

Calibration et validation d'un modèle hydraulique en milieu de mangrove en Guinée-Con

Auteur : Moyaux, Vyckie

Promoteur(s) : Degré, Aurore; Archambeau, Pierre

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10801>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

CALIBRATION ET VALIDATION D'UN MODÈLE HYDRAULIQUE EN MILIEU DE MANGROVE EN GUINÉE-CONAKRY

VYCKIE MOYAUX

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

CO-PROMOTEURS : ARCHAMBEAU PIERRE, DEGRÉ AURORE

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique³ de Gembloux Agro-Bio Tech

Le présent document n'engage que son auteur.

CALIBRATION ET VALIDATION D'UN MODÈLE HYDRAULIQUE EN MILIEU DE MANGROVE EN GUINÉE-CONAKRY

VYCKIE MOYAUX

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2019-2020

CO-PROMOTEURS : ARCHAMBEAU PIERRE, DEGRÉ AURORE

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier l'entreprise SHER Ingénieurs-Conseils pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce travail de fin d'étude et, plus particulièrement, Manon Tuerlinckx de m'avoir aidé tant sur le terrain que pendant la modélisation et la rédaction et d'avoir toujours été présente pour répondre à mes questions.

Je remercie ensuite mes co-promoteurs, Aurore Degré, pour son efficacité et ses conseils avisés dans la rédaction de ce travail, et Pierre Archambeau, pour ses nombreuses explications et conseils sur la modélisation hydraulique.

Je remercie ensuite les autres membres de SHER en Belgique, Damien, Nicolas, Menad et Vincent pour leur écoute, les réunions et les discussions intéressantes qui ont suivis. Mais également les membres de SHER en Guinée, Jean-Pierre pour son hospitalité, sa bonne humeur et ses nombreux médicaments, Diao pour sa conduite exemplaire et Boyé pour son amabilité et sa cuisine réconfortante.

Pour mon travail de terrain, je tiens à remettre un tout grand merci, à Fadiga pour ses nombreuses explications, son ouverture d'esprit, son accueil, sa sympathie et également de m'avoir appris le sousou, ainsi qu'à toute sa famille pour leur accueil dans le village de Mamiah.

Je remercie également le Fond de Mobilité Uliège et le PACODEL de m'avoir permis de partir réaliser mon travail de terrain et plus particulièrement, Valérie Voyeux pour son aide et sa gentillesse dans toutes les démarches.

Enfin à titre personnel, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont fait de ces cinq années d'étude, cinq années formidables. Je pense particulièrement au grandissime Kot Blokker qui a, chaque année, accueilli la crème de la crème de Gembloux et particulièrement les habitants (et squatteurs) de cette année 2019-2020 qui m'ont offert un quadrimestre plein d'ambiance, de séries, de rires, de chants, de rallye et d'amour. Vous avez été bien plus que de simples cocokotteurs.

Je tiens également à remercier la bande de gais lurons du GB d'avoir été là du début à la fin de ces études et qui, j'en suis sûre, seront là pour encore de nombreuses années.

Merci à notre classe de Master STE pour ces cours partagé et surtout ces interours remplis de discussions parfois intéressantes, parfois débiles mais toujours pleine de bonne ambiance. Ce fut un plaisir !

Je remercie également tous les gens qui ont participé ou organisé les nombreuses activités auxquelles j'ai participé dans le cadre de l'AG. Je n'en garderai que de bons souvenirs.

Merci aux pionniers du relais Into The Wild qui m'ont offert quinze jours de pauses pleins de folie et de rires et qui m'ont également permis d'avoir à nouveau quatre ans et demi dans ma tête, ce dont j'avais grandement besoin.

Last but not least, je tiens à remercier le coronavirus de m'avoir enfermé chez moi pendant six mois et de m'avoir permis de me rendre compte à quel point ma famille est cool de supporter mes sautes d'humeur, de m'encourager, de me faire à manger et de me soutenir depuis tout ce temps. Vous êtes parfaits les amigos.

Résumé

Les rizicultures de mangroves sont des cultures littorales typiques de l'Afrique de l'ouest. Elles ont pour particularité d'admettre l'eau de mer en leur sein grâce aux forces des marées d'équinoxe lors de la saison sèche. Pendant deux semaines, l'eau est accumulée car elle permet de fertiliser le sol grâce aux limons marins et, en même temps, elle élimine les mauvaises herbes grâce au sel et à l'asphyxie du sol. Ces cultures nécessitent donc un ouvrage capable d'accumuler l'eau de mer mais également de réguler l'eau douce lors de la saison de culture. Le dimensionnement de ces ouvrages régulateurs peut se réaliser grâce à la modélisation hydraulique qui permet, par la suite, de prédire le remplissage de la plaine selon la marée entrante. Un modèle a d'abord été créé sur le logiciel HEC-RAS pour réaliser une simulation d'écoulement unidimensionnel et a été calibré pour les paramètres de Manning ($n = 0,0216$), les coefficients d'entrée ($k_{in} = 0,5$ pour les conduits rectangulaires et $0,85$ pour les conduits circulaires) et de sortie ($k_{ex} = 1$) des ouvrages régulateurs et du coefficient de déversement de structure latérale ($Cd = 0,4$). Le modèle a été validé sur la même plaine avec une autre phase de remplissage. Le modèle calibré a ensuite été adapté pour réaliser un écoulement bidimensionnel. Cela n'a pas apporté de précision supplémentaire par rapport à la modélisation unidimensionnelle. Finalement, deux scénarios d'aménagement de rizières ont été testés : un consistant à changer les dimensions de l'ouvrage régulateur et le second à réaménager la gestion de l'eau à la parcelle.

Ce travail a montré le fonctionnement d'HEC-RAS et l'impact des différentes structures et paramètres et a également présenté les possibilités d'utilisation dans le cadre d'un aménagement hydro-agricole en riziculture de mangrove.

Mots clés : Modélisation hydraulique, HEC-RAS, riziculture de mangrove, calibration

Abstract

Mangrove rice is a typical coastal crop in West Africa. They have the particularity of admitting sea water into their midst thanks to the forces of the equinox tides during the dry season. For two weeks, the water is accumulated in the plain because it fertilizes the soil thanks to the marine silt and, at the same time, it eliminates weeds thanks to the salt and asphyxiation of the soil. These crops therefore require a structure capable of accumulating sea water but also of regulating rainwater during the growing season. The dimensioning of these regulating structures can be carried out thanks to hydraulic modeling which makes it possible to predict the filling of the plain according to the incoming tide. A one-dimensional model was first created on the HEC-RAS software and was calibrated for Manning's parameters ($n = 0.0216$), the inlet ($k_{in} = 0.5$ for rectangular pipes and 0.85 for circular pipes) and outlet ($k_{ex} = 1$) coefficients of the control structures and the lateral structure overflow coefficient ($Cd = 0.4$). The model was then validated on the same plain with another filling phase. The calibrated model was then use in two dimensions. This don't bring any additional precision compared to the one-dimensional modeling. Finally, two rice field development scenarios were tested: one consisting in changing the dimensions of the regulating structure and the second in rearranging the water management on the plot.

