deux affluents et c'est au niveau du principal que plusieurs exploitants agricoles se sont installés. Dans la perspective d'aménagements hydro-agricoles dans la vallée, nous avons tenté de mener l'extrapolation de courbe de tarage par modélisation hydraulique.

Très souvent, l'extrapolation de la courbe de tarage se fait « vers le haut ». Dans cette étude qui porte sur l'affluent principal de la retenue de Wedbila, nous sommes intéressés à l'extrapolation « vers le bas » de courbe de tarage, qui est une opération très délicate en rivière naturelle.

Le modèle hydraulique utilisé, HEC-RAS, a fait ses preuves depuis plus d'une décennie. Ce modèle correspond bien à nos conditions locales en ce sens qu'il a pu être calé et validé. Cependant, la qualité et l'étendue de nos données ne nous ont pas permis de confirmer l'extrapolation « vers le bas » voulue ici.

Par ailleurs, l'utilisation d'un MNT du bassin versant de Wedbila ne nous a pas permis d'extraire les profils en travers pour nous permettre à l'avenir de nous passer des levés topographiques sur le terrain. La réalisation de jaugeages supplémentaires, notamment en basses eaux, nous rapprocherait au mieux de notre objectif.

Mots clés :

1. Extrapolation de courbe de tarage
2. HEC-RAS
3. Modélisation de cours d'eau
4. Modélisation hydraulique
5. Wedbila

ABSTRACT

This research was conducted as part of the third result of the PADI program namely the protection of withholding irrigation water. This program focuses on three pilot sites: Wedbila-Mogtedo-Kierma. The following study was carried on the first site.

Wedbila's dam, located in Koubri, has been built in 1975 by the ODE. This catchment has two affluents and it is at the main that several farmers have settled. In the perspective of agricultural settlements in the valley, we attempted to conduct the rating curve extrapolation by hydraulic modeling.

Very often, the extrapolation of the rating curve is done "on the upper" part, for higher discharges. In this study which focuses on the main tributary of the retaining Wedbila, we are interested in extrapolation "on the lower" part of rating curve (for lower discharges), which is a very delicate operation in natural river. The hydraulic model used, HEC-RAS has been proven for over a decade. This model fits well with our local conditions in that it has been stalled and validated. However, the quality and extent of our data did not allow us to confirm extrapolation "on the lower" due here.

Furthermore, the use of a DTM of Wedbila's watershed did not allow us to extract cross sections in order to dispense us with topographic field surveys in the future. Achieving additional gauging, especially in low water, we would bring the best of our goal.

Keywords:

1. HEC-RAS
2. Hydraulic modeling
3. Rating curve's extrapolation
4. River modeling
5. Wedbila

Table des matières

CITATION	i
DEDICACE	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	iv
ABSTRACT	v
Table des matières.....	vi
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures	viii
Liste des abréviations	x
AVANT PROPOS	xii
I. INTRODUCTION GENERALE	1
PROBLEMATIQUE	1
OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	2
Hypothèses.....	2
II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
II.1. La courbe de tarage et son extrapolation	3
II.2. Modélisation hydraulique.....	4
III. MATERIEL ET METHODES.....	10
III.1. Présentation de la retenue de Wedbila.....	10
III.2. Matériel.....	15
III.3. Méthodes.....	15
III.4. Présentation du modèle hydraulique utilisé : HEC-RAS.....	17
III.4.1. Description.....	17
III.4.2. Mode de fonctionnement de HEC-RAS	18
IV. RESULTATS-DISCUSSION	20
IV.1. Critiques des données	20
IV.2. Calage du modèle	22
IV.3. Validation du modèle	29
IV.4. Extrapolation de la courbe de tarage	32
IV.5. Utilisation du REF 3D	37
V. CONCLUSION.....	38
VI. RECOMMANDATIONS/PERSPECTIVES	39
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	40
ANNEXES	42

Liste des tableaux

Tableau 1: Quelques modèles hydrauliques	9
Tableau 2: Coordonnées des stations hydrométriques sur WED 1.....	13
Tableau 3: Coefficients pour le passage du débit décennal à aux débits pour différents temps de retour	16
Tableau 4: Données de jaugeages réalisés à Wed Old.....	22
Tableau 5: Côtes à atteindre	22
Tableau 6: Résultats phase de calage	24
Tableau 7: Sorties des pluviographes.....	28
Tableau 8: Données de jaugeages réalisés à Wed New	29
Tableau 9: Résultats phase validation de HEC-RAS	31
Tableau 10: Résultats gamme de débit.....	33
Tableau 11: Caractéristiques du BV de Wedbila.....	34
Tableau 12: Caractéristiques bv Wed New	34
Tableau 13: Débits suivant les équations de la méthode CIEH.....	35
Tableau 14: Résultat T= 3mois.....	36
Tableau 15: Résultat T= 6mois.....	36

Liste des figures

Figure 1: Vue de la retenue de Wedbila à Koubri par la nationale 5	10
Figure 2: Présentation des retenues de Nagbangré et Wedbila à Koubri	10
Figure 3: Zoom sur la retenue de Wedbila	10
Figure 4: Déversoir rehaussé par des blocs fusibles	11
Figure 5: Utilisation de l'eau de la retenue	11
Figure 6: Un canal secondaire alimentant le périmètre	12
Figure 7: Prise d'eau par motopompe dans le canal primaire	12
Figure 8: Localisation des deux stations hydrométriques de l'affluent principal sur fond du REF 3D	13
Figure 9: Limnimètre au niveau du déversoir	13
Figure 10: Echelle au niveau de la prise du barrage	13
Figure 11: Ancienne station de l'affluent principal	14
Figure 12: Nouvelle station de l'affluent principal	14
Figure 13: Fenêtre principale de HEC-RAS	18
Figure 14: Subdivision utilisée par default dans HEC-RAS pour la définition des coefficients de rugosité	19
Figure 15: Subdivision que nous avons utilisée.	19
Figure 16: Transect réalisé à Wed Old	20
Figure 17: Transect réalisé à Wed New	20
Figure 18: Transect plus élargi à Wed New	21
Figure 19: Représentation de quelques transects réalisés à Wed New sur Google Earth	21
Figure 20: Courbe de tarage observée à Wed Old	22
Figure 21: Géométrie Wed Old	23
Figure 22: Géométrie Wed Old avec interpolation de 1m des transects	23
Figure 23: Vue de l'emplacement de l'ancienne station	25
Figure 24: Vue de l'aval de l'ancienne station	25
Figure 25: Vue de la section à l'ancienne station	25
Figure 26: Exemple de cas où $n=0.1$	26
Figure 27: Pluviographes sur WED 1	27
Figure 28: Jaugeages effectués à Wed New	29
Figure 29: Géométrie Nouvelle station Wed New	30

Figure 30: Géométrie Wed New avec interpolation 1m entre transects	30
Figure 31: Courbe de tarage simulé à Wed Old avec et sans le point zéro	31
Figure 32: Simulation zone inondée d'Août 2012	31
Figure 33: Courbe de tarage simulé avec et sans le point zéro à Wed New	32
Figure 34: Simulation zone inondée Wed New	32
Figure 35: Bassin versant de Wedbila.....	33
Figure 36: Bassin versant réduit à Wed New	34

Liste des abréviations

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

CIEH : Comité Inter-Etats d'Etudes Hydrauliques

CEMAGREF: Centre d'Etudes du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

CETMEF : Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales

DCENN: Direction des Cours d'Eau Non Navigables

DEIE: Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau

DGAADI: Direction Générale des Aménagements Agricoles et du Développement de l'Irrigation

DRASA: Direction Régionale de l'Agriculture et de la Sécurité Alimentaire

EBTE: Entreprise Burkinabè des Travaux et d'Equipements

EDF: Electricité De France

ENSEEIHT: Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications

FEME: Fédération Mondiale des Eglises Evangéliques

FHWA: Federal Highway Administration

GPS: Global Positioning System

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center-River Analysis System

IFEC: Ingénierie-Formation-Expertise-Conseils

INRIA: Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique

Irstea: Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

LNHE: Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement

MARHASA: Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques, de l'Assainissement et de la Sécurité Alimentaire

MASA : Ministère de l'Agriculture et de la Sécurité Alimentaire

ODE: Office de Développement des Eglises Évangéliques

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

OPHYCA: Outil de Post-Traitement Hydraulique CARTographique

PADI : Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation

RMSE : Root Mean Squared Error

SCHAPI : Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Crues

SIC : Simulation des Canaux d'irrigation

SIG : Système d'Information Géographique

SOGREAH : Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques

SPC: Services de Prévision des Crues

SPOT: Satellite Pour l'Observation de la Terre

ULg: Université de Liège

USACE: United States Army Corps of Engineers

WBI: Wallonie-Bruxelles International

AVANT PROPOS

Cette recherche entre dans le cadre du programme de la Direction Générale des Aménagements et du Développement de l'Irrigation (DGADI) intitulé PADI« Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation», qui a été reconduit pour 2014-2016. Ce programme comporte quatre résultats dont l'un vise à mettre à la disposition de la DGADI, de l'Agence de l'Eau du Nakambé et des DRASA (Centre, Centre-Sud et Plateau-Central) des outils opérationnels de protection des retenues d'eau d'irrigation. Il vise principalement le développement d'outils d'aide à la décision pour la limitation de la sédimentation des retenues d'eau à travers l'aménagement des terres et des berges des cours d'eau à l'échelle des bassins versants alimentant les retenues. Ces outils seront mis à profit à travers l'élaboration de plans d'aménagement pour trois sites pilotes (Mogtedo, Wedbila et Kierma).

A travers ce programme, le Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques, de l'Assainissement et de la Sécurité Alimentaire(MARHASA) (ex MASA), en étroite collaboration avec l'APEFE et la WBI, œuvre au développement d'outils opérationnels et techniques contribuant au développement de l'irrigation. Il s'agit notamment de la construction de petits barrages et d'aménagements hydro-agricoles (afin d'étendre les superficies irriguées), du développement des cultures à haut rendements et du renforcement des capacités des cadres chargés des programmes d'irrigation (JSTI s.d.) .

L'APEFE, centre d'expertise belge en coopération internationale, contribue depuis 1976 au renforcement des capacités de ses partenaires du Sud par l'accompagnement technique et la mise en place des dispositifs de formation (APEFE s.d.). Elle intervient dans plusieurs pays notamment en Algérie, Asie du Sud-Est (Cambodge, Laos, Vietnam), Bolivie, Bénin, Burkina Faso, Burundi, Haïti, Maroc, Mauritanie, Palestine, République Démocratique du Congo, Rwanda et le Sénégal. Au Burkina Faso, le programme de l'APEFE a pour objectif de contribuer à la mise en œuvre efficace de la Stratégie Nationale de Développement Durable de l'Agriculture Irriguée par le développement des outils opérationnels et par le renforcement des compétences.

La WBI, quant à elle, participe aussi en tant que partenaire du PADI à travers la DCENN (du Service Public de Wallonie) et l'Université de Liège (via le Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale). Elle place la recherche et l'innovation au cœur de ses priorités et entend jouer le rôle de relais entre les différents partenaires en soutenant des projets d'envergure internationale (Recherche scientifique et innovation s.d.).

Le programme a en perspective la comparaison des apports sédimentaires provenant des berges des retenues avec ceux provenant des bassins versants en vue de réorienter les mesures de protection des retenues.

I. INTRODUCTION GENERALE

L'accès à l'eau est devenu un des enjeux majeurs pour les sociétés contemporaines, caractérisées par une forte croissance des besoins. Face à une population mondiale qui a quadruplé au cours du XXème siècle, la demande en eau douce a été multipliée par sept. Cet enjeu revêt néanmoins une acuité distincte selon les aires géographiques (Mérino , 2008). Ainsi, le problème de la disponibilité de l'eau se pose en Afrique avec bien plus d'acuité que dans d'autres continents de la planète. D'ailleurs, pour les experts du GIEC¹, d'ici 2020, « entre 75 et 250 Millions d'africains seront exposés aux crises liées à l'indisponibilité de l'eau douce » (DIENG, 2011). Il est dès lors primordial de faire la part des ressources annuellement renouvelable et celle exploitable à long terme pour la planification et la gestion des ressources en eau.

Depuis quelques décennies, la règle générale pour l'évaluation des apports d'eau (annuels et décennaux) en vue du dimensionnement des ouvrages hydrauliques sur les cours d'eau en Afrique de l'Ouest est de recourir aux méthodes régionales : Orstom, CIEH, Rodier-Auvray (résumées dans le Bulletin FAO N°54). Une des raisons de ce fait, est que les données hydrométriques même existantes souffrent de discontinuité. En effet l'inaccessibilité de certains sites en certaines saisons, la défaillance des appareils de mesure ; le manque de moyens font que les bassins versants sont très peu ou pas jaugés : l'information pluviométrique est généralement beaucoup plus abondante que l'information hydrométrique, parce qu'il est beaucoup plus simple et économique de mesurer la pluie en continue avec un pluviomètre que de jauger un cours d'eau (MOUNIROU et al., 2005). Ainsi, les données pluviométriques sont les seules largement disponibles contrairement aux données hydrométriques.

PROBLEMATIQUE

Sur les sites d'intervention du PADI, le problème de discontinuité des données hydrométriques se posent également. En effet, les résultats de la campagne de jaugeages effectués en 2012 sur les trois sites pilotes (Wedbila- Mogtéo- Kierma) n'ont donné que des débits aux côtes élevées. Ainsi les débits pour les basses eaux ne sont pas connus.

Fort heureusement, plusieurs méthodes, dont la modélisation hydraulique, coexistent pour extrapoler les courbes de tarage (Wikhydro, 2015).

¹ Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine. «La mousson africaine et ses composantes » Petit livre blanc 69 pages, 2002

La question qu'on se pose est donc de savoir si l'application d'un modèle hydraulique permettrait une estimation raisonnable des débits observables. Autrement dit est-ce qu'un modèle hydraulique pourrait, avec les données dont nous disposons, fournir les débits pour les basses eaux, couvrant ainsi toutes les hauteurs d'eaux mesurées aux différentes stations?

Pour cette étude nous nous intéresserons uniquement à l'affluent principal de la retenue de Wedbila.

OBJECTIFS DE L'ETUDE

Objectif général

L'objectif de cette étude est de réaliser une modélisation hydraulique de l'affluent principal de la retenue de Wedbila. Cela afin de disposer de courbe de tarage représentant aussi bien les jaugeages en hautes eaux qu'en basses eaux.

Objectifs spécifiques

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- Retenir un modèle qui soit adapté aux conditions locales ;
- Extrapoler les courbes de tarage ;
- Déterminer les modalités d'utilisation du MNT² de Wedbila.

Hypothèses

Les hypothèses suivantes ont été formulées :

- Un modèle hydraulique adapté aux conditions locales existe bien;
- L'étendue des données disponibles influence ce modèle ;
- La pertinence des réponses que l'on peut apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin versant (relativement aux objectifs fixés) ;

Initialement prévu pour les deux affluents de la retenue de Wedbila, la modélisation hydraulique portera uniquement sur l'affluent principal. Nous présenterons aux **annexes2 à 4** quelques images de ce second affluent.

² Modèle Numérique de Terrain

II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. La courbe de tarage et son extrapolation

La relation arithmétique qui s'établit dans un cours d'eau entre la hauteur d'eau et le débit est représentée par une « courbe de tarage ». Cette courbe étant établie, il devient aisé en mesurant la hauteur d'eau d'en déduire le débit (CEMAGREF, 2009).