This work showed the functioning of HEC-RAS and the impact of the different structures and parameters, and finally presented the possibilities for use in the framework of a hydro-agricultural development in mangrove rice cultivation.

Keywords: Hydraulic modelling, HEC-RAS, mangrove rice, calibration

Table des matières

Remerciement.....	4
Résumé	5
Abstract	5
Table des matières	1
Introduction	3
I. Contexte.....	3
II. La riziculture de mangrove.....	4
III. Modélisation hydraulique.....	7
IV. Objectifs	10
Matériel et méthode.....	12
I. Présentation de la zone d'étude	12
A. Historique	13
B. État et fonctionnement actuel	13
II. Travail sur le terrain	14
A. Mesure du niveau d'eau dans la plaine.....	14
B. Mesure topographique	16
C. Incertitude sur les mesures.....	17
III. Modélisation hydraulique sur HEC-RAS	18
A. Fonctionnement d'HEC-RAS.....	18
1. Régime transitoire unidimensionnel.....	19
2. Données géométriques	20
a) Topographie et géométrie des canaux	20
b) Aire de stockage	21
c) Structures latérales.....	21
d) Ouvrages régulateurs	22
B. Modèles créés	24
1. Modèle I : Drains complets sans structure latérale.....	24
2. Modèle II : Drains principaux avec structure latérale omniprésente.....	24
3. Modèle III : Drains principaux avec structures latérales réduites	25
C. Analyse de sensibilité	26
D. Calibration	28
E. Validation	28
F. Modélisation en deux dimensions.....	29
Résultats et Discussions	31
I. Accumulation de l'eau dans la plaine.....	31

II.	Modélisation.....	32
A.	Modèle I.....	32
B.	Modèle II	33
C.	Modèle III.....	34
D.	Impact des structures	36
III.	Analyse de sensibilité.....	37
IV.	Calibration.....	39
A.	Coefficient de Manning (n)	40
B.	Coefficient de sortie (k_{ex}).....	41
C.	Coefficient d'entrée (k_{in}).....	41
D.	Structure latérale (C_d).....	42
E.	Modèle calibré	42
V.	Validation	43
VI.	Modèle en deux dimensions	44
VII.	Application du logiciel HEC-RAS dans le cadre du projet SARITEM	46
A.	Dimensionnement de l'ouvrage principal.....	46
B.	Gestion de l'eau à la parcelle.....	48
	Conclusion.....	51
	Bibliographie.....	52

Introduction

I. Contexte

La Guinée, aussi appelée Guinée-Conakry, est un des pays d'Afrique de l'Ouest les plus riches en ressources naturelles. En effet, ce pays possède près de la moitié des ressources mondiales de bauxite (Makarova et al., 2019) et est également appelé « Le château d'eau de l'Afrique » grâce à sa pluviométrie abondante lors de la saison des pluies et à ses nombreux cours d'eau, sources de fleuves importants tel que le Niger. Cependant, en dépit de ces ressources abondantes, la Guinée reste un pays pauvre avec un développement économique faible (Banque Mondiale, April-27-2020a). Elle comporte près de douze millions d'habitants dont 60% de ceux-ci travaillent dans l'agriculture qui représentent 57% des revenus de la population (Banque Mondiale, April-27-2020b).

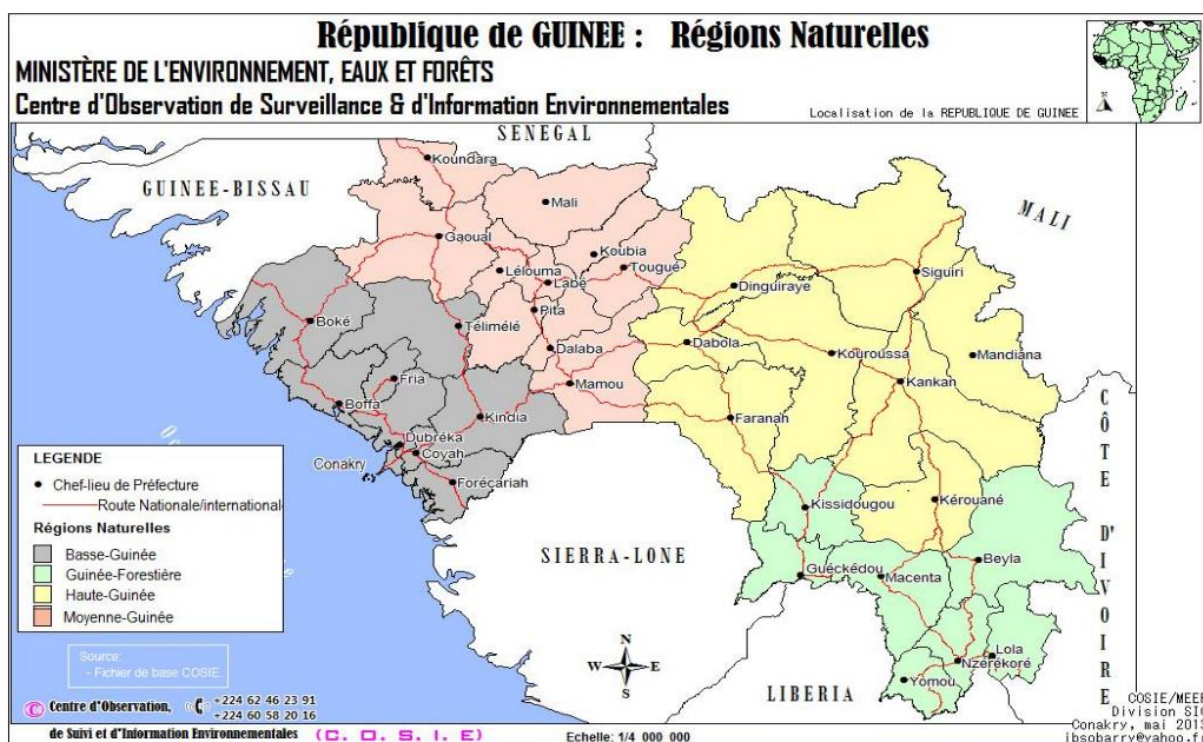


Figure 1 – Carte de la Guinée et de ses régions naturelles.

L'agriculture est donc une des activités économiques les plus importantes du pays et le riz est notamment une ressource alimentaire d'une importance capitale. Mondialement, il est l'aliment de base de plus de quatre milliards de personnes, soit plus de la moitié de la population totale et est produit à 90% en Asie (Trebuil et al., 2004). L'Afrique subsaharienne importe à elle seule un tiers des échanges mondiaux de riz (CIRAD, 2020). La production nationale arrivant rarement à combler les besoins de la population. La Guinée produit 1 800 000 tonnes de riz paddy, c'est-à-dire de riz non décortiqué, ce qui équivaut à environ un million de tonnes de riz blanc et elle importe un tiers de sa consommation avec 550 000 tonnes importée en 2018 (Ministère de l'Agriculture, 2018). L'amélioration de la riziculture au niveau des surfaces exploitées et des rendements est donc un point crucial pour le développement économique de la Guinée (Telliano, 2012).

Le gouvernement guinéen tente d'assurer la sécurité alimentaire de la population via sa Stratégie Nationale de Développement de la Riziculture (SNDR) en augmentant les rendements et les surfaces exploitables des plaines rizicoles (Telliano, 2012). Le projet SARITEM (Systèmes d'Activités Rizicoles en Territoires de Mangrove) s'inscrit dans cette stratégie et a pour but de contribuer au développement durable des rizicultures de mangrove qui permet d'intensifier la

productivité tout en préservant ces écosystèmes. Le projet développe une approche globale combinant un investissement public sur les ouvrages importants et un investissement privé par les usagers dans les aménagements. Il a pour objectif de mettre en place des aménagements durables via trois dimensions : sociale (organisation et entretien), économique (système de production et maintenance des ouvrages) et environnementale (gestion des eaux et stabilisation de la riziculture). Le projet SARITEM a commencé en 2018 et s'étend sur une durée de cinq ans. Il consiste, dans un premier temps, à restaurer et réaménager 4 200 hectares de périmètres rizicoles construits lors des projets précédents mais non finalisés ou détériorés. Dans un second temps, cinq nouvelles plaines encore non aménagées feront l'objet de travaux de gestion de l'eau à la parcelle et d'aménagement d'endiguement sur une superficie de 2364 hectares. Enfin, une extension des aménagements est prévue pour cinq périmètres sur une superficie de 1200 hectares.

Le bureau d'étude SHER (Société pour l'Hydraulique, l'Environnement et la Réhabilitation), basé à Namur et travaillant dans le monde entier, est en charge des études et des missions de contrôle des travaux du projet SARITEM. Ce travail de fin d'étude se réalise donc en collaboration avec cette entreprise afin d'éventuellement leur faciliter la mise en place de nouvelles plaines rizicoles ou la réhabilitation d'anciennes.

II. La riziculture de mangrove

Les plaines rizicoles peuvent être aménagées de deux manières différentes selon le régime hydrique (Trebuil et al., 2004). Soit comme riz dit « pluvial » lorsqu'il est cultivé dans des milieux non aquatiques soit comme riz « aquatique » lorsque, à l'inverse, la plantation est réalisée dans des rizières avec une lame d'eau. Cette deuxième pratique est la plus courante et se subdivise en plusieurs catégories : la riziculture irriguée, la riziculture inondée, la riziculture de submersion profonde et la riziculture de mangrove (Audebert et al., 2010). En Guinée, ces quatre types de riziculture sont couramment pratiqués (Yombouno et al., 2011) mais ce travail de fin d'étude est ciblé essentiellement sur le riz de mangrove aussi appelé riz de boue ou encore Bora Maalé en langue sousou. Ce dernier est cultivé dans les zones de mangroves en Guinée Maritime, aussi appelée Basse-Guinée, une des quatre régions naturelles de la Guinée (Figure 1), et représente environ 16% de la production nationale avec 330 000 tonnes de riz produites annuellement (Rey et al., 2017 ; Telliano, 2012).

La mangrove est souvent définie comme un arbre de la famille des Rhizophoracées caractérisé par des racines aériennes permettant des échanges de gaz avec l'atmosphère. On le retrouve principalement dans les zones intertidales entre la mer et la terre (Cormier-Salem, 1999). Le terme mangrove peut également se référer à l'écosystème de celui-ci où la faune et la flore spécifique à ces milieux sont prises en compte (Kathiresan et al., 2001).

La mangrove en tant qu'écosystème est un milieu complexe et changeant qui a la particularité de mêler l'eau douce et l'eau salée en son sein (Yombouno et al., 2011). La côte Guinéenne est caractérisée, lors de la saison pluvieuse, de juin à septembre, par de fortes précipitations pouvant atteindre jusqu'à 4000 mm et par une saison sèche très marquée d'octobre à mai. Les agriculteurs ont mis à profit ces conditions afin d'en faire une riziculture au fonctionnement particulier (Rossi et al., 2002). Ils commencent les pépinières de riz en saison des pluies de fin juillet à début août, pour ensuite les repiquer de fin août à début septembre. Le riz croît jusqu'à fin novembre, où il est récolté pendant deux à trois mois (Figure 2).

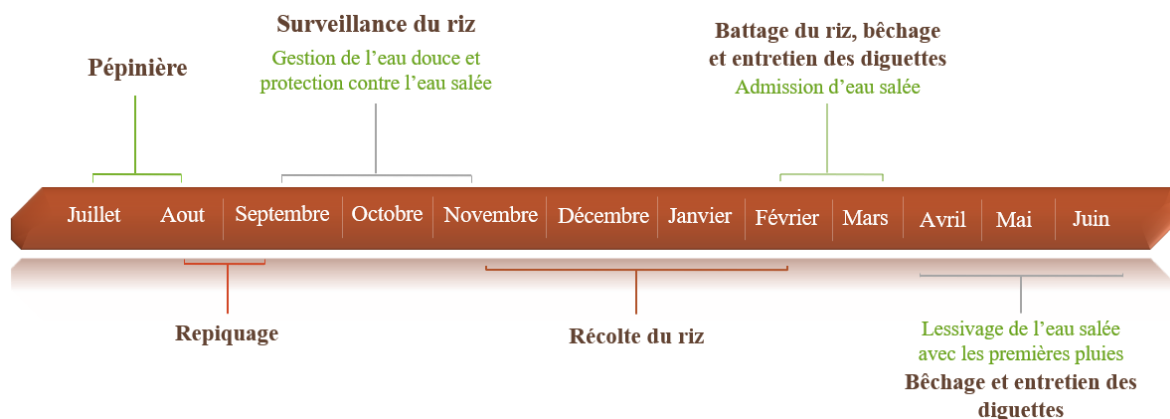


Figure 2 – Itinéraire technique du riz de mangrove et gestion de l'eau.

La saison sèche, après la récolte, est une période creuse dont les usagers profitent pour entretenir les canaux, faire les opérations de transformation du riz tel que le battage et, dans le cas de la culture de mangrove, faire entrer l'eau de mer au sein de la plaine. L'admission de l'eau de mer dans le site a lieu durant les grandes marées d'équinoxe de la mi-mars. L'eau salée entre dans le site et y reste bloquée pendant une dizaine de jours. Cette particularité de la riziculture de mangrove a plusieurs vertus. Elle permet d'éviter l'acidification des sols souvent causée par décomposition des palétuviers précédemment installés sur la plaine (Adout, 2001 ; Sow et al., 2003), elle apporte des éléments nutritifs grâce aux limons marins et sert d'herbicide afin de contrôler les adventices. Une fois le site vidangé, les travaux de désherbage reprennent et le site est lessivé du sel marin grâce aux premières pluies lors des mois de mai et juin. Ce riz a donc l'avantage de ne pas nécessiter d'autres intrants que l'eau de mer tout en apportant un rendement de 1,5 à 3,5 tonnes par hectare (Telliano, 2012).