Le Laboratoire Régional de Blois a extrapolé la courbe de tarage « vers le haut » à l'aide de modélisation hydraulique 1D en trois étapes à travers un couplage SIG. Cette méthode a permis à la fois de répondre au sujet de l'étude mais aussi d'apporter une plus-value en proposant une cartographie des débits extrêmes (ceux utilisés pour établir la partie extrapolée de la courbe de tarage) (Wikhydro, 2015).

La définition du tarage d'une station hydrométrique est toujours la phase délicate du processus de calcul des débits et d'innombrables erreurs ont été faites parce qu'une ou plusieurs de ces étapes ont été négligées (WMO / OMM et al. 2007). En effet, une séquence d'étape à suivre a été présentée lors de ce séminaire pour aboutir au tracé de la courbe de tarage. Vu qu'en général le nombre de jaugeages est insuffisant et la courbe de tarage est incomplète, celle-ci doit donc être extrapolée à ses extrémités. Diverses méthodes d'extrapolation de la courbe de tarage y ont été présentées.

Lang et al. (2010) ont, dans leurs travaux, montré l'importance de prendre en considération les erreurs possibles sur l'estimation des débits pour l'estimation des crues extrêmes. Après un rappel des principales difficultés liées à l'extrapolation des courbes de tarage, une analyse de sensibilité par une approche hydraulique a fourni une courbe enveloppe pour la conversion des hauteurs de crue en débit, pour huit bassins méditerranéens.

Concernant l'extrapolation vers le bas de courbe de tarage, Philippe BOIS montre que c'est une opération très délicate en rivière naturelle pour les raisons suivantes :

- variations fréquentes du lit en basses eaux ;
- peu de sensibilité de la relation hauteur-débit ;

II.2. Modélisation hydraulique

La modélisation d'un phénomène est une démarche visant à représenter par un moyen adéquat le comportement de ce phénomène. Dans les sciences de l'ingénieur, la modélisation permet de comprendre les variables qui influencent ce comportement, afin de dimensionner des ouvrages, d'anticiper son évolution, de simuler des situations à venir (F. N. CRES 2011).

La modélisation des écoulements avec les modèles hydrauliques 1D et 2D peut se faire en régime permanent comme en régime non permanent. Pour DEGOUTTE (2014), le calcul d'un écoulement de rivière en crue doit se faire en régime transitoire

Pour GUINOT (2003), les différents types de modèles rencontrés en hydrologie et en hydraulique sont : les modèles boîte noire, les modèles conceptuels et les modèles mécanistes. Avant de montrer l'apport des mathématiques et de l'informatique à ces modèles numériques, il explique leur fonctionnement puis la mise en œuvre des modèles mécanistes. Selon lui, plus un modèle a de dimensions:

- moins il a de paramètres ;
- plus ceux-ci sont difficiles à ajuster ;
- plus la géométrie et les conditions aux limites sont importantes.

La réforme du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, visant à passer de l'ancien système d'annonce de crue à une démarche de prévision de crue, a été mise en place par les nouveaux SPC sous l'impulsion donnée par le SCHAPI. Pour la mise en place de cette réforme, ils doivent développer des modèles de prévision adaptés aux cours d'eau de leur territoire (STARON 2006). Dans son étude, il s'agissait de l'amélioration du logiciel MASCARET, son code casier particulièrement, en vue de l'adapter à la modélisation hydraulique en temps réel. Le modèle de la Somme a été construit sous MASCARET à l'identique du modèle CARIMA avant de comparer les résultats des deux logiciels développés respectivement par EDF et SOGREAH. Un modèle cartographique a parallèlement été construit à partir des différents résultats hydrauliques obtenus sur MASCARET, à l'aide du logiciel OPTHYCA pour l'établissement du Modèle Numérique de Zones Inondées (MNZI).

➤ Logiciels de modélisation hydraulique

LERAT (2009) note que très peu d'écrit existe sur les modèles couplés hydraulique/hydrologique. Dans sa thèse, il montre la contribution de l'hydrologie dans les modèles hydrauliques par l'estimation des apports, notamment, des apports latéraux. Selon lui, un modèle hydraulique est utilisé pour :

- calculer l’emprise de la zone inondable
- dimensionner des aménagements de protection.

C’est un outil incontournable pour analyser le risque d’inondation

Le logiciel MASCARET est un code de calcul de modélisation hydraulique 1D avec casiers. Il est la propriété d’EDF et du CETMEF. Le logiciel Mascaret est fourni en tant que gratuit. EDF et le CETMEF accordent à l’utilisateur les droits d’installer et d’utiliser le logiciel Mascaret après avoir téléchargé le logiciel et s’être enregistré (CEREMA 2012).

Le logiciel SIC (SIMulation des Canaux d'irrigation) est un logiciel de simulation hydraulique adapté au calcul des écoulements dans les canaux d’irrigation et les rivières (Malaterre s.d.). C’est un modèle mathématique qui permet de simuler le comportement hydraulique de la plupart des canaux d’irrigation, en régime permanent et transitoire (ENSEEIH, Présentation des logiciels s.d.). Les principaux objectifs du modèle sont:

- fournir un outil de recherche permettant d’acquérir une connaissance en profondeur du comportement hydraulique d’un canal principal et ses secondaires ;
- identifier à partir du modèle les règles pratiques de gestion opérationnelle des ouvrages de régulation en vue d’améliorer les procédures de gestion actuelles d’un canal ;
- évaluer l’influence d’éventuelles modifications sur certains paramètres de conception en vue d’améliorer et de maintenir la capacité d’un canal à satisfaire les objectifs de débit et de cote d’eau.

SIC, développé par la Division Irrigation du CEMAGREF (appelé Irstea aujourd’hui) de Montpellier, est composé de trois modules : TALWEG qui permet d’introduire les données topographiques, FLUVIA (déjà utilisé à l’ENSEEIH) qui réalise les calculs en régime permanent et SIRENE qui effectue les calculs en régime transitoire (ENSEEIH s.d.).

Pour STARON (2006), un grand désavantage de CARIMA sur MASCARET est son manque de convivialité, et dans le cas où les performances en terme de calcul hydraulique des deux logiciels seraient comparables, l’utilisation de MASCARET est plus aisée grâce à son interface graphique.

Honnorat et al. (2007) ont montré comment DassFlow est un logiciel d’assimilation de données par une approche variationnelle.

HEC-RAS est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Center de l'USACE. Il s'agit d'une nouvelle version d'un modèle hydraulique auparavant nommé HEC-2, qui comporte maintenant une interface graphique permettant d'éditer, modifier et visualiser les données d'entrée, de même qu'observer les résultats obtenus. Il est présentement utilisé dans plusieurs firmes d'ingénierie et organismes gouvernementaux (École de technologie supérieure 2009). Le logiciel résout l'équation 1D de Saint Venant par la méthode des différences finies. Ce modèle ne considère que la composante de la vitesse suivant le sens de l'écoulement. Il possède un module complémentaire de transport sédimentaire et de transport de polluants (BEI, 2014).

Les logiciels de modélisation hydraulique et les SIG n'utilisent pas le même système de coordonnées. Sous HEC-RAS, l'utilisateur dessine le réseau hydrographique sans tenir compte de leurs coordonnées réelles c'est-à-dire géo-référencées. En ce sens, Tate and Olivera (1999) se sont attelés à montrer la connexion possible entre le modèle hydraulique HEC-RAS et ArcView GIS pour la représentation des zones inondables par Waller Creek à Austin dans le Texas. L'enjeu est d'autant plus important vu que le cours d'eau est à proximité de nombreux bâtiments scolaires, de maisons et d'entreprises. La localisation des plaines inondables par Waller Creek est d'un grand intérêt pour les urbanistes, les promoteurs et les propriétaires fonciers.

Nania and Molero (2007) proposent un manuel d'utilisation pour HEC-RAS et sa composante spatiale HEC-GeoRAS.

Aussi, Tabyaoui et al. (2014) ont proposé dans leur étude un lien entre HEC-RAS et HEC-GeoRAS pour la représentation des zones inondables par la rivière OUED INAOUEN au Nord du Maroc. L'utilisation de ces outils permettrait aux décideurs d'identifier où des changements sont à faire pour des impacts plus significatifs.

Dr. KamaledinELsidig et al. (2014) ont utilisé HEC-RAS dans leur étude pour représenter la zone inondable par le barrage de Roseires au Soudan.

Timbadiya, et al (2011) présente l'utilisation de HEC-RAS pour le calage et la validation de leur modèle sur la base du critère RMSE avec une série de données sur deux années. Ils arrivent ainsi à faire des prévisions pour l'année 2006. Il montre aussi qu'il est impossible d'utiliser une seule valeur pour le coefficient de rugosité de Manning sur toute la partie aval de la rivière Tapi en Inde.

➤ **Calage/ Validation de modèle hydraulique**

Le calage d'un modèle a pour but de trouver le jeu de paramètres qui rapproche le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé. La similitude des comportements étant quantifiée par un critère (fonction objective) servant à l'optimisation des paramètres et mesurant ce degré de similitude. Le calage demande donc le choix à la fois d'un critère de qualité, d'une méthode pour identifier les paramètres, ainsi que des séries de données destinées à fournir l'information nécessaire à l'optimisation.

Pour Malaterre et al. (2011), le calage d'un modèle hydrodynamique signifie ajuster les coefficients de rugosité de Manning-Strickler, les coefficients de débit des ouvrages, et les valeurs d'infiltration. Quant à la validation, elle permet de justifier la capacité du modèle à simuler les événements passé ou futur.

Le coefficient de rugosité de Manning est l'un des paramètres les plus sensibles lors de la modélisation hydraulique. L'objectif attendu dans le calage d'un modèle est qu'il soit le plus robuste et le plus fiable possible (DAI 2013). Selon cette même source aussi : « **Un modèle devrait toujours être calibré si possible, surtout si le modèle est destiné à l'aide à la prise de décision opérationnelle et de gestion.** » puisque c'est un processus d'ajustement des paramètres d'entrées pour obtenir des valeurs simulées suffisamment proches des valeurs observées.

Le bureau d'études SAFEGE sous le pilotage de VNF a conçu un modèle hydraulique dans la vallée de la Seine avec le logiciel MIKE 11. Ce modèle a été réalisé afin d'analyser les impacts potentiels des différents scénarii de projet sur une gamme de régimes hydrauliques allant de l'étiage à la crue la plus importante connue sur le secteur d'étude. Le modèle a été calé avec les lignes d'eau d'étiage de juillet 2010 et celle de la crue de janvier 1982. Les tests de validation ont été réalisés en simulant les crues de mars 2001 et janvier 1910 (SAFEGE 2012).

Pour (DAI 2013), le critère de Nash (NS) permet de calculer la part de la variance expliquée grâce au modèle. NS est une mesure de l'efficacité du modèle et peut varier de $-\infty$ à 1. La valeur maximale (optimale) est de 1 pour NS, et les valeurs peuvent être négatives. Une valeur NS de 1 indique que le modèle simule à la perfection. NS proche de 0 indique que le modèle n'est pas meilleur que si, l'on avait remplacé la valeur simulée par le débit moyen. Une valeur supérieure à 0.7 est

habituellement considérée comme satisfaisante. Quand les valeurs observées s'approchent de la valeur moyenne, le dénominateur aura tendance à devenir plus petit, le rapport aura tendance à devenir plus grand, ce qui entraîne souvent une NS valeur négative.

Les études de Parhi, et al (2012) sur la rivière Mahanadi ont concernées le calibrage du coefficient de rugosité de Manning³(exprimée en $s/m^{1/3}$) avec les données de 2003 du cours d'eau sous HEC-RAS. Sur la base du critère de Nash-Sutcliffe, la validation a été faite avec les données de 2006. Le coefficient de rugosité de 0.032 a été retenu. Ensuite, Parhi (2013) obtient un coefficient de rugosité de Manning de 0.029 avec 92.39% pour le critère de Nash.

De la recherche bibliographique, on peut noter les points suivants :

Les diverses méthodes d'extrapolation de courbe de tarage dans la littérature sont :

- La méthode mathématique ou logarithmique ;
- La méthode de Stevens, surface mouillée ;
- La modélisation hydraulique.

Une modélisation hydraulique pourrait se faire avec les modèles donnés dans le **tableau 1**.

³ Coefficient de rugosité de Manning exprimé en $s/m^{1/3}$ par abus de langage on n'écrit pas l'unité.

Tableau 1: Quelques modèles hydrauliques

Logiciel	Editeur	Observations
Carima	SOGREAH	1D
Dassflow	INRIA	2D
Hydra	Hydratec	1D
HEC-RAS	USACE	1D, résout l'équation de Saint Venant avec un schéma aux différences finies
Mascaret	EDF (LNHE) et CETMEF	1D
Mike 11	Danish Hydraulic Institute.	1D
RUBARBE	CEMAGREF	1D
SIC	CEMAGREF	1D, résout l'équation de Saint Venant avec un schéma aux différences finies de Priesmann

III. MATERIEL ET METHODES

III.1. Présentation de la retenue de Wedbila

Le site de notre étude se trouve à Koubri, ville située à environ trente kilomètres de la capitale burkinabè Ouagadougou. Plusieurs retenues ont été construites dans la ville. On s'intéresse ici à celle de Wedbila



Figure 1: Vue de la retenue de Wedbila à Koubri par la nationale 5



Figure 2: Présentation des retenues de Nagbangré et Wedbila à Koubri

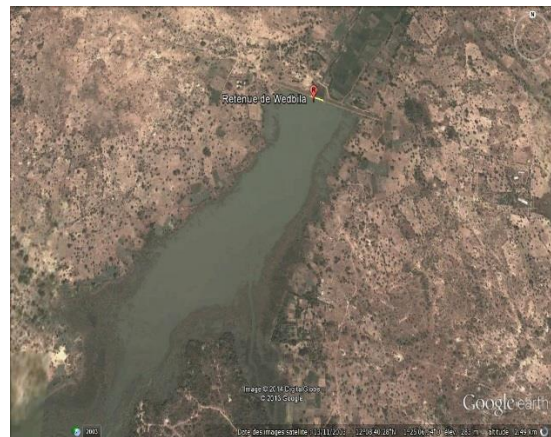


Figure 3: Zoom sur la retenue de Wedbila

Source : Google Earth

➤ Le barrage

Le barrage de Wedbila situé à Koubri dans le village de Wedbila, fut construit en 1975 par la FEME. Ses coordonnées sont : 12° 8'57.98"N et 1°25'0.98"O. Sa capacité de stockage est de **2 720 000 m³** (selon l'ODE car certaines sources donnent 2 800 000 m³ et d'autres 2 480 000 m³) sert à l'irrigation des 44 hectares de terrains aménagés et des superficies hors périmètre. L'augmentation des exploitants hors périmètre a entraîné une augmentation des prélèvements au niveau de la retenue. Il a ainsi été prévu en 2008 des travaux de rehaussements du déversoir du barrage de 50 cm par des blocs fusibles. La réception définitive de ces travaux s'est faite en 2010. Ce rehaussement a permis le gain d'un volume supplémentaire d'environ 620 000 m³ (PROJET N°92 WEDBILA s.d.).



Figure 4: Déversoir rehaussé par des blocs fusibles



Figure 5: Utilisation de l'eau de la retenue

➤ Le périmètre irrigué

Il a été aménagé 44 ha de périmètre irrigué à l'aval du barrage (ODE 2012). Les figures 6 et 7 donnent un aperçu de ce périmètre irrigué.