Ce rendement dépend des pratiques culturales, de l'entretien des casiers et de l'efficacité de l'admission d'eau de mer. Plus cette dernière sera importante, plus la lame d'eau sur les terres sera grande et plus les mauvaises herbes seront asphyxiées et donc le désherbage efficace. La surface rizicole peut également être augmentée via l'admission d'eau de mer. En effet, plus l'eau entre dans la plaine, plus la superficie de sol fertilisée et nettoyée est importante.

La riziculture de mangrove nécessite donc des aménagements hydro-agricoles particuliers afin de réguler l'eau au sein de la plaine selon les saisons (Figure 3). D'abord, comme dit ci-dessus, les écosystèmes de mangroves sont situés sur des zones littorales et subissent régulièrement des submersions plus ou moins importantes d'eau salée dues aux marées. Il existe deux types de paysage de mangroves : d'une part, la mangrove de front de mer qui subit des inondations importantes lors de l'hivernage et nécessite donc des investissements importants pour sa protection face aux marées et, d'autre part, la mangrove estuarienne située plus loin de la côte et souvent caractérisée par un réseau hydrographique important (Sow et al., 2003). Dans les deux cas, si les inondations ne sont pas régulées, elles peuvent engendrer la destruction totale des récoltes.

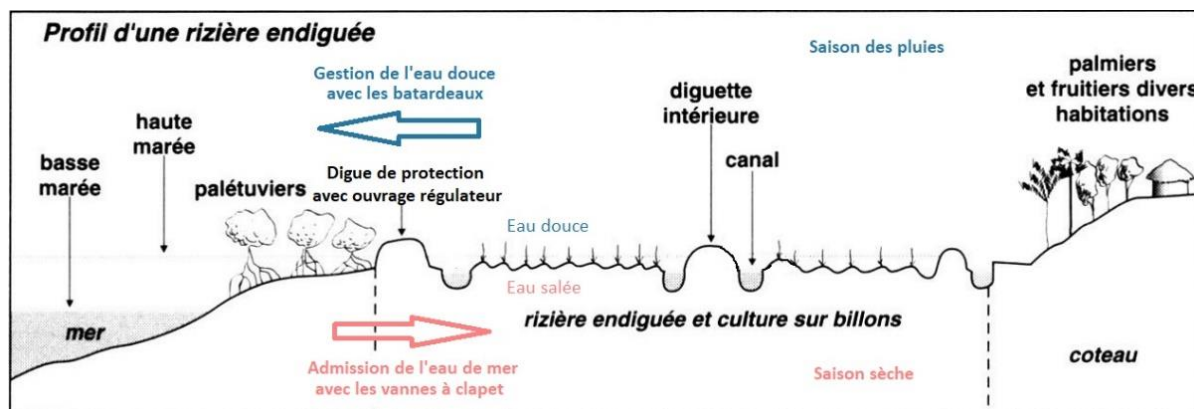


Figure 3 – Schéma de la gestion de l'eau dans un riziculture de mangrove (Source : Cormier-Salem, 1999)

En saison de culture, la gestion de l'eau douce est primordiale afin d'éviter toute sécheresse ou inondation. L'eau de pluie doit être retenue au sein des casiers pour maintenir une lame d'eau suffisante pour l'irrigation du riz. Cette lame d'eau douce ne doit cependant pas être excessive pour empêcher d'éventuelles remontées salines et éviter l'asphyxie du riz (Adout, 2001). En effet, une forte pluie combinée à une marée haute empêche l'eau de se drainer hors du site et peut inonder les parcelles. Il est donc primordial que l'eau puisse se drainer suffisamment vite pendant l'intervalle de temps de la marée basse afin d'éviter une lame d'eau excessive dans la plaine.

Au contraire, en saison sèche, les aménagements doivent permettre l'admission d'eau de mer et sa répartition dans la plaine via un réseau de canaux et de casiers. L'aménagement doit également permettre la gestion des excédents d'eau et, idéalement, intégrer une réserve d'eau en amont pour irriguer par gravité si nécessaire (Sow et al., 2003). Cette gestion de l'eau nécessite donc une régulation précise et des ouvrages adaptés. Pour ce faire, les sites de riziculture de mangrove sont généralement constitués de trois aménagements principaux :

- Les digues sont utilisées pour protéger la plaine des submersions d'eau de mer des marées. Selon les moyens disponibles, elles peuvent être mécanisées, c'est-à-dire compactées au moyen d'engins et recouvertes d'une couche de latérite qui édifiera des digues de protection durables dans le temps, ou mises en place par les usagers grâce à une compaction naturelle et manuelle de la terre appelée digue à Haute Intensité de Main d'œuvre (HIMO).
- Les ouvrages régulateurs doivent permettre d'admettre l'eau de mer et de la retenir au sein du site en hivernage ou, à l'inverse, de retenir l'eau de pluie dans la rizière et de réguler sa hauteur en saison de culture. Pour ce faire, une solution couramment utilisée en riziculture de mangrove est un ouvrage en béton inséré dans la digue de protection au niveau du lit irrigant naturellement la plaine. Il est composé d'un radier, de deux murs et deux ailes de protection contre l'affouillement soit en amont et aval soit seulement à l'une des deux extrémités (Figure 4). Cet ouvrage est traversé par un nombre de dalots dépendant des caractéristiques de la plaine et dont l'ouverture sera régulée par la combinaison de batardeaux et de vannes à clapet créées sur le principe du clapet anti-retour. Ces dernières sont souvent construites en bois solide et résistant à l'humidité et sont disposées telles des portes basculantes. Elles sont amovibles et peuvent être soit mises du côté mer de l'ouvrage en saison de cultures afin d'empêcher la marée d'entrer tout en permettant le drainage de la rizière, soit du côté plaine en saison sèche, où elles permettent à la mer d'entrer dans le site et l'empêchent de sortir. Les batardeaux, quant à eux, sont surtout utiles pour la régulation de la lame d'eau douce pendant la saison des pluies.
- Les drains assurent la gestion de l'eau au sein de la plaine. Ils permettent l'arrivée d'eau à chaque casier, un drainage rapide et également une admission d'eau de mer la plus efficace possible. Un réseau ramifié de drains permettra une gestion de l'eau à la parcelle grâce à l'utilisation de diguettes. Celles-ci permettent la régulation de l'eau au sein des casiers soit via un tube en PVC coudé permettant de gérer l'eau au sein du casier via la rotation du coude, soit par l'ouverture de brèches au sein des diguettes (Figure 5).



Figure 4 – Ouvrage régulateur et vanne à clapet.



Figure 5 – Drains irrigant un casier via une brèche creusée.