Certains exploitants agricoles se sont installés en dehors de ce périmètre dans les vallées des affluents du barrage. Les cultures rencontrées sont le riz, le maïs, l'oignon, les choux et d'autres cultures maraichères.



Figure 6: Un canal secondaire alimentant le périmètre



Figure 7: Prise d'eau par motopompe dans le canal primaire

➤ Les stations hydrométriques

Le barrage de Wedbila a deux principaux affluents que nous désignons par WED1 et WED2 respectivement pour l'affluent principal et l'affluent secondaire. Le rehaussement du déversoir du barrage a entraîné une augmentation de la superficie inondable par la retenue, provoquant ainsi l'inondation de la première station hydrométrique (Wed Old) installée sur l'affluent principal ; d'où son déplacement au niveau de la station actuelle (Wed New) sur ce même affluent. Il faut dire que le PADI intervient sur ce site depuis environ 4 ans et des infrastructures ont été mises en place. On y trouve les dispositifs suivants :

- ✓ Limnimètre et limnigraphe pour la mesure des hauteurs d'eau (lecture pour le limnimètre et enregistrement toutes les cinq minutes par le limnigraphe)
- ✓ Pluviographe pour l'enregistrement des hauteurs de pluies toutes les cinq minutes
- ✓ Bac d'évaporation pour évaluer l'ETP

➤ Données à notre disposition

En plus du modèle numérique du bassin versant (REF 3D), nous avons à notre disposition des données de jaugeages réalisés le 04/07/2012 à l'ancienne station ; d'autres effectués au niveau de la nouvelle station entre le 5 et le 8 Août 2012. Nous avons réalisés des levés topographiques à la nouvelle station. Ceux de l'ancienne station nous ont été fournis.

Tableau 2: Coordonnées des stations hydrométriques sur WED 1

	WED1 NEW	WED1 OLD
LAT	-1.43832	-1.4311
LONG.	12.13078	12.1347

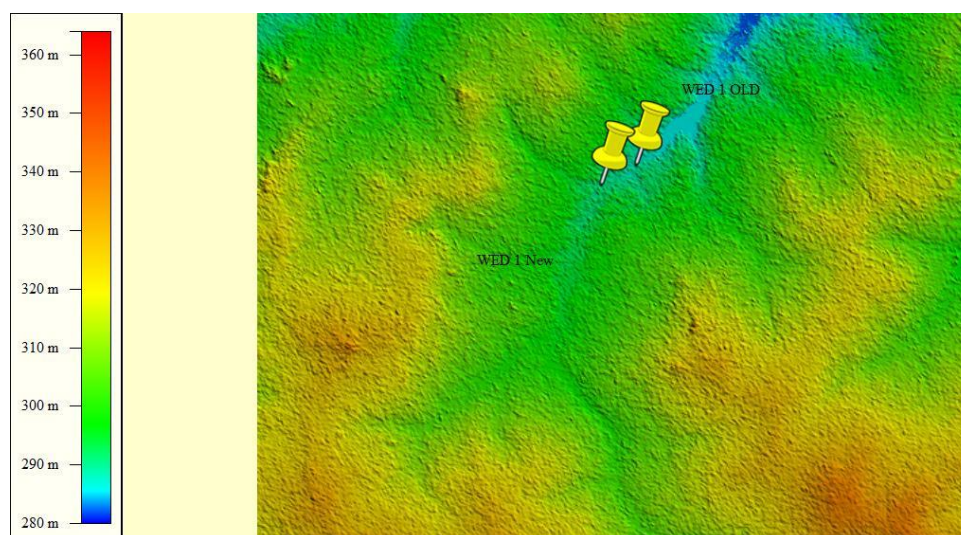


Figure 8: Localisation des deux stations hydrométriques de l'affluent principal sur fond du REF 3D



Figure 9: Limnimètre au niveau du déversoir



Figure 10: Echelle au niveau de la prise du barrage



Figure 11: Ancienne station de l'affluent principal



Figure 12: Nouvelle station de l'affluent principal

III.2. Matériel

En plus du matériel pour les levés topographiques, nous avons eu besoin des logiciels de bureautique (Word, Excel, Access...) d'une part et de logiciel technique d'autre part.

➤ **Matériel de terrain**

- GPS
- Accessoire de levés topographique (niveau, mire, trépied, station totale...)
- Chaîne, machette
- Appareil photo

➤ **Logiciel technique**

- Google Earth
- HEC-RAS
- HEC-GeoRAS
- Global Mapper
- AutoCAD
- ArcGIS/ ArcView

III.3. Méthodes

Notre méthode s'est structurée en différents points. Nous avons débuté par une recherche bibliographique pour avoir une idée des travaux antérieurs, voir les modèles susceptibles d'être utilisés et leur acquisition. Il y a ensuite eu la phase de maîtrise de l'outil de modélisation ainsi que celle de terrain pour la collecte des données à entrer dans le modèle. Une première série de levés topographiques a d'abord été réalisé puis une deuxième après que la première ait été jugée non concluante (voir annexe 7).

➤ **Calage et Validation du modèle**

L'affluent principal de Wedbila a une configuration assez simple. Elle ne présente aucun ouvrage hydraulique (pont, buse, seuil...). Sur les berges de la partie étudiée des cultures sont présentes.

Pour caler notre modèle, nous le faisons tourner avec différentes valeurs du coefficient de rugosité de Manning et nous comparons les sorties avec les valeurs de jaugeages réalisés jusqu'à aboutir au jeu de coefficient pour lequel les sorties sont très proches des valeurs observées à WED Old. Avec les coefficients issus du calage, nous avons procédé à la validation en simulant le modèle à WED New avec les débits mesurés en Août 2012. Le critère utilisé lors du calage est le RMSE définit par :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_o - W_s)^2} \quad (1.)$$

- W_o : hauteur d'eau observée
- W_s : hauteur d'eau simulée
- n : nombre total de points

Les coefficients de rugosité de Manning varient selon la végétation, la nature des parois du lit du cours d'eau, les sinuosités de celui-ci (méandres). Ces coefficients de Manning sont issus de Chow V. T. (1959) et de FAO (1996), présentés aux **annexes 7 et 8**. La procédure d'estimation de rugosité de Cowan a été utilisée pour des vérifications. La formule de Cowan⁴ est la suivante :

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m \quad (2.)$$

- n_b = Base value for n for a straight uniform, smooth channel in natural material
- n_1 = Value added to correct for surface irregularities
- n_2 = Value for variation in shape and size of the channel
- n_3 = Value for obstructions
- n_4 = Value for vegetation and flow conditions
- m = Correction factor to account for meandering of the channel

➤ Régime d'écoulement et données de débit

Toutes les simulations ont été effectuées sous le régime permanent. A partir du débit décennal (estimé par la méthode CIEH), les débits pour différentes périodes de retour ont été calculés en utilisant les coefficients ci-dessous issus du cours de F.-N. CRES (2001) :

Tableau 3: Coefficients pour le passage du débit décennal à aux débits pour différents temps de retour

Période de retour T	3 mois	6 mois	1 an	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Valeur du rapport Q(T)/ Q(T=10ans)	0,24	0,34	0,45	0,57	0,80	1	1,25	1,60	2

Source: F-N CRES (2001)

⁴ "Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels" in **HEC-RAS Reference Manual**

➤ Utilisation du REF 3D

Le REF 3D de Wedbila est un modèle numérique du bassin versant de Wedbila issu du SPOT. Il a une résolution de 30 x 30 m et une précision altimétrique de 10 m (**SPOT Image 2006**). Son utilisation constitue la seconde partie de notre travail. Il s'agissait en effet à cette étape de voir s'il serait possible d'extraire de ce modèle numérique les sections en travers nécessaires à la modélisation numérique. L'atteinte de ce but nous permettrait de nous passer de levés topographiques à l'avenir.

En premier lieu, il a permis de représenter le bassin versant et de déterminer ses caractéristiques et celles des sous bassins versants de Wed Old et Wed New afin d'estimer les débits par la méthode CIEH. Nous l'avons également utilisé pour les simulations avec les données géographiques de notre bassin versant en vue d'une comparaison avec les simulations directes.

➤ Choix du logiciel de modélisation hydraulique

De tous ces logiciels, notre choix s'est porté sur HEC-RAS que l'APEFE possède déjà. En plus d'être gratuit, l'ULg a une très grande expérience en modélisation hydraulique avec ce logiciel. Nous avons d'avantage été réconfortés dans notre choix par (INPT-ENSEEIH s.d.) qui stipule qu'au regard des caractéristiques de la zone d'étude et des variables étudiées (hauteur de la ligne d'eau et débit), l'utilisation d'un modèle 1D est suffisant.

Toujours selon la même source, les travaux de Horrit & Bates (2002) montrent que, les résultats des simulations 1D du logiciel HEC-RAS, bien que découlant d'une méthode plus simple, sont comparables à ceux de la modélisation 2D donnée par Telemac 2D, à condition de posséder un modèle numérique de terrain de haute résolution.

III.4. Présentation du modèle hydraulique utilisé : HEC-RAS

III.4.1. Description

L'outil de modélisation retenu est HEC-RAS développé par l'USACE. La première version a été publiée en Juillet 1995. C'est un modèle unidimensionnel simulant aussi bien les écoulements permanents que transitoires. Le logiciel résout l'équation 1D de Saint Venant par la méthode des différences finies. Il ne considère que la composante de la vitesse suivant le sens de l'écoulement. Il possède un module complémentaire de transport sédimentaire et de transport de polluants (BEI, 2014).

Pour les simulations en écoulement permanent les conditions suivantes énumérées par Brunner (2010) sont à vérifier :

- ✓ L'écoulement doit être uniforme
- ✓ L'écoulement est unidimensionnel
- ✓ Les pentes de la rivière sont faibles c'est-à-dire inférieures à 10%

La procédure de calage/validation en régime transitoire est définie dans le manuel d'utilisation de HEC-RAS (voir **annexe 11**).

III.4.2. Mode de fonctionnement de HEC-RAS

Les étapes nécessaires à toutes simulations avec HEC-RAS concernent :

- La géométrie du cours d'eau au moyen de sections transversales en spécifiant les inter-distances entre les transects, les points berges de même que les coefficients de rugosité de Manning.
- Les données d'écoulement, suivant le type d'écoulement envisagé (permanent ou transitoire), pour spécifier les débits à être modélisés ainsi que les conditions aux limites selon le régime d'écoulement.
- La simulation hydraulique où l'on définit le régime d'écoulement (fluvial ou torrentiel) avant de lancer la simulation.
- La visualisation des résultats.

Ainsi donc, après avoir entré les données géométriques, le régime d'écoulement est spécifié avant d'entrer les conditions initiales et aux limites. Les simulations ont été faites en régime permanent.

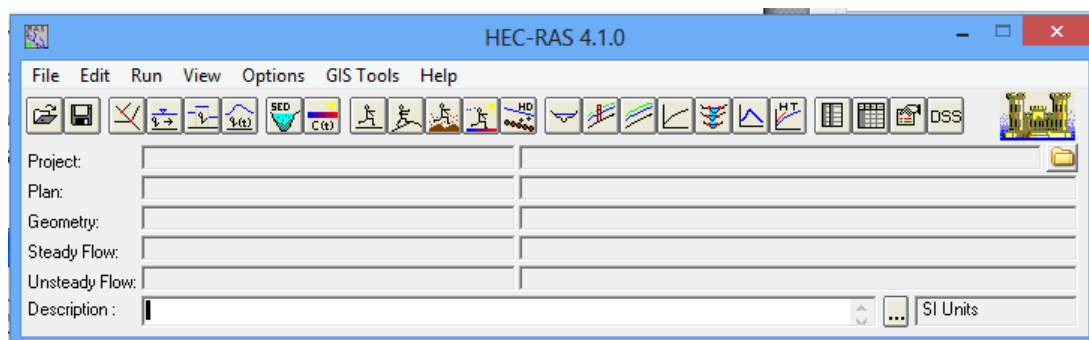


Figure 13: Fenêtre principale de HEC-RAS

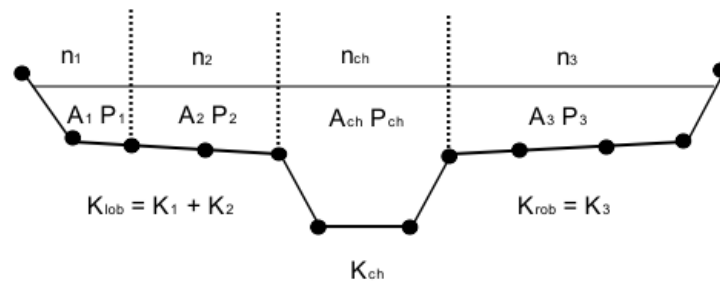


Figure 14: Subdivision utilisée par default dans HEC-RAS pour la définition des coefficients de rugosité

Dans toute la suite, nous avons utilisé un coefficient de rugosité de Manning moyen pour le lit mineur et de même pour le lit majeur comme représenté ci-dessous :

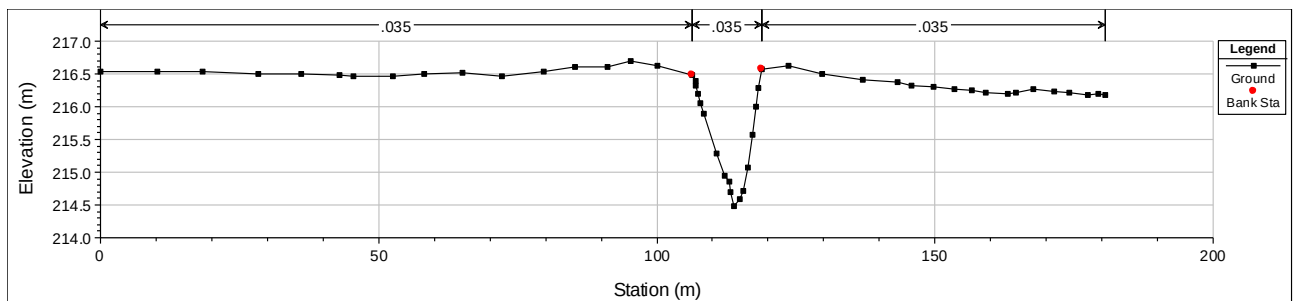


Figure 15: Subdivision que nous avons utilisée.

IV. RESULTATS-DISCUSSION

IV.1. Critiques des données

✚ Jaugeages

Les jaugeages ont été réalisés en 2012 au niveau des deux stations Wed Old et Wed New. Les jaugeages à l'ancienne station, au nombre de quatre(4), ont été réalisés le 4 Juillet 2012. Quant à ceux réalisés à la nouvelle station, ils sont neuf(9) et se sont déroulés du 5 au 8 Août de la même année.

✚ La topographie

Les données topographiques sont au cœur même des modélisations sous HEC-RAS vu qu'elles fournissent la géométrie du cours d'eau. Les levés topographiques ont été réalisés aux deux stations de mesures. Ceux réalisés à l'ancienne station couvraient une plus large distance (environ 200m) contrairement à ceux effectués au niveau de la nouvelle station.

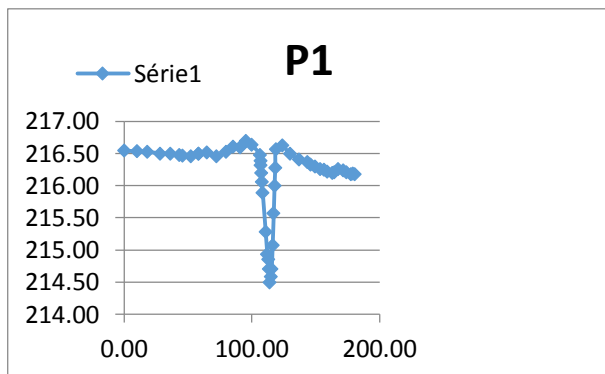


Figure 16: Transect réalisé à Wed Old

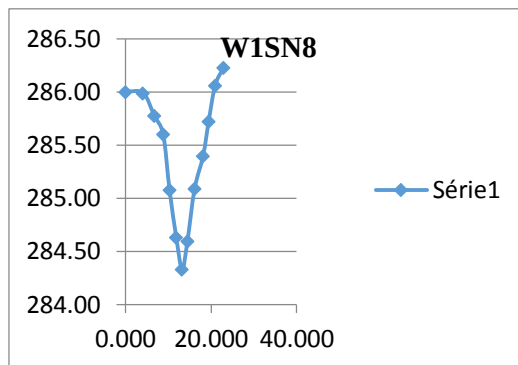


Figure 17: Transect réalisé à Wed New

Les levés ont été repris à Wed New. En effet, l'ensemble de ces transects ont une longueur moyenne de 20m contre plus de 100m en moyenne pour ceux réalisés à Wed Old. Ces 20m ne représentant pas le lit majeur n'ont pas été pris en compte dans la modélisation. Nous avons effectué d'autres levés topographiques avec des transects d'environ 250m qui ont été utilisés. Le problème avec ces derniers transects est qu'il ne marque pas assez le fond du cours d'eau, lui donnant ainsi une forme en V très pointue au lieu d'être étalée dans le lit du cours d'eau. Les **annexes 5 et 6** montrent d'autres transects. Aussi, leur représentation sur Google Earth montre qu'ils sont décalés du lit du cours d'eau. Les

coordonnées de l'ancienne station coïncident bien tandis que celles de Wed New(en rouge) sont décalées. Cela est dû sans doute à la configuration de l'appareil de levés topographiques.



Figure 18: Transect plus élargi à Wed New

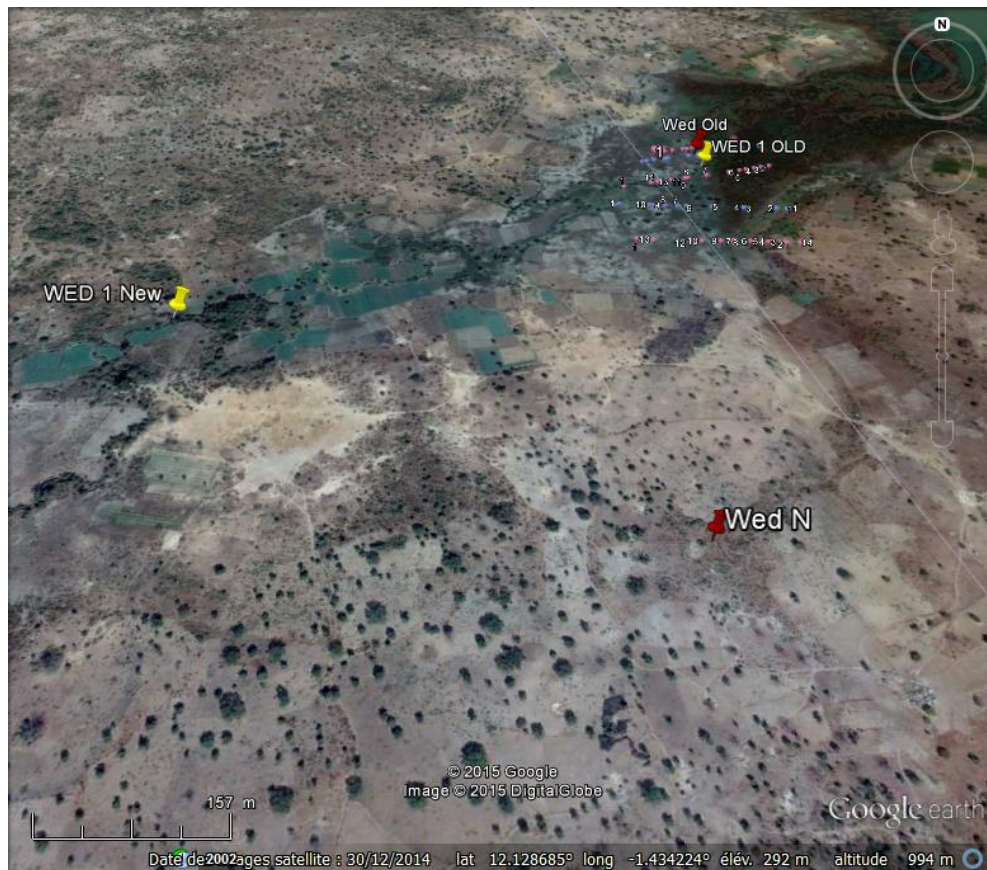


Figure 19: Représentation de quelques transects réalisés à Wed New sur Google Earth

Après l'analyse de nos données, quel traitement pouvons-nous en effectuer?

IV.2. Calage du modèle

Le calage a concerné l'ancienne station Wed Old qui, rappelons-le n'existe plus aujourd'hui ; elle a été déplacé un peu en amont donnant lieu à l'actuelle station Wed New. Le calage du modèle a été fait avec les données de jaugeages du 04/07/2012.

Tableau 4: Données de jaugeages réalisés à Wed Old

Date	Hauteur (cm)	Date de début et de fin du jaugeage	Débit (m ³ /s)
04/07/2012	119,00	10H18 à 11H57	1,38
04/07/2012	163,00	16H20 à 17H16	5,31
04/07/2012	175,00	17H57 à 18H40	6,27
04/07/2012	140,00	20H15 à 21H10	2,37

Il en résulte la courbe de tarage ci-dessous :

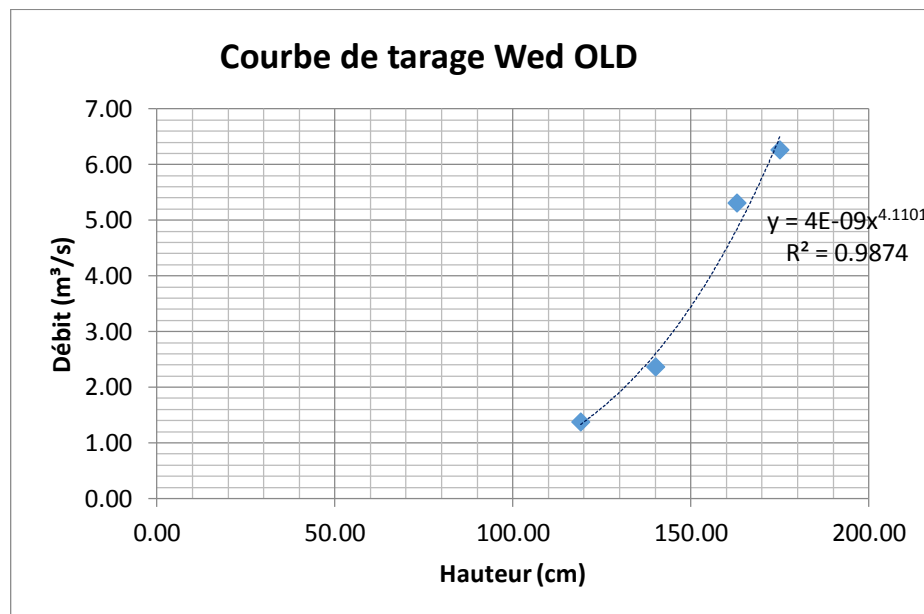


Figure 20: Courbe de tarage observée à Wed Old

Les côtes d'eau à atteindre pour ces débits sont :

Tableau 5: Côtes à atteindre

Débit (m ³ /s)	Cotes (m)
1,38	215,78
5,31	216,22
6,27	216,34
2,37	215,99

La géométrie du cours d'eau aux alentours de l'ancienne station est la suivante (voir figure 21).

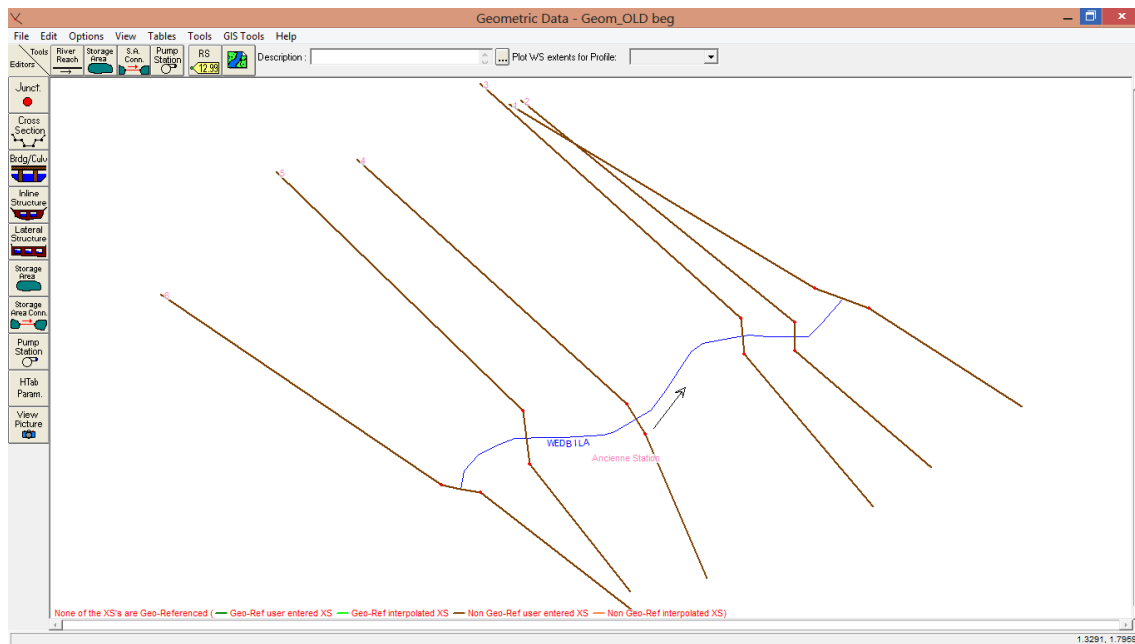


Figure 21: Géométrie Wed Old

Le tronçon pris en compte dans cette phase mesure 150 m environ. Les débits fournis au modèle sont les débits de jaugeages du **tableau 4** pour atteindre les côtes données au **tableau 5**. Pour différentes valeurs de rugosité, nous avons noté la valeur du critère RMSE représenté comme suit dans le **tableau 6**.

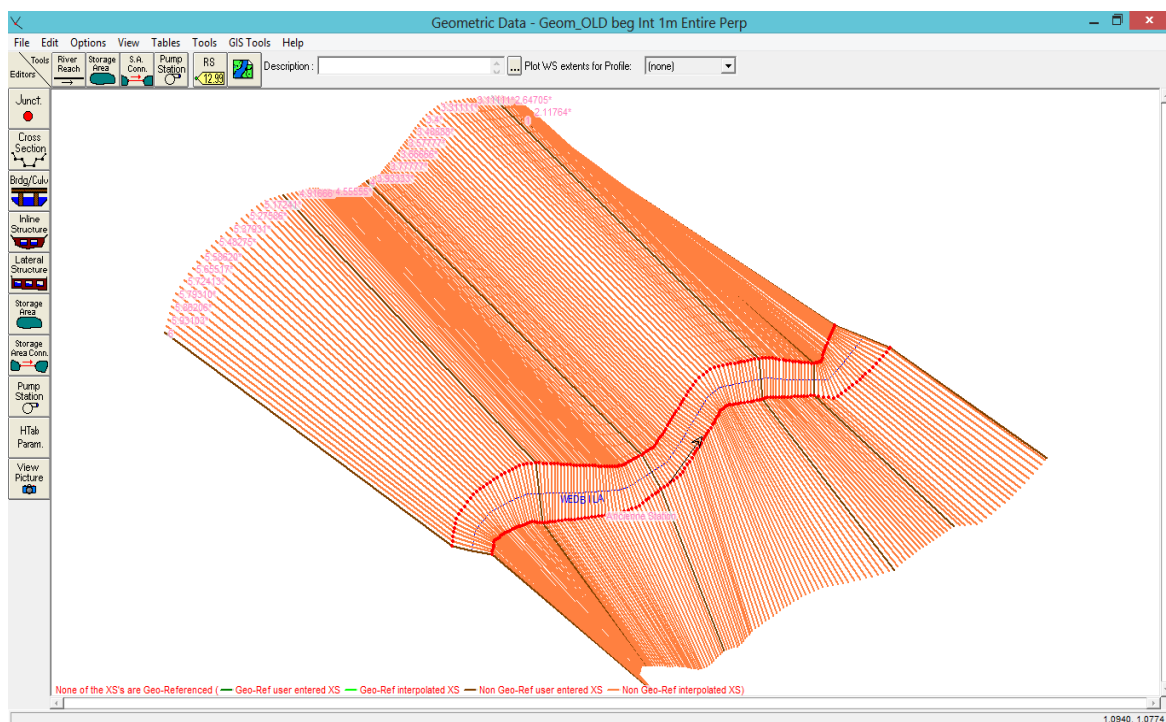


Figure 22: Géométrie Wed Old avec interpolation de 1m des transects

Tableau 6: Résultats phase de calage

n			RMSE	Remarques
0,035	0,035	0,035	0,623317736	Not Interpo- lated
0,035	0,035	0,035	0,588578797	Int 5m
0,035	0,035	0,035	0,588578797	Int 5m
0,035	0,035	0,035	0,593359082	Int 1m
0,05	0,035	0,05	0,593359082	Int 1m
0,035	0,04	0,035	0,551180551	Int 1m
0,035	0,05	0,035	0,477859812	Int 1m
0,035	0,055	0,035	0,440823094	Int 1m
0,035	0,06	0,035	0,405401036	Int 1m
0,06	0,06	0,06	0,405401036	Int 1m
0,06	0,065	0,06	0,371819849	Int 1m
0,035	0,065	0,035	0,371819849	Int 1m
0,035	0,075	0,035	0,315515451	Int 1m
0,04	0,075	0,04	0,313647892	Int 1m
0,05	0,075	0,05	0,313647892	Int 1m
0,06	0,075	0,06	0,312009615	Int 1m
0,06	0,08	0,06	0,284692817	Int 1m
0,06	0,1	0,06	0,19583156	Int 1m
0,1	0,1	0,1	0,194422221	Int 1m

Les valeurs en double sont mises en surbrillance.

En n'interpolant pas les profils en travers, on obtient une valeur élevée du RMSE (0,62). En diminuant le pas d'interpolation de 100m à 1m (de 5 en 5 à partir 50m), on constate que le critère diminue. Nous avons convenu donc de retenir un pas d'interpolation d'un mètre pour toutes les autres simulations.

RMSE diminue au fur et à mesure qu'on augmente la rugosité pour le lit mineur. On note aussi qu'il n'y a pas de différence significatif sur le critère lorsque n est inchangé pour le lit mineur et varie de 0,035 à 0,06 pour le lit majeur. Cela pourrait s'expliquer par le fait que l'essentiel de l'écoulement se fait dans le lit mineur et aussi que le coefficient de Manning à prendre en compte pour le lit majeur est compris entre 0,035 et 0,06.