Le type d'aménagement choisi dépend principalement de la localisation du site, de la capacité des usagers à mobiliser du savoir-faire, de la main d'œuvre pour les travaux de maintenance (Doligez et al., 2016) et surtout des moyens économiques disponibles.

Le site utilisé dans le cadre de cette étude est une riziculture de mangrove en front de mer. Il a été choisi car il est encore exploité et entretenu, il est facile d'accès et il est relativement bien protégé des submersions marines via une digue HIMO le long de la côte et une digue mécanisée dans laquelle est inséré l'ouvrage régulateur. Ce dernier est encore en bon état et, comme dit ci-dessus, fonctionne à partir d'une combinaison de vanne à clapet et de batardeaux. Les vannes à clapet ne sont cependant utilisées que lors de la saison des pluies afin de permettre le drainage sans laisser entrer l'eau salée alors que l'admission se réalise via une seule marée et est bloquée par des batardeaux lors de son niveau le plus haut.

III. Modélisation hydraulique

Au vu de ces différents éléments nécessaires au bon fonctionnement d'une plaine rizicole, l'aménagement ou la réhabilitation demande un dimensionnement précis des ouvrages, de la digue et des drains satisfaisant les conditions suivantes :

- Une admission de plusieurs marées consécutives avec maintien d'une lame d'eau élevée dans la plaine
- Une répartition de la lame d'eau sur la plus grande superficie possible
- Un drainage suffisant en saison des pluies pour éviter l'asphyxie du riz

- L'aménagement doit être durable
- Respecter un optimum économique

Ceci peut être réalisé via le calcul des pertes de charges dues à l'ouvrage ou à la rugosité des drains mais ces calculs s'avèrent souvent longs, fastidieux et peuvent rapidement mener à de nombreuses erreurs. C'est ainsi que les outils de modélisation hydraulique peuvent intervenir et faciliter les procédures. En effet, ceux-ci ont une place de plus en plus importante dans notre société et peuvent également être utilisés comme une aide à la décision en matière d'aménagement (Archambeau et al., 2010). Pour en revenir aux bases, tout d'abord, la modélisation est généralement définie comme une représentation simplifiée d'un système grâce à des théories scientifiques (Bayol, 2016). Elle permet de représenter des phénomènes physiques et de les rendre prédictibles et contrôlables (Song et al., 2012). Auparavant, la modélisation dite physique ou analogique représentait des phénomènes à une échelle réduite afin de prédire le comportement des phénomènes ou de comprendre les mécanismes qui l'influent. Aujourd'hui, les phénomènes sont surtout modélisés au travers d'un ensemble d'expressions mathématiques décrivant les événements. On parle alors de modélisation numérique ou mathématique et ces expressions sont souvent trop complexes pour être résolues directement. Elles font donc appel aux algorithmes des langages informatiques (Bayol, 2016). La modélisation se classe selon différentes caractéristiques :

- Les données peuvent être qualitatives ou quantitatives selon qu'il s'agisse de la description d'un type de processus ou plutôt de la mesure de celui-ci.
- Les relations entre les observations sont soit statistiques lorsqu'elles se basent essentiellement sur les mesures, soit mécanistes quand elles utilisent également la connaissance de processus sous-jacents au système (comme des lois physiques connues par exemple).
- Les données sont discrètes ou continues dans l'espace ou le temps selon les représentations de ces derniers.
- Et enfin, selon l'évolution du système, la modélisation se définit comme stochastique lorsque le modèle donne des résultats aléatoires qu'importe les variables d'entrée et déterministe lorsque le modèle prédit toujours les mêmes résultats pour un jeu de variables donné (Husson, 2001).

L'hydraulique, quant à elle, est une science appliquée sur base de la mécanique des fluides qui s'intéresse aux problèmes et questions liés à l'eau canalisée (Guinot, 2003). La modélisation hydraulique peut dès lors être définie comme une méthode de simulation numérique d'écoulements d'eau qui permettra de trouver en tout point et en tout temps la hauteur d'eau et la vitesse des écoulements. Cependant, cette modélisation dépend souvent de nombreux paramètres ou de coefficients variables selon les situations. Afin de s'assurer de la justesse du choix de ces paramètres, elle est donc fréquemment couplée à une calibration. Cette méthode fait varier les paramètres incertains et compare les résultats de la modélisation aux résultats observés sur un écoulement réel. Elle permet donc d'opter pour les valeurs de paramètre minimisant les erreurs. Enfin, le choix de ces paramètres est souvent vérifié en les appliquant à d'autres écoulements semblables en variant la situation ou la période et en vérifiant que les paramètres choisis donnent des résultats cohérents. Cette dernière étape est appelée la validation.

Dans le cadre de cette étude, la modélisation sert à prédire la hauteur d'eau dans la plaine et dans les drains pendant la durée de l'admission des marées d'équinoxe. Les données recherchées dans ce cas sont donc bien des données quantitatives. Le logiciel utilisé à cette fin est le logiciel américain HEC-RAS. Il a été mis en place par l'armée américaine en 1995 afin de réaliser des calculs hydrauliques à une ou deux dimensions sur des flux stationnaires ou transitoires. Il peut également analyser le transport de sédiments et la qualité des eaux (Brunner, 2016). Il fonctionne sur base d'une modélisation mécaniste, ce qui signifie que HEC-RAS utilise des principes de conservation

universels comme le principe de conservation de l'énergie, de la masse ou de la quantité de mouvement. Enfin, ces principes donnent les mêmes résultats pour un jeu de variables d'entrée constant. Le modèle évolue donc de manière déterministe.

Le choix du nombre de dimension du modèle se fait selon la qualité et la quantité des données d'entrée, l'échelle spatiale de la modélisation, la complexité du système et les résultats recherchés (Guinot, 2003). Par exemple, un modèle 3D, utilisant les équations de Navier-Stokes, ne s'applique en général que pour des problèmes hydrauliques locaux ou des écoulements auprès de structures complexes et demande un temps de calcul conséquent. En effet, ces modèles prennent en compte l'évolution des vitesses dans les trois dimensions de l'espace et les équations utilisées sont donc plus complexes. Les modèles bidimensionnels horizontaux s'appliquent à plus large échelle et réduisent le nombre d'équations en considérant que la vitesse verticale est négligeable vis-à-vis des autres composantes. Par conséquent, la simulation ne prend en compte que les vitesses horizontales x et y et permet de connaître, par exemple, l'expansion d'une rivière en cas d'inondation. Enfin, lorsque le débit d'un cours d'eau doit être modélisé et qu'une direction préférentielle est déjà connue, le système peut encore être réduit en ne prenant en compte que les vitesses dans le sens de cette direction. Elle est couramment utilisée pour la prévision des crues grâce à sa vitesse de calcul (RESCIF, 2014 ; Guinot et al., 2003).

Pour résumer, la structure générale d'une modélisation hydraulique commence avec des données d'entrée (différentes selon le nombre de dimensions utilisées) qui sont ensuite traitées par des équations représentant le système donné et donnent en sortie les inconnues recherchées telles que la hauteur d'eau ou la vitesse (Figure 6).

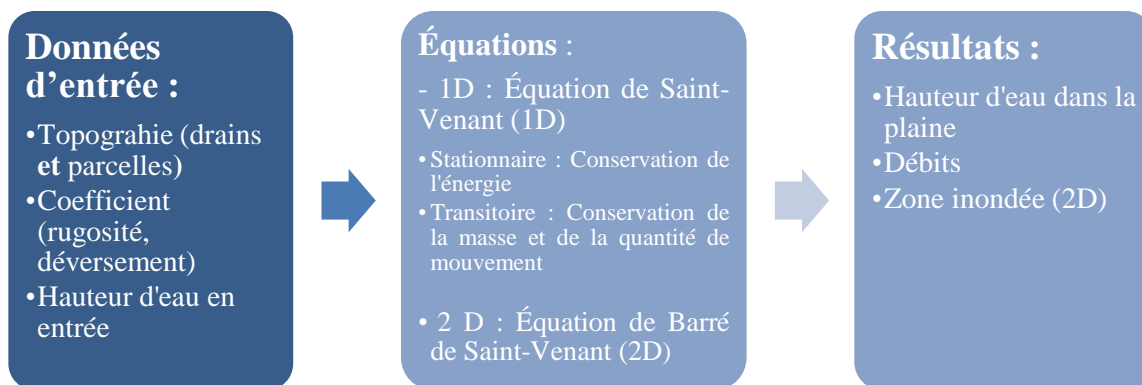


Figure 6 – Schéma générale d'une modélisation hydraulique sur HEC-RAS

Dans le cas de la riziculture de mangrove, la modélisation hydraulique permet de simuler l'entrée d'eau de mer au sein de la plaine au travers d'un ouvrage régulateur et la propagation de l'eau dans les drains. Cela correspond donc à une simulation en une dimension d'un flux instationnaire. Pour ce faire, HEC-RAS requiert comme données d'entrée la géométrie des drains pouvant être obtenue par une étude topographique, la construction d'ouvrage régulateur directement dans l'interface du logiciel et le choix de certains paramètres propres aux drains et aux structures. Ensuite, en mode de calcul instationnaire à une dimension, HEC-RAS calcule les hauteurs d'eau et les débits au sein de drains grâce aux équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement (Brunner, 2016). Bien que la modélisation unidimensionnelle donne une bonne idée de l'impact des structures hydrauliques et de la propagation de l'eau dans le lit mineur avec un temps de calcul relativement faible, elle ne considère les flux que dans une direction et ne prend donc pas en compte les possibles expansions de la rivière hors de son lit ni les pertes de charges qui y sont liées. Pour y remédier sans avoir les désavantages de la modélisation bidimensionnelle, le logiciel HEC-RAS propose de

combiner les modélisations en 1D et 2D. Les écoulements au sein des drains ou des lits mineurs sont calculés de manière unidimensionnelle alors que les zones inondables ou les lits majeurs sont représentés en deux dimensions. Cela donne donc une prévision du remplissage de la plaine rizicole et permet également de créer des scénarios d'aménagement comme par exemple des changements au niveau de l'ouvrage régulateur ou de l'endiguement des drains.

Cependant, la modélisation reste un outil avec de nombreuses incertitudes quant au nombre de choix à opérer, à la simplification du système et à la complexité même de celui-ci et doit donc être appréhendée avec précaution (Scholten et al., 2000). HEC-RAS dépend effectivement de nombreux paramètres variables selon les situations qui sont soit directement liés aux équations de conservation tel que le coefficient de Manning représentant la rugosité des drains, soit liés aux structures propres à HEC-RAS tels que les coefficients d'entrée et de sortie des ouvrages régulateurs ou ceux de déversement des drains qui permettent le débordement de l'eau des drains vers les parcelles via des structures latérales. Il est donc important de savoir dans quelle mesure ces paramètres influencent les résultats via une analyse de sensibilité pour pouvoir appliquer le modèle, voir même le développer, dans des conditions appropriées (Song et al., 2012). Cette analyse aide à déterminer quels paramètres d'entrée influencent le plus les résultats (Borgonovo, 2007). Elle facilite par la suite la compréhension des interactions entre ces paramètres et permet l'optimisation du modèle (Klipp et al., 2005) via une calibration de ces paramètres. En effet, la calibration va permettre de diminuer les différences entre les résultats donnés par le modèle et ceux observés sur le terrain selon le choix d'une méthode telle que la méthode des moindres carrés (Scholten et al., 2000). Finalement, l'objectif de la modélisation dans ce cas-ci est d'obtenir un modèle hydraulique avec un pouvoir prédictif le plus important possible. Il peut être évalué en appliquant le modèle à des données d'entrée différentes de celles utilisées pour la calibration et, ensuite, comparer la précision du modèle par rapport aux données de références obtenues sur le terrain via des index de convergence tel que le coefficient d'efficacité, aussi appelé indice de Nash-Sutcliffe. Cela génèrera des critères permettant l'évaluation de ce pouvoir prédictif (Bayol, 2016). Cette dernière étape se nomme la validation.

IV. Objectifs

En résumé, la Guinée Conakry est aujourd'hui un pays plein de ressources encore trop peu exploitées. L'une d'entre elles est son territoire de mangrove d'abord très riche au niveau de la niche écologique qu'il représente mais également par son potentiel de production de riz. Le riz de mangrove est, en effet, une culture permettant une production abondante pour la Guinée au vu de la surface exploitable du pays mais également une culture écologique car elle n'utilise pas d'intrants grâce à son itinéraire technique particulier. Pour cela, l'eau de mer apportée par les marées d'équinoxe est utilisée lors de la saison sèche pour apporter des limons marins fertiles et du sel afin d'éliminer les adventices. Cette culture nécessite cependant une régulation de l'eau singulière ayant pour but d'une part, de permettre le contrôle de l'eau de pluie en saison de culture tout en se protégeant des intrusions d'eau de mer et, d'autre part, d'autoriser l'entrée d'eau de mer en saison sèche. Cette gestion de l'eau est possible grâce à la mise en place de structures telles que des ouvrages régulateurs contrôlant l'eau selon les saisons, des digues empêchant les marées de détruire les cultures et des canaux faisant circuler l'eau au sein de la plaine. Ces ouvrages nécessitent néanmoins un dimensionnement précis afin de permettre une exploitation optimale de la plaine, d'être durable dans le temps et de répondre aux attentes économiques. Pour ce faire, la modélisation hydraulique peut-être un outil de prédiction intéressant qui simplifie le système complexe de la riziculture de mangrove afin de prévoir le comportement des débits, des hauteurs d'eau et par la suite, le remplissage des parcelles lors d'une phase d'admission de marée normale. À cet effet, le logiciel américain HEC-RAS peut être utilisé en vue de modéliser la plaine lors de la phase d'admission de marée. Il permet le calcul unidimensionnel qui met en avant la propagation de l'eau dans les drains et l'influence des structures telles que les ouvrages régulateurs ou les digues. HEC-