On constate par ailleurs que le RMSE est minimal pour $n=0,1$ en lit mineur et 0,06 en lit majeur (le cas de $n=0,1$ partout n'est pas réaliste pour un cours d'eau naturel. Nous ferons fi de ce cas vu que sa valeur du RMSE présente un écart de notre valeur minimale très peu significatif : 0,001409339 soit 0,14%). Ce minimum de 0,20 est très proche du RMSE obtenu en prenant $n=0,1$ en lit mineur comme en lit majeur. Cependant, ce résultat n'est pas conforme à la configuration de Wed Old et ses alentours, présentée aux figures 21, 22 et 23.



Figure 23: Vue de l'emplacement de l'ancienne station



Figure 24: Vue de l'aval de l'ancienne station



Figure 25: Vue de la section à l'ancienne station

En comparaison avec la figure suivante où $n=0,1$, il nous faut revoir nos coefficients de Manning pour cette phase de calage de notre modèle hydraulique.



Figure 26: Exemple de cas⁵ où $n=0.1$

Des évaluations du coefficient de rugosité de Manning à Wed Old et ses environs nous donnent des coefficients entre 0,065 et 0,078. On pourrait retenir en lit mineur 0,075 et 0,06 en lit majeur avec $RMSE=0,31m$.

A l'issue de la phase de calage, les coefficients de rugosité de Manning sont de **0,075** pour le lit mineur et de **0,06** pour le lit majeur. Dans leur conclusion, les valeurs obtenues par Timbadiya et al. (2011), sont de l'ordre de 0,19 ; 1,36 et 1,63 m pour leurs trois sites. Notre valeur du critère de **0,31 m** est donc acceptable. On note également que $RMSE=0,32m$ pour 0,075 en lit mineur et 0,035 en lit majeur. Nous effectuerons la validation avec ces deux cas de figure afin de retenir un pour la suite des travaux.

⁵ **Source:** Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains

La figure ci-dessous présente la disposition des pluviographes et nos sites d'observations.

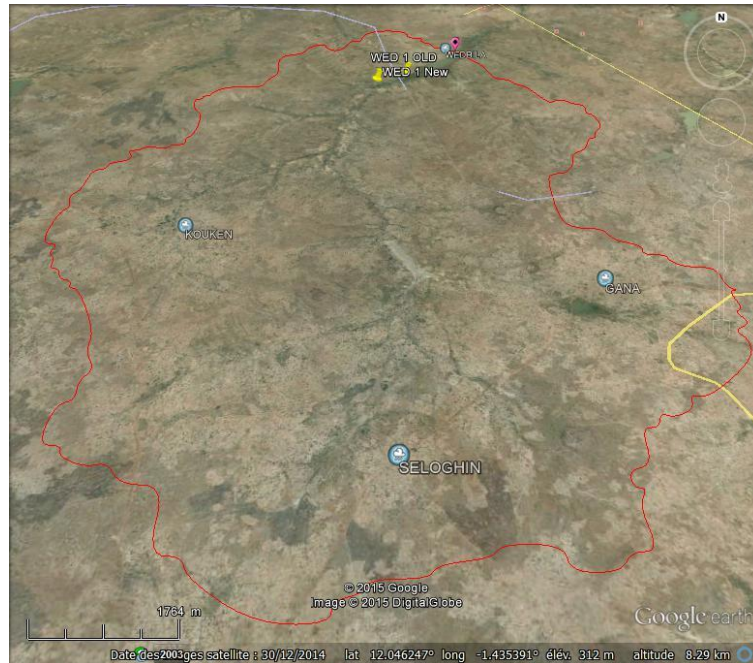


Figure 27: Pluviographes sur WED 1

A ce niveau, nous avons voulu à travers les sorties de ces pluviographes qui enregistrent toutes les cinq(5) minutes, retrouver à partir de nos données de jaugeage les débits correspondant aux les hauteurs fournies par les pluviographes. Cet objectif atteint, nous pourrions être en mesure de fournir les coefficients de Manning sur toute la saison des pluies avant d'entreprendre la validation de notre modèle.

Tableau 7: Sorties des pluviographes

GANA			KOUKEN			SELOGHIN		
04/07/2012 08:58	0		04/07/2012 07:00	0		04/07/2012 07:21	0	
04/07/2012 09:03	0,2		04/07/2012 07:05	0		04/07/2012 07:26	0,2	
04/07/2012 09:08	0,2		04/07/2012 07:10	0		04/07/2012 07:31	0,6	
04/07/2012 09:13	0		04/07/2012 07:15	0		04/07/2012 07:36	1,2	
04/07/2012 09:18	0,4		04/07/2012 07:20	0		04/07/2012 07:41	1,8	
04/07/2012 09:23	0,4		04/07/2012 07:25	0		04/07/2012 07:46	0,8	
04/07/2012 09:28	0,2		04/07/2012 07:30	0		04/07/2012 07:51	1	
04/07/2012 09:33	0,4		04/07/2012 07:35	0		04/07/2012 07:56	0,8	
04/07/2012 09:38	0,2		04/07/2012 07:40	0		04/07/2012 08:01	1,2	
04/07/2012 09:43	0,4		04/07/2012 07:45	0		04/07/2012 08:06	0,8	
04/07/2012 09:48	0,6		04/07/2012 07:50	0		04/07/2012 08:11	0,4	
04/07/2012 09:53	0,2		04/07/2012 07:55	0		04/07/2012 09:11	0,4	
04/07/2012 09:58	0,6		04/07/2012 08:00	0		04/07/2012 09:16	0,4	
04/07/2012 10:03	0,4		04/07/2012 08:05	0		04/07/2012 09:21	0,4	
04/07/2012 10:08	0,6		04/07/2012 08:10	0		04/07/2012 09:26	0,6	
04/07/2012 10:13	0,4		04/07/2012 08:15	0		04/07/2012 09:31	0,4	
04/07/2012 10:18	0,4		04/07/2012 08:20	0		04/07/2012 09:36	0,4	
04/07/2012 10:23	0		04/07/2012 08:25	0		04/07/2012 09:41	0,6	
04/07/2012 10:28	0,2		04/07/2012 10:00	0		04/07/2012 09:46	0,6	
04/07/2012 10:33	0,2		04/07/2012 10:05	0		04/07/2012 09:51	0,4	
04/07/2012 10:38	0		04/07/2012 10:10	0		04/07/2012 09:56	0,6	
04/07/2012 10:43	0		04/07/2012 10:15	0		04/07/2012 10:01	0,4	
04/07/2012 10:48	0,2		04/07/2012 10:20	0		04/07/2012 10:06	0,6	
04/07/2012 10:53	0		04/07/2012 10:25	0		04/07/2012 10:11	0,4	
04/07/2012 10:58	0		04/07/2012 10:30	0		04/07/2012 10:16	0,6	
04/07/2012 11:03	0		04/07/2012 14:40	0		04/07/2012 10:21	0,4	
04/07/2012 11:08	0		04/07/2012 14:45	0,2		04/07/2012 10:26	0,2	
04/07/2012 11:13	0		04/07/2012 14:50	0		04/07/2012 10:31	0,2	
04/07/2012 11:18	0		04/07/2012 14:55	0		04/07/2012 10:36	0,2	
04/07/2012 11:23	0		04/07/2012 20:50	0		04/07/2012 10:41	0	
04/07/2012 20:53	0		04/07/2012 20:55	0		04/07/2012 10:46	0,2	
04/07/2012 20:58	0		04/07/2012 21:00	0		04/07/2012 10:51	0	
04/07/2012 21:03	0		04/07/2012 21:05	0		04/07/2012 20:56	0	
04/07/2012 21:08	0		04/07/2012 21:10	0		04/07/2012 21:01	0	
04/07/2012 21:13	0		04/07/2012 21:15	0		04/07/2012 21:06	0	
04/07/2012 21:18	0		04/07/2012 21:20	0		04/07/2012 21:11	0	
04/07/2012 21:23	0					04/07/2012 21:16	0	
04/07/2012 21:28	0					04/07/2012 21:31	0	
04/07/2012 21:33	0					04/07/2012 21:36	0	

Les hauteurs mesurés par ces pluviographes sont différentes des hauteurs jaugées (voir tableau 3). Même en considérant un décalage d'une heure, on n'observe pas de similitudes entre hauteurs jaugées et hauteurs pluviographes ; et cela pour les trois pluviographes. Il est à noter à ce niveau qu'entre les pluviographes et nos stations de mesure, deux micro-retenues existent : Yansaré et Seloghin. Les sorties des pluviographes ne pourront donc pas nous servir pour reconstituer nos débits et pouvoir ainsi avoir des valeurs de rugosité de Manning sur toute la période des écoulements.

IV.3. Validation du modèle

A la question de savoir quelle est la capacité du modèle à simuler le présent ou le futur, c'est l'étape de validation qui nous permettra d'y apporter une réponse.

Tableau 8: Données de jaugeages réalisés à Wed New

Date	Hauteurs (cm)	Date de début et de fin du jaugeage	Débit (m3/s)	Côtes à atteindre (m)
05/08/2012	286,00	08H:43 à 10H:00	0,42	217,452
05/08/2012	284,00	17H:01 à 17H:28	0,37	217,432
06/08/2012	282,00	08H:49 à 09H:21	0,37	217,412
06/08/2012	281,00	17H:13 à 17H:38	0,27	217,402
07/08/2012	289,00	07H:58 à 08H:23	2,11	217,482
07/08/2012	290,00	08H:24 à 08H:58	2,38	217,492
07/08/2012	292,00	16H:33 à 16H:59	1,97	217,512
08/08/2012	298,00	08H:07 à 08H:33	2,73	217,572
08/08/2012	298,00	08H:34 à 08H:53	2,40	217,572

On en déduit la courbe ci-dessous :

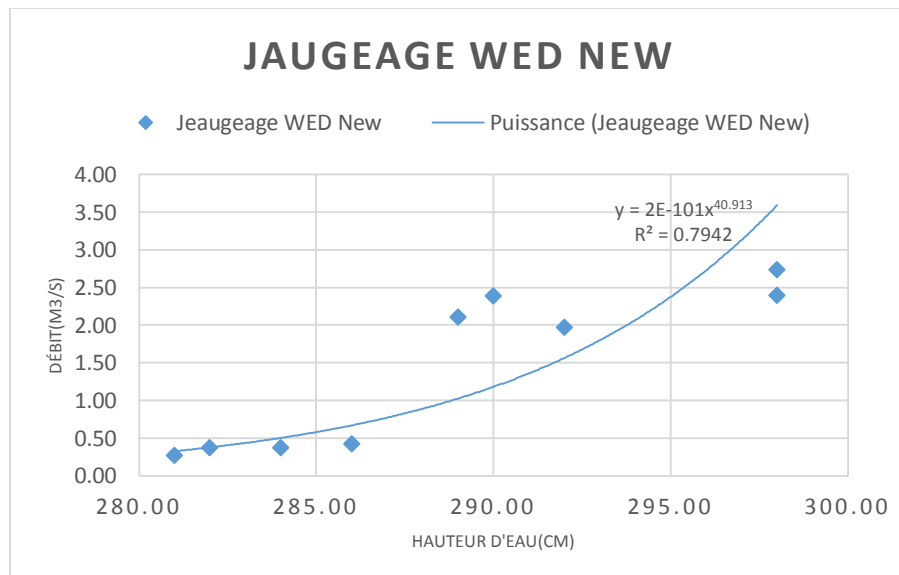


Figure 28: Jaugeages effectués à Wed New

En entrant dans HEC-RAS les données géométriques ainsi que les valeurs de débits mesurés à Wed New de même que les coefficients de Manning issus de la phase de calage, on obtient **RMSE=0,35m**. Quant au cas de 0,035 en lit majeur et 0,075 en lit mineur, on a RMSE=0,32m (voir **tableau 9** ci-dessous). La partie du cours d'eau pris en compte fait 841m dans le lit de ce dernier.

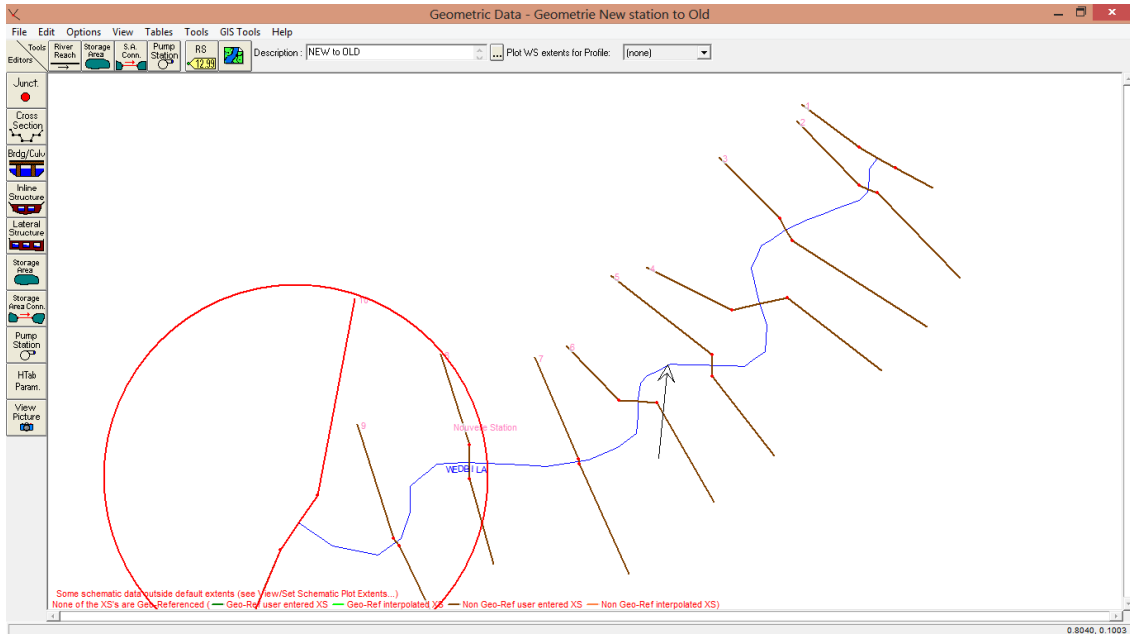


Figure 29: Géométrie Nouvelle station Wed New

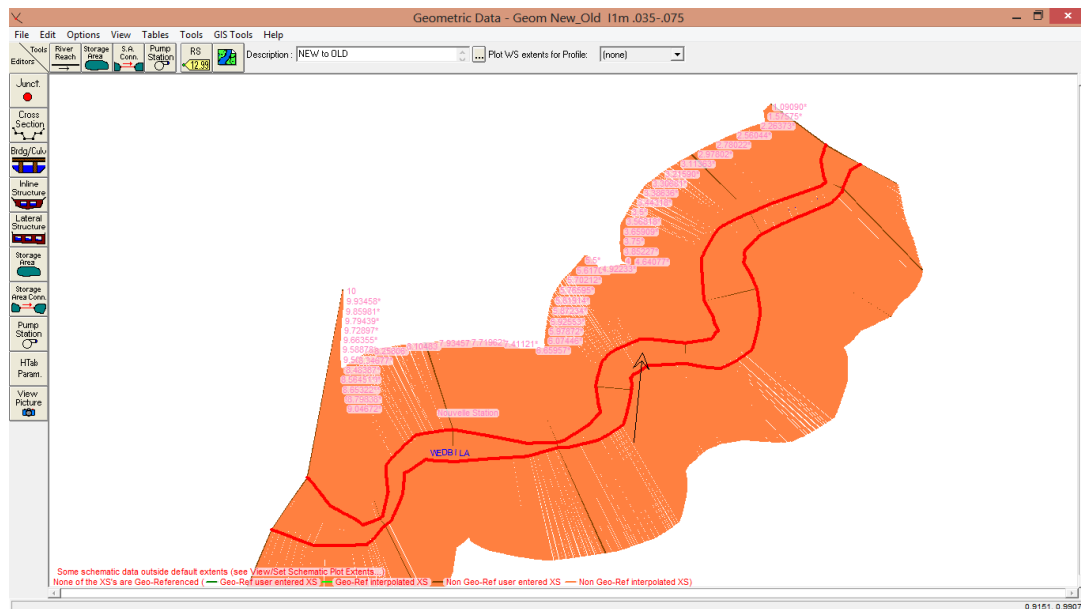


Figure 30: Géométrie Wed New avec interpolation 1m entre transects

Tableau 9: Résultats phase validation de HEC-RAS

n			RMSE
0,06	0,075	0,06	0,347830738
0,06	0,1	0,06	0,354688596
0,035	0,075	0,035	0,3202388

Pour la suite, on prendra **n=0,075 en lit mineur** et **n=0,035 en lit majeur** avec **RMSE=0,32m** en calage comme en validation. Nous présentons ci-dessous les courbes de tarage et zones inondées avec les coefficients de Manning retenus.