RAS permet également le calcul bidimensionnel qui permet d'estimer la surface inondée par l'entrée d'eau de mer et le remplissage des parcelles de la plaine. Il est cependant nécessaire de réaliser une calibration sur le modèle et d'en comprendre le fonctionnement avant de l'utiliser comme outil de prédiction. Les objectifs de ce TFE seront dès lors :

- Modéliser la plaine d'intérêt en une dimension sur HEC-RAS, réaliser une analyse de sensibilité des paramètres et coefficients variables et calibrer les plus influents
- Modéliser la plaine en deux dimensions et évaluer le gain de précision
- Comparer les modélisations uni- et bidimensionnelles
- Mettre en place des scénarios d'aménagements de la plaine rizicole sur HEC-RAS

L'objectif pour le bureau d'étude SHER est d'entrevoir dans quelle mesure HEC-RAS peut être utilisé dans la mise en place du projet SARITEM tant du point de vue de la facilité d'utilisation que du temps de travail requis.

Matériel et méthode

Ce travail de fin d'étude a pour objectif de modéliser l'entrée d'eau de mer au sein d'une plaine de riziculture de mangrove en Guinée Conakry. Pour ce faire, une zone d'étude est choisie afin d'y observer des mesures de hauteur d'eau et de topographie pendant la période d'admission de marées. Ces données sont ensuite utilisées pour modéliser la plaine sur le logiciel HEC-RAS qui simule l'entrée d'eau en une ou deux dimensions.

I. Présentation de la zone d'étude

L'étude se déroule dans la plaine de Kondeyiré située en Guinée Maritime dans la préfecture de Boffa et plus précisément dans le district de Mamiah ($10^{\circ}19'46,29''$ N, $14^{\circ}27'22''$ O). Elle contient trois sites (également appelé blocs) utilisés pour la culture du riz de mangrove : Kankoussaya-Séguéma, Melensy et Gbanta. Cette plaine fait partie d'un ensemble d'autres plaines localisées sur la côte guinéenne, toutes incluses au projet SARITEM. Le site d'intérêt de cette étude est celui de Kankoussaya-Séguéma situé le plus à l'ouest (bord de mer) comme le montre la Figure 7.

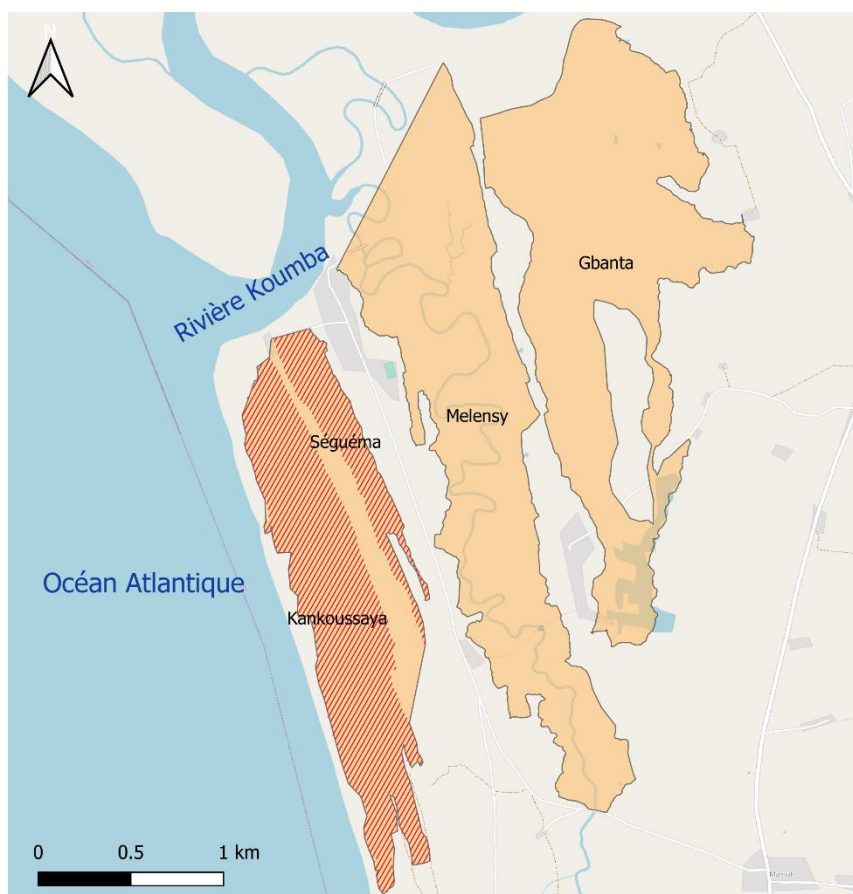


Figure 7 - Carte de situation des sites de Kankoussaya et Séguéma. (Source : OpenStreetMap)

Le périmètre de Kankoussaya (Bloc 1) présente une superficie de 78 hectares, il est situé le long de la mer et est protégé de celle-ci par une digue de ceinture HIMO. Celui de Séguéma (Bloc 2) mesure 30 hectares et est séparé de Kankoussaya sur la longueur par un cordon central. Le drain traversant Séguéma se déverse dans la rivière Koumba, un bras de mer de la côte guinéenne. Les deux blocs font partie d'un même et unique site car ils communiquent avec la mer via un seul ouvrage.

A. Historique

À l'origine, seule la plaine de Kankoussaya était exploitée et la plaine de Séguéma, ne contenant pas de culture, remplissait essentiellement le rôle d'exutoire du périmètre de Kankoussaya. Ce dernier se déversait donc par la plaine de Séguéma via deux drains sur le cordon central ou via un drain, nommé Yalamaya, reliant la plaine de Kankoussaya à l'océan.

Dans les années 1990, le périmètre de Séguéma a été aménagé pour la mise en culture et deux ouvrages ont été mis en place sur la digue donnant sur la rivière de la Koumba. Les drains reliant les deux plaines sur le cordon central ont été fermés avec des batardeaux. La vidange de Séguéma se réalisait donc essentiellement via l'estuaire de la Koumba alors que le site de Kankoussaya se vidangeait via le drain Yalamaya. Cependant, cette utilisation intense du drain et des ouvrages les a tous deux fortement érodés et les digues de protection mises en place ne suffisaient plus à bloquer l'eau de mer. Cela a créé de nombreuses intrusions d'eau salée en période de culture et a empêché une bonne gestion de l'eau (Adout, 2001).