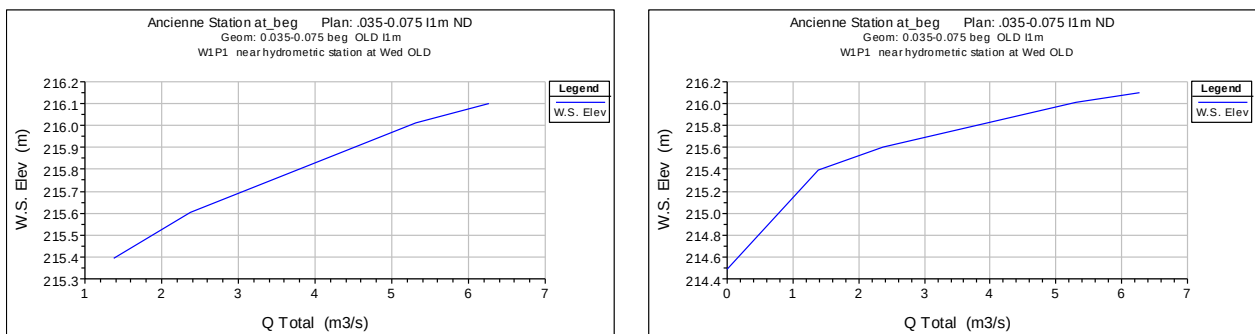


Figure 31: Courbe de tarage simulé à Wed Old avec et sans le point zéro

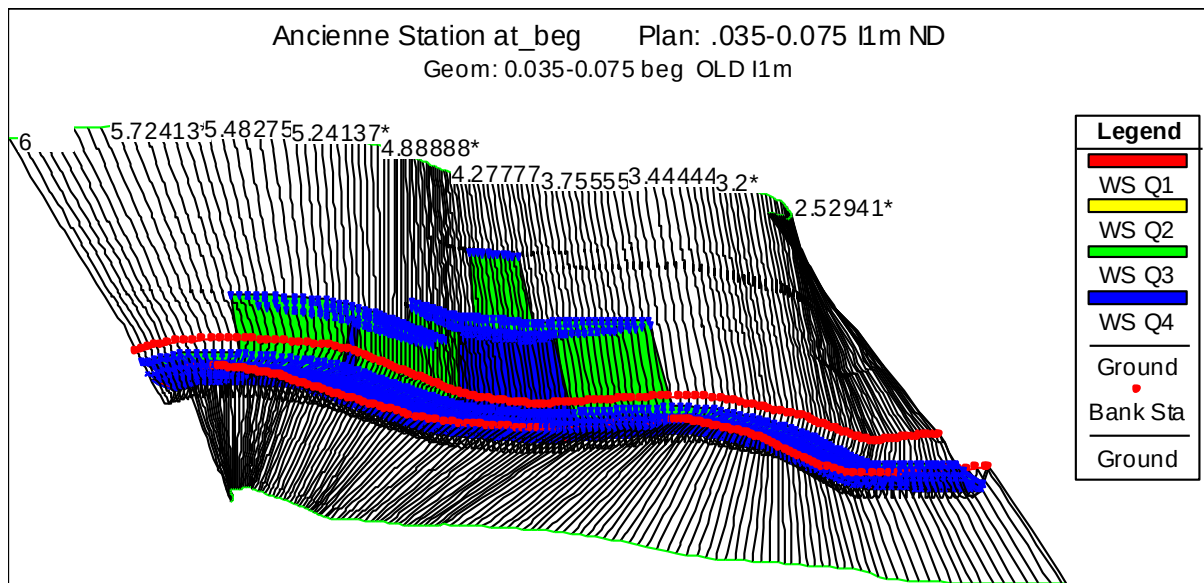


Figure 32: Simulation zone inondée d'Août 2012

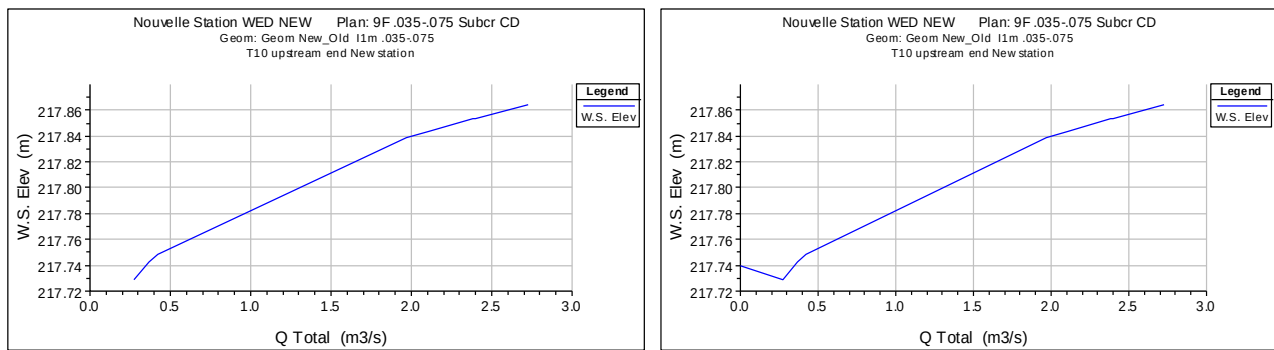


Figure 33: Courbe de tarage simulé avec et sans le point zéro à Wed New

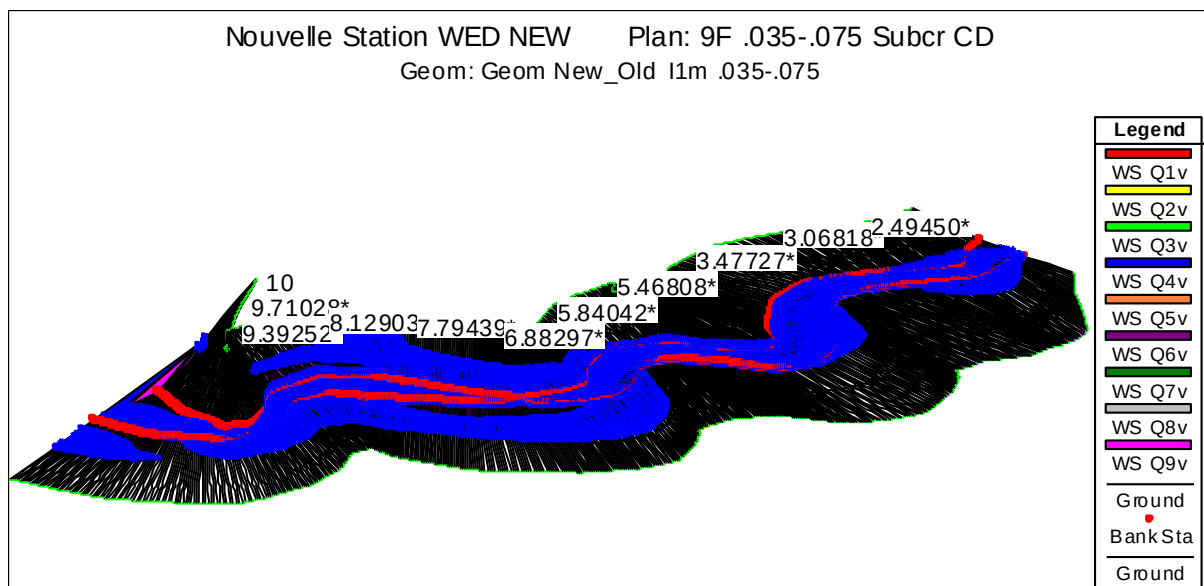


Figure 34: Simulation zone inondée Wed New

IV.4. Extrapolation de la courbe de tarage

L'extrapolation consiste, après le calage et la validation, à reporter sur un graphique hauteur-débit, à la suite des données jaugées, les niveaux d'eaux atteints aux droits de l'échelle pour différents jeux de débits extrêmes (Wikhydro, 2015). Le Laboratoire Régional de Blois a utilisé cette méthode sur la partie supérieure de la courbe de tarage de la Sioule à St Pourçain-sur-Sioule ; nous l'utilisons sur la partie inférieure au niveau de Wed1. Les résultats pour la gamme de débits allant de 0 à 1,35m³/s à l'ancienne station se présentent comme suit (voir **tableau 10**).

Tableau 10: Résultats gamme de débit

Débits	Hauteurs obtenues	Hauteurs correspondantes
0,3	214,892	0,62
0,5	215,092	0,82
0,8	215,392	1,12
1	215,592	1,32
1,3	215,892	1,62
1,5	216,092	1,82
1,8	216,392	2,12
2	216,592	2,32
2,4	216,992	2,72
2,5	217,092	2,82
2,7	217,292	3,02

Caractéristiques du bassin versant

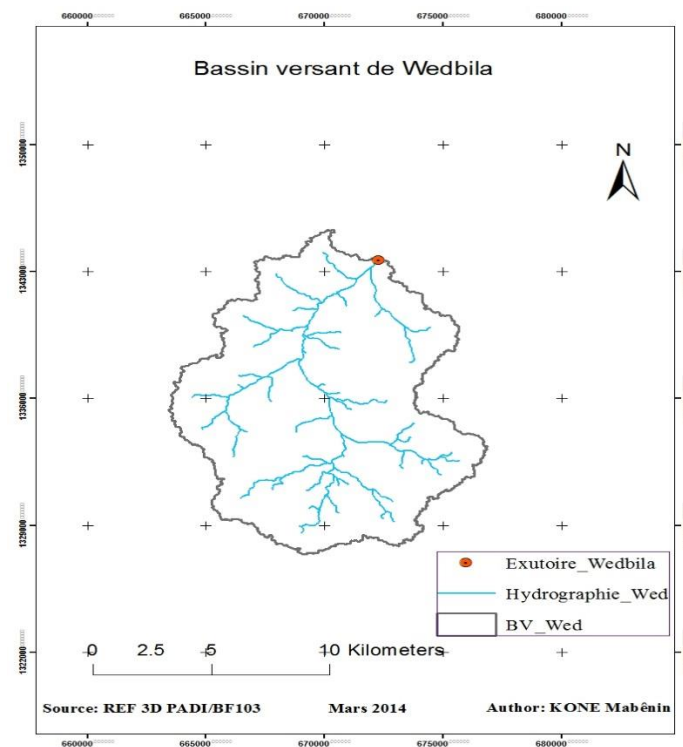


Figure 35: Bassin versant de Wedbila

Tableau 11: Caractéristiques du BV de Wedbila

Superficie (km ²)	Périmètre (km)	K _G	L(km)	ℓ (km)	I _g (m/km)	D _d (km/km ²)	Pente longitudinale (m/km)	Pente transversale (m/km)
149,33	88,62	2,03	40,63	3,68	1,23	0,53	2,4	10

Le coefficient de Gravelius K_G est de 2.03 et indique que notre bassin versant est allongé.

En se référant à la **figure 8**, le bassin versant réduit à la nouvelle station a les caractéristiques suivantes énumérées dans le **tableau 12**.

Tableau 12: Caractéristiques bv Wed New

Igcor	S	Pm10	Kr10	Dd
5	124,13	67	35	0,52

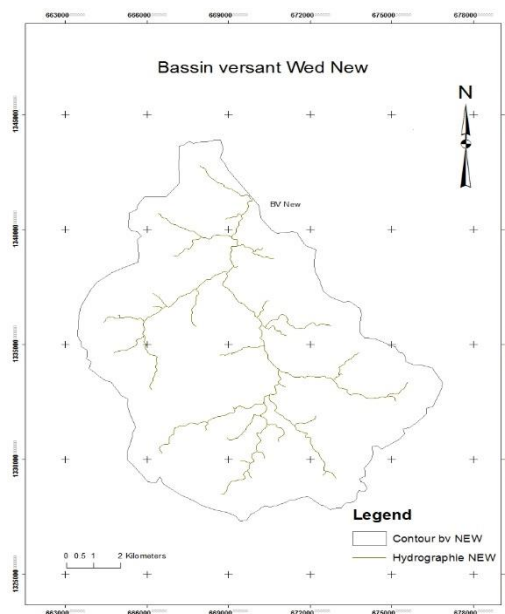


Figure 36: Bassin versant réduit à Wed New

Pour ne pas choisir des valeurs de débits de façon aléatoire et comme nous ne savons pas la période de retour de l'évènement pluvieux qui a fourni nos données de jaugeage, nous avons entrepris d'utiliser les caractéristiques du bassin versant réduit. Ces caractéristiques nous ont permis d'obtenir les valeurs de débits pour différentes périodes de retour.

Régime d'écoulement

C'est sous le régime permanent que nous avons conduit ces simulations. il est fortement recommandé de les conduire en régime transitoire (DE-GOUTTE, 2014). Cela nécessite d'entrer des hydrogrammes et nous n'en disposons pas.

Débits considérés

Ils sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 13: Débits suivant les équations de la méthode CIEH

Num, Equation	Q10	Q3m	Q6m	Q1an	Q2ans	Q5	Q20	Q50	Q100
2	90	21,58	30,57	40,47	51,26	71,94	112,41	143,88	180
5	98	23,60	33,43	44,24	56,04	78,65	122,89	157,30	197
10	11	2,66	3,76	4,98	6,31	8,86	13,84	17,71	22
12	162	38,98	55,22	73,08	92,57	129,93	203,01	259,85	325
18	162	38,87	55,07	72,89	92,33	129,58	202,47	259,16	324
26	127	30,46	43,15	57,11	72,34	101,53	158,64	203,05	254
40	89	21,38	30,29	40,09	50,78	71,27	111,36	142,54	178

Tableau 14: Résultat T= 3mois

Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W,S, Elev (m)	E,G, Elev (m)	E,G, Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl	Hauteur corres- pondante
21,58	217,74	218,1	218,12	0,004053	0,28	41,08	223,88	0,21	3,188
23,6	217,74	218,11	218,13	0,003968	0,29	43,92	224,88	0,21	3,198
2,66	217,74	217,86	217,87	0,00395	0,13	7,1	72,76	0,17	2,948
38,98	217,74	218,2	218,22	0,003422	0,34	64,04	232,22	0,2	3,288
38,87	217,74	218,2	218,22	0,003426	0,34	63,9	232,16	0,2	3,288
30,46	217,74	218,15	218,18	0,003695	0,31	53,17	227,66	0,2	3,238
21,38	217,74	218,1	218,12	0,004052	0,28	40,79	223,12	0,2	3,188

Tableau 15: Résultat T= 6mois

Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W,S, Elev (m)	E,G, Elev (m)	E,G, Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl	Hauteur corres- pondante
30,57	217,74	218,15	218,18	0,003691	0,31	53,31	227,7	0,2	3,238
33,43	217,74	218,17	218,19	0,003591	0,32	57	228,8	0,2	3,258
3,76	217,74	217,89	217,9	0,004012	0,15	9,45	85,28	0,18	2,978
55,22	217,74	218,28	218,31	0,003024	0,38	83,68	241,52	0,2	3,368
55,07	217,74	218,28	218,31	0,003031	0,38	83,46	241,42	0,2	3,368
43,15	217,74	218,22	218,25	0,003306	0,35	69,21	234,71	0,2	3,308
30,29	217,74	218,15	218,17	0,003702	0,31	52,94	227,59	0,2	3,238

Les hauteurs de sorties sont très supérieures aux hauteurs que nous cherchons à atteindre. Les débits étant croissants à mesure que le temps de retour augmente, nous nous sommes limité à ces deux cas et conclure qu'on ne pourrait pas obtenir les débits pour les basses eaux, dans l'état actuel de nos données.

Nous avons effectué l'opération inverse c'est-à-dire caler à WED New et valider à WED Old. Vu que la topographie n'est pas de bonne qualité à ce niveau, nous avons omis de présenter ici les résultats de cette phase et ne pas en tenir compte.

IV.5. Utilisation du REF 3D

Utilisation de HEC-GeoRAS et REF 3D

HEC-GeoRAS est la composante spatiale de HEC-RAS. Son utilisation nécessite :

- **Un modèle numérique de terrain en format TIN⁶**
- **Une photographie aérienne** : la procédure d'acquisition a été développée par (Tate and Olivera 1999)
- Les données d'occupations du sol pour la détermination des coefficients de rugosité de Manning

Le modèle numérique que nous avons est en format image. Nous arrivons à l'ouvrir. N'ayant pas pu le convertir en TIN nous n'avons pas pu effectuer de traitement malgré les multiples tentatives et consultations que nous avons effectués.

⁶ TIN: Triangular Irregular Network

V. CONCLUSION

Bien que l'extrapolation « vers le bas » de courbe de tarage en rivières naturelles soit une opération très délicate, nous nous y sommes essayés et appliqués avec l'affluent principal de la retenue de Wedbila à Koubri. L'utilisation d'un modèle hydraulique 1D s'est avérée suffisante pour la conduite de nos travaux. Cependant, la qualité de nos données a eu raison de nous et ne nous a pas permis d'atteindre notre objectif d'extrapolation.

Les paramètres à prendre en compte dans le processus de calage sont les coefficients de rugosité n de Manning. Leur définition tient des cultures, la densité des herbes et des arbres. Le modèle hydraulique que nous avons utilisé, HEC-RAS, est bien adapté aux conditions locales dans la mesure où il a pu être calé et validé. La qualité des données d'entrées ne nous ont pas permis de valider notre modèle hydraulique pour juger de sa performance à travers l'utilisation d'un modèle numérique de terrain. Cela requiert d'autres données supplémentaires à savoir l'occupation des terres, photo aérienne...

Des trois hypothèses que nous avons formulées, les deux premières sont confirmées excepté la troisième que nous n'avons pas pu vérifier avec les données que nous avons présentement :

- ✓ **Un modèle adapté aux conditions locales existe bien**, en l'occurrence HEC-RAS qui a été calé puis validé bien que l'extrapolation « vers le bas » n'ait pu se faire.
- ✓ **L'entendue des données disponibles influence le modèle** en ce sens qu'avec un nombre plus élevé de jaugeages réalisés, le RMSE serait d'avantage meilleur (proche de zéro).
- **La pertinence des réponses que l'on peut apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin versant relativement aux objectifs fixés.** Pour cette hypothèse nous ne pouvons pas nous prononcer du fait que les enregistrements des pluviographes installés sur le bassin versant n'ont pu être utilisés pour la reconstitution des débits à comparer avec les sorties du modèle.

VI. RECOMMANDATIONS/PERSPECTIVES

Nous faisons les recommandations suivantes à savoir :

Effectuer des jaugeages en basses eaux pour conduire aux mieux l'extrapolation vers le bas. De même que des jaugeages supplémentaires en hautes eaux afin de réduire au mieux les valeurs du RMSE.

Acquérir des photos aériennes du bassin versant de même qu'un modèle numérique au format TIN.

Vue la difficulté d'acquérir des photographies aériennes de par leur mode d'acquisition complexe, nous recommandons de beaucoup insister sur les levés de terrain. Il faudrait être très méticuleux quant à la conduite des levés topographiques au vu de leur importance pour les modèles hydrauliques.

Etablir des hydrogrammes afin de conduire la simulation en écoulement non permanent.

Vu que HEC-RAS traite aussi le transport des sédiments, il serait intéressant de conduire des simulations dans ce sens afin de quantifier les apports sédimentaires provenant du bassin versant. Les fosses de piégeages de sédiments pourraient servir lors des investigations.

Inclure la modélisation hydraulique sous logiciel notamment, dans la formation des ingénieurs Génie Civil et Infrastructures Hydraulique au 2iE. Cela pourrait se faire avec HEC-RAS et concernerait les ingénieurs en GC, IRH et EAU ASSAINISSEMENT.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEI(Burea d'Etude Industrielle). 2014. "Modélisation Numérique.pdf." <http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/2079>.
- Brunner, Gary W. 2010. "HEC-RAS v4.1 Reference Manual.pdf." http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/downloads/HEC-RAS_41_Setup.exe.
- CEMAGREF. 2009. "Construction des courbes de tarage." http://www.observatoire-eau-martinique.fr/les-outils/base-documentaire/construction-des-courbes-de-tarage-site-atelier-de-la-baie-du-robert/at_download/file.
- CRES, F N. 2011. "MODELISATION Introduction aux équations aux dérivées partielles et à leurs résolutions numériques."
- CRES, François-Noël. 2001. "Hydrologie urbaine quantitative sep.2001.pdf."
- DEGOUTTE, G. 2014. "CHAPITRE 1- AIDE MEMOIRE EN HYDRAULIQUE FLUVIALE."
- Dr. KamaledinELsidig Bashar, Dr. Basim Hussein Khudair, and M.Sc. Ghassankhalaf Khalid. 2014. "Inundation Map Development by Using Hec-Ras Hydraulic Simulation Modeling From Roseires to Khartoum Cities" 3 (September): 5.
- École de technologie supérieure. 2009. "Guide de laboratoire : Exemple pour la rivière du Loup." <https://cours.etsmtl.ca/ctn762/Documents/CTN-762%20GuideHEC-RAS%20-%20H2009.pdf>.
- FAO. 1996. *Crues et apports: manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- GUINOT. 2003. "VGuinot.pdf." <http://perso.ens-lyon.fr/nathalie.revol/ED/VGuinot.pdf>.
- Honorat, Marc, Joël Marin, Jérôme Monnier, and Xijun Lai. 2007. "DassFlow v1.0: A Variational Data Assimilation Software for 2D River Flows". Rapport de Recherche 0123456789. Unité de recherche INRIA Rhône-Alpes 655, avenue de l'Europe, 38334 Montbonnot Saint Ismier (France): INRIA. http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/13/74/47/PDF/RR_Dass-flowV2.pdf.
- Lang, Michel, Karine Pobanz, Benjamin Renard, Elodie Renouf, and Eric Sauquet. 2010. "Extrapolation of Rating Curves by Hydraulic Modelling, with Application to Flood Frequency Analysis." *Hydrological Sciences Journal* 55 (6): 883–98. doi:10.1080/02626667.2010.504186.
- LERAT, Julien. 2009. "Quels Apports Hydrologiques Pour Les Modèles Hydrauliques ? Vers Un Modèle Intégré de Simulation Des Crues."
- Malaterre, Pierre-Olivier, Jean-Pierre Baume, Nelly Jean-Baptiste, and Jacques Sau. 2011. "Analyse Pour Le Calage de Modèles Hydrauliques À Surface Libre : Une Approche Par Les Théories Des Systèmes Linéaires et de L'automatique." *La Houille Blanche*, no. 3 (June): 63–68. doi:10.1051/lhb/2011034.
- MOUNIROU, L. A., C. LAROCHE, A. L. MAR, J. E. PATUREL, G. MAHE, A. DEZETTER, and E. SERVAT. 2005. "Application du modèle GR2M sur les basins tropicaux : Recherche de l'information hydrométrique minimale pour une estimation raisonnable de ses paramètres.", 4.
- Nania, Leonardo S., and Emilio Molero. 2007. "04_10_07_ManualB_sico_HEC-RAS313_HEC-GeoRAS311_Espa_ol.pdf." : http://www.urbanismogranada.com/administrador/archivos/04_10_07_ManualB_sico_HEC-RAS313_HEC-GeoRAS311_Espa_ol.pdf.
- Parhi, Prabeer Kumar. 2013. "HEC-RAS Model for Mannig's Roughness: A Case Study." *Open Journal of Modern Hydrology* 03 (03): 97–101. doi:10.4236/ojmh.2013.33013.
- Parhi, Prabeer Kumar, R. N. Sankhua, and G. P. Roy. 2012. "Calibration of Channel Roughness for Mahanadi River, (India) Using HEC-RAS Model." *Journal of Water Resource and Protection* 04 (10): 847–50. doi:10.4236/jwarp.2012.410098.

- SAFEGE. 2012. "Modélisation hydraulique." http://www.labassee-expertisehydraulique.fr/wp-content/files_mf/complementmodelehydraulique4jan2012v2.pdf.
- STARON, Marie-Gabrielle. 2006. "Modélisation hydraulique et Cartographie de zones inondées sur la Somme." <http://www.sisyphe.upmc.fr/~m2hh/arch/memoires2006/Staron2006.pdf>.
- Tabyaoui, H., F. El Hammichi, M. A. Er-Rguiouag, and A. Lahrach. 2014. "HYDRAULIC MODELING USING HEC-RAS AND GIS, APPLICATION TO OUED INAOUEN (TAZA, NORTHERN MOROCCO)." Accessed April 28. geomat-icsksa.com/GTC2011/S3/PDF/13.pdf.
- Tate, Eric Christopher, and Francisco Olivera. 1999. "Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcView GIS." <http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>.
- Timbadiya, Prafulkumar V., Prem Lal Patel, and D. Porey Prakash. 2011. "Calibration of HEC-RAS Model on Prediction of Flood for Lower Tapi River, India." *Journal of Water Resource and Protection* 03 (11): 805–11. doi:10.4236/jwarp.2011.311090.
- Wikhydro. 2015. "Courbe de tarage : extrapolation par modélisation 1D et cartographie par couplage SIG." http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php?title=Courbe_de_tarage:_extrapolation_par_mod%C3%A9lisation_1D_et_cartographie_par_couplage_SIG&oldid=14985.
- WMO / OMM, FFEM, IRD, and 2iE. 2007. "PROJET VOLTA-HYCOS SEMINAIRE DE FORMATION SUR LES COURBES DE TARAGE." http://www.whycos.org/whycos/sites/default/files/public/pdf/training-material/manuel_courbe_etalonage_fr.pdf.
- Mérino, M. (2008, Décembre 10). *Note de la FRS*. Consulté le 2014 Mai, sur Fondation pour la Recherche Stratégique: <https://www.frstrategie.org/barreFRS/publications/notes/2008/20081210.pdf>
- APEFE. (s.d.). Consulté le 08 11, 2014, sur Educaid.be: <http://www.educaid.be/fr/content/apefe>
- CEREMA. (2012, Janvier 10). *Présentation du logiciel*. Consulté le Mai 21, 2014, sur <http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/presentation-du-logiciel-a865.html>
- DAI. (2013). *APPORTS ET PRINCIPES D'UTILISATION DES OUTILS HEC, HEC-HMS ET HEC-RAS, PLATEFORME D'INTEGRATION WMS ET OUTIL RIBASIM*. MEC DOCUMENT 137fr, Souissi. Consulté le 2014, sur http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00K1HG.pdf
- DIENG, M. (2011, Janvier). L'eau en Afrique, les paradoxes d'une ressource convoitée. *ict4d article*, p. 1. Consulté le Mai 30, 2014, sur http://www.idrc.ca/Documents/ICT4D_article_water_dieng_FR.pdf
- ENSEEIH. (s.d.). *Le logiciel SIC*. Consulté le Novembre 29, 2014, sur <http://hmf.enseeih.fr/travaux/CD9899/travaux/optsee/bei/g3av3/g3pj3/prezesic.htm>
- ENSEEIH. (s.d.). *Présentation des logiciels*. Consulté le Novembre 29, 2014, sur <http://hmf.enseeih.fr/travaux/CD9900/travaux/optsee/bei/g12/logiciel.htm>
- INPT-ENSEEIH. (s.d.). *Hydraulique et Mécanique des Fluides*. Consulté le Novembre 19, 2014, sur hmf.enseeih.fr: <http://hmf.enseeih.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/1577>
- JSTI. (s.d.). Consulté le Avril 14, 2014, sur APEFE: <https://www.apefe.org/programmation/20-burkina-faso/452-jsti>
- Malaterre, P. (s.d.). *SIC 5.27*. Consulté le Mai 21, 2014, sur <http://www.canari.free.fr/sic/sicfr.htm>
- ODE. (2012). Ouagadougou. Consulté le Mars 10, 2014
- PROJET N°92 WEDBILA. (s.d.). Consulté le 01 20, 2014, sur Eau Sans Frontières: http://www.eau-sans-frontieres.org/index.php?page=aff_projet&id=40&
- Recherche scientifique et innovation*. (s.d.). Consulté le 08 11, 2014, sur <http://www.wbi.be/fr/innovationfrancophone>

ANNEXES

Annexe 1: Fosse de piégeage de sédiments.....	A
Annexe 2: WED2 érodé	B
Annexe 3: Affleurement de la roche mère_WED2.....	C
Annexe 4: Griffes d'érosion sur WED2	D
Annexe 5: Exemples de transects réalisés à Wed Old	E
Annexe 6: Transects réalisés à Wed New	F
Annexe 7: Coefficient de rugosité de Manning pour canaux naturels et plaines inondables.....	G
Annexe 8: Table de rugosité issue du Bulletin 54 de la FAO	H
Annexe 9: Choix des coefficients d'expansion/contraction sous HEC-RAS	I
Annexe 10: Valeurs de coefficient de rugosité n.....	J
Annexe 11: Etape à suivre dans le processus de calage en régime transitoire	K

✚ Affluent principal (WED1)

Annexe 1: Fosse de piegeage de sediments



✚ Affluent secondaire (WED2)

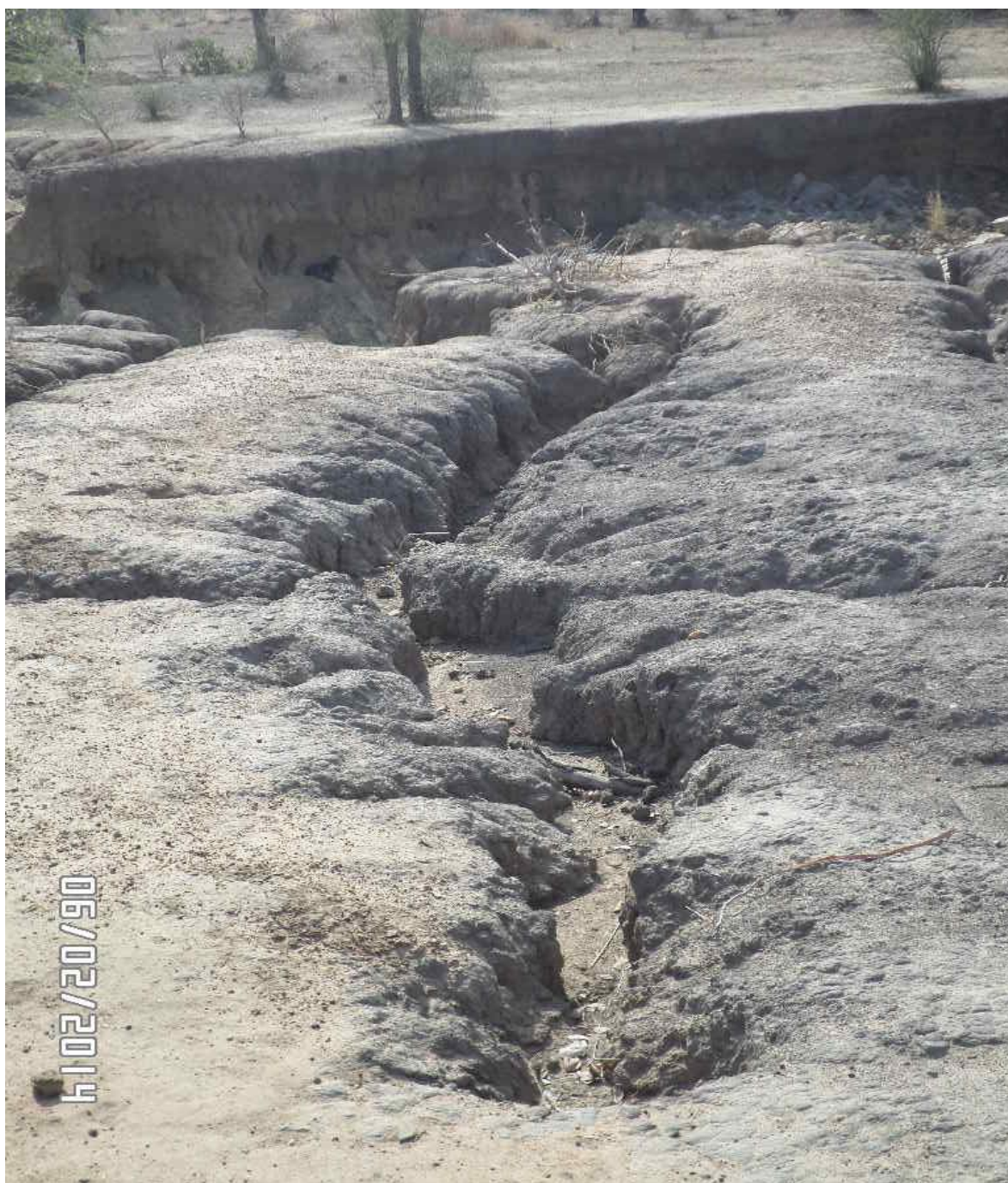
Annexe 2: WED2 érodé



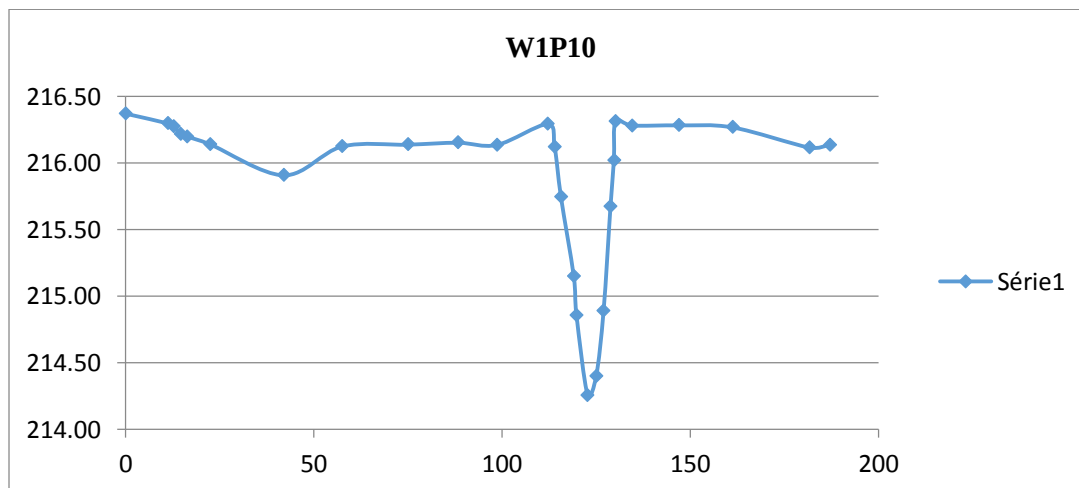
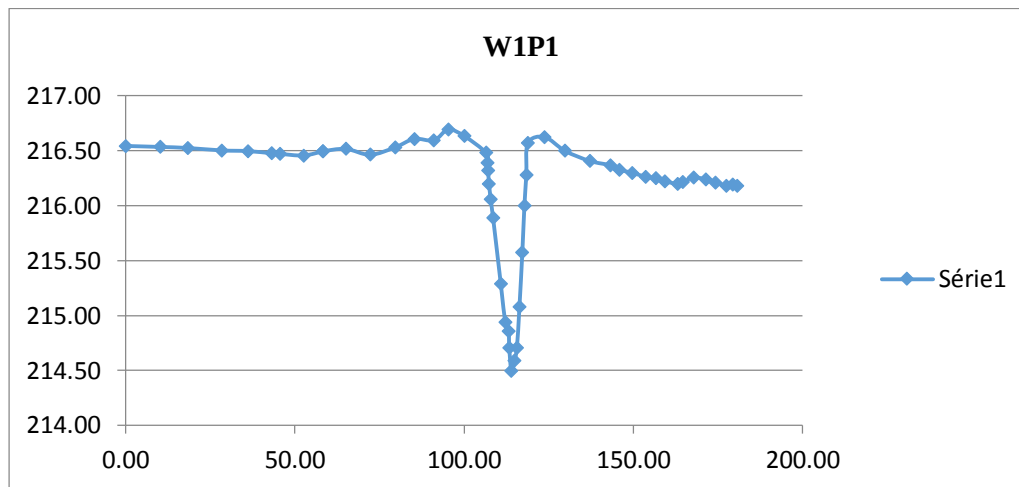
Annexe 3: Affleurement de la roche mère_WED2



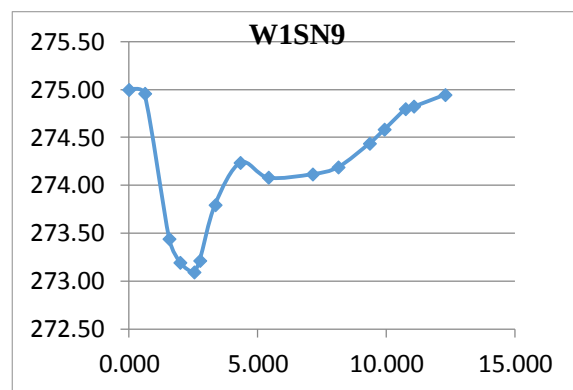
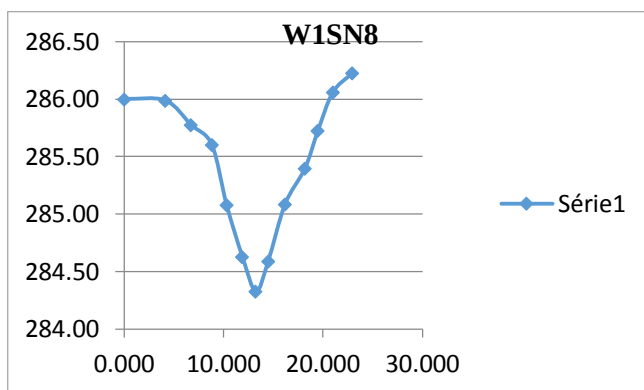
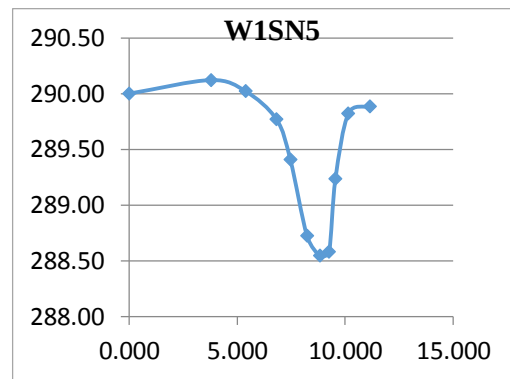
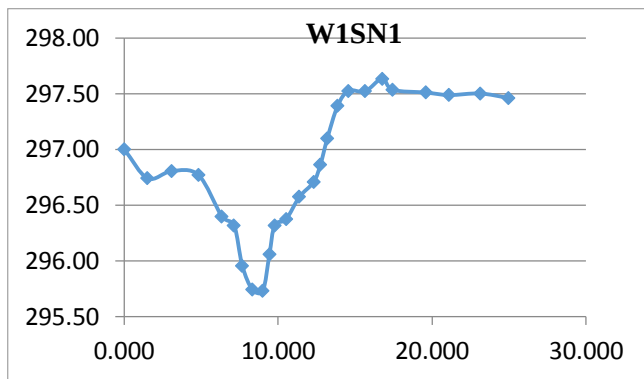
Annexe 4: Griffes d'érosion sur WED2



Annexe 5: Exemples de transects réalisés à Wed Old



Annexe 6: Transects réalisés à Wed New



Annexe 7: Coefficient de rugosité de Manning⁷ pour canaux naturels et plaines inondables

Type of Channel and Description		Minimum	Normal	Maximum
<i>A. Natural Streams</i>				
1. Main Channels				
a.	Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b.	Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c.	Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d.	Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e.	Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f.	Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g.	Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h.	Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. Flood Plains				
a.	Pasture no brush	0.025	0.030	0.035
1.	Short grass	0.030	0.035	0.050
2.	High grass			
b.	Cultivated areas			
1.	No crop	0.020	0.030	0.040
2.	Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3.	Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c.	Brush			
1.	Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2.	Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3.	Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4.	Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5.	Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d.	Trees			
1.	Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2.	Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3.	Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4.	Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5.	Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200

⁷ "Open Channel Hydraulics" (Chow V. T., (1959) McGraw-Hill Book Company, NY)

Annexe 8: Table de rugosité issue du Bulletin 54 de la FAO

Type de cours d'eau	Coefficient n
Lit taillé dans la roche :	
1 lisse et uniforme	0,025-0,040
2 déchiqueté et irrégulier	0,035-0,050
Lit constitué de matériaux fins :	
1 propre sans végétation	0,018-0,025
2 avec une herbe courte	0,025-0,033
3 avec une herbe haute	0,030-0,050
Lit constitué de matériaux grossiers :	
1 graviers 4- 8 mm	0,019-0,020
2 graviers 8- 20 mm	0,020-0,022
3 graviers 20- 60 mm	0,022-0,027
4 cailloux et galets 60-110 mm	0,027-0,030
5 cailloux et galets 110-250 mm	0,030-0,035
6 grosses pierres (suivant la taille)	0,035-0,070
Berges et/ou lit majeur avec :	
1 herbes ou cultures basses (suivant la densité)	0,030-0,050
2 broussailles (suivant la densité)	0,050-0,100
3 arbres (suivant la densité)	0,075-0,100

Annexe 9: Choix des coefficients d'expansion/contraction sous HEC-RAS

Subcritical Flow Contraction and Expansion Coefficients

	Contraction	Expansion
No transition loss computed	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Typical Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

The maximum value for the contraction and expansion coefficient is one (1.0). **In general, the empirical contraction and expansion coefficients should be lower for supercritical flow.** In supercritical flow the velocity heads are much greater, and small changes in depth can cause large changes in velocity head. Using contraction and expansion coefficients that would be typical for subcritical flow can result in over estimation of the energy losses and oscillations in the computed water surface profile. In constructed trapezoidal and rectangular channels, designed for supercritical flow, the user should set the contraction and expansion coefficients to zero in the reaches where the cross sectional geometry is not changing shape. In reaches where the flow is contracting and expanding, the user should select contraction and expansion coefficients carefully. Typical values for gradual transitions in supercritical flow would be around 0.05 for the contraction coefficient and 0.10 for the expansion coefficient. As the natural transitions begin to become more abrupt, it may be necessary to use higher values, such as 0.1 for the contraction coefficient and 0.2 for the expansion coefficient. If there is no contraction or expansion, the user may want to set the coefficients to zero for supercritical flow.

Annexe 10: Valeurs de coefficient de rugosité n⁸

Type de cours d'eau	Coefficient <i>n</i>
Lit taillé dans la roche :	
1 lisse et uniforme	0,025-0,040
2 déchiqueté et irrégulier	0,035-0,050
Lit constitué de matériaux fins :	
1 propre sans végétation	0,018-0,025
2 avec une herbe courte	0,025-0,033
3 avec une herbe haute	0,030-0,050
Lit constitué de matériaux grossiers :	
1 graviers 4- 8 mm	0,019-0,020
2 graviers 8- 20 mm	0,020-0,022
3 graviers 20- 60 mm	0,022-0,027
4 cailloux et galets 60-110 mm	0,027-0,030
5 cailloux et galets 110-250 mm	0,030-0,035
6 grosses pierres (suivant la taille)	0,035-0,070
Berges et/ou lit majeur avec :	
1 herbes ou cultures basses (suivant la densité)	0,030-0,050
2 broussailles (suivant la densité)	0,050-0,100
3 arbres (suivant la densité)	0,075-0,100

⁸ Source : BULLETIN FAO N° 54

Annexe 11: Etape à suivre dans le processus de calage en régime transitoire⁹

Steps To Follow in the Calibration Process

The following is a general list of steps to follow when calibrating an unsteady flow model:

1. Run a range of discharges in the Steady-Flow mode (if possible), and calibrate n values to established rating curves at gages and known high water marks.
2. Select specific events to run in unsteady flow mode. Ensure each event encompasses the full range of flows from low to high and back to low flow.
3. Adjust storage and lateral weirs to get good reproduction of flow hydrographs (Concentrate on timing, peak flow, volume, and shape).
4. Adjust Manning's n values to reproduce stage hydrographs.
5. Fine tune calibration for low to high stages by using "Discharge-Roughness Factors" where and when appropriate.
6. Further refine calibration for long-term modeling (period of record analysis) with "Seasonal Roughness Factors" where and when appropriate.
7. Verify the model calibration by running other flow events or long term periods that were not used in the calibration.
8. If further adjustment is deemed necessary from verification runs, make adjustments and re-run all events (calibration and verification events).

⁹ Source : HEC-RAS's user's manual