C'est dans ce cadre qu'a démarré le projet *PDRI-GM* (Projet de Développement de la Riziculture Irriguée en Guinée Maritime) en 2001. Il a ensuite été suivi par le projet *Riz-BG* en 2007. Ces deux projets ont eu pour but d'améliorer la production de riz dans les sites de Kankoussaya et de Séguéma. Pour ce faire, ils ont limité les intrusions d'eau salée via la construction d'une nouvelle digue mécanisée au Nord de Séguéma et via une digue HIMO le long de Kankoussaya sur 1122m de long. Le drain Yalamaya a, par conséquent, été refermé. Ils ont également amélioré le cycle d'admission et de circulation de l'eau grâce à la construction d'un ouvrage régulateur sur la digue de Séguéma avec des vannes à clapet en amont et aval et un drain reliant les plaines de Séguéma et Kankoussaya sur le cordon central. L'évolution de l'ouvrage au Nord de Séguéma est visible sur la Figure 8.

Le projet *Riz-BG* a, par la suite, installé deux nouveaux ouvrages de régulation munis de tuyaux PVC au sein du cordon central reliant les deux plaines. Cette amélioration permet une meilleure circulation de l'eau entre les deux sites et donc un meilleur drainage et une admission d'eau de mer en saison sèche plus performante.



Figure 8 – Image satellite Google Earth du nord de la plaine de Séguéma en 2003 (gauche), 2010 (centre) et 2017 (droite).

B. État et fonctionnement actuel

Aujourd'hui, le site de Kankoussaya-Séguéma fonctionne par endiguement collectif avec une gestion de l'eau à la parcelle. Il comprend trois ouvrages régulateurs. Deux sont situés sur le cordon central entre Kankoussaya et Séguéma et comportent respectivement deux et trois passes. Ils permettent la circulation d'eau entre les deux sites et peuvent la réguler via des batardeaux installés côté Kankoussaya. Le dernier ouvrage est situé au nord de Séguéma sur la digue mécanisée. Il comporte quatre passes dont deux ont été rebouchées afin de diminuer le drainage du site et des batardeaux ont été ajoutés en amont afin de permettre une gestion de la hauteur d'eau avec précision.

lors de la saison de culture. L'aval est muni de vannes à clapet empêchant l'eau de mer d'entrer dans le site tout en le laissant se drainer. Ces vannes sont enlevées et entretenues lors de la saison sèche.

Le site est actuellement géré collectivement via des AUP (Association des Usagers des Périmètres) qui contrôlent la gestion des batardeaux et des vannes et, plus globalement, l'entretien du site.

II. Travail sur le terrain

La première phase du TFE a été la phase de collecte de données sur le terrain. Cette phase s'est déroulée en Guinée du 11 février au 25 mars 2020.

Les données collectées sont les suivantes :

- Données d'admission de la marée d'équinoxe de mars (suivi temporel de la hauteur d'eau dans les drains en différents endroits du site)
- État général du site, de l'ouvrage et des drains
- Dimensions précises des ouvrages
- Levé topographique du site (parcellaire, drains, et digues)
- Description qualitative de la phase d'admission

Le site est actuellement équipé de vannes à clapet uniquement du côté mer de l'ouvrage. Cela ne représente pas la situation idéale et recherchée dans le cadre de ce travail de modélisation de l'admission dans des conditions les plus propices à une admission maximale. En effet, actuellement, l'ouvrage est équipé de batardeaux côté plaine et l'admission est réalisée manuellement par les exploitants en suivant le niveau d'eau avec les batardeaux. En conséquence, il n'est possible d'admettre qu'une seule marée (il n'y a donc pas d'accumulation de plusieurs marées à l'intérieur du site). Il n'était pas envisageable au vu de la configuration de l'ouvrage et du temps imparti de mettre en place une vanne à clapet traditionnelle, il a donc été décidé d'installer une vanne type vanne à clapet temporaire fabriquée en bois marin (Figure 9).

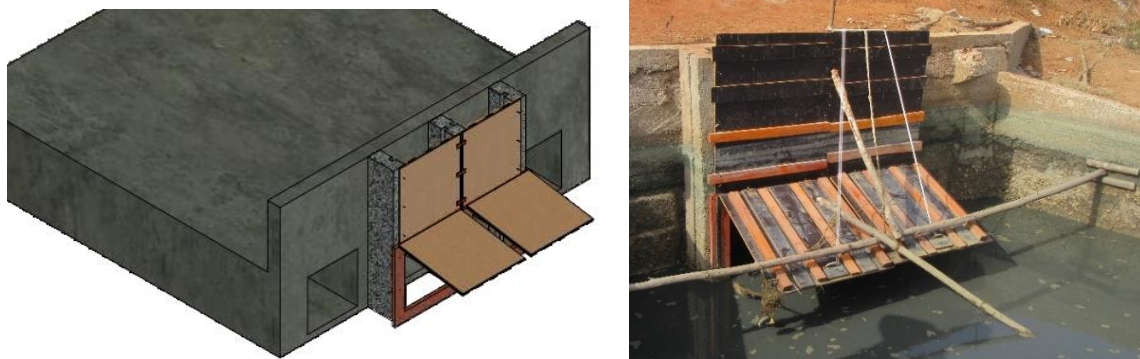


Figure 9 – Gauche : Schéma de construction de vannes à clapet sur l'ouvrage de Séguéma. Droite : Photo de la construction finale.

Le bon fonctionnement de la vanne a été testé sur quelques marées avant le début de la phase réelle d'admission et les ajustements nécessaires ont été réalisés en fonction des observations.

A. Mesure du niveau d'eau dans la plaine

Pour la calibration, il est nécessaire de connaître le niveau d'eau dans la plaine pendant la durée de la phase d'admission. Pour ce faire, des sondes *Levellogger Edge* de la marque *Solinst*® ont été installées à différents endroits du site. Ces sondes, une fois submergées, enregistrent des données de hauteurs d'eau souterraines ou de surface grâce à un capteur piézométrique mesurant la pression absolue, c'est-à-dire la pression atmosphérique et la pression hydrostatique. Le niveau d'eau peut ensuite être déduit grâce à un baromètre *Barologger Edge* qui permet de déduire la pression

atmosphérique. La précision de ces appareils de mesure est de $\pm 0,5$ cm pour le *Levellogger Edge* et de ± 0.05 kPa pour le *Barologger Edge*. La masse volumique de l'eau salée varie en théorie entre 1020 et 1030 kg/m³ mais a été considérée comme de l'eau douce avec une masse volumique de 1000kg/m³. Il existe donc une erreur de deux à trois pourcents dans les mesures de niveau d'eau. Les sondes piézométriques ont été installées dans huit endroits au sein des canaux principaux de Séguéma et de Kankoussaya (Figure 10). D'abord, à l'amont et à l'aval de l'ouvrage de Séguéma afin d'avoir les données de marées entrantes et d'isoler l'influence de l'ouvrage régulateur principal. Ensuite, une sonde est installée à chaque ouvrage régulateur reliant les deux plaines, une au centre de Séguéma et enfin, les trois dernières sont réparties le long du canal principal de Kankoussaya. La sonde *Barologger Edge* était installée dans le village de Mamiah à 4 km de la plaine. Les sondes ont été installées entre le 18 et le 20 février 2020 et démontées le 27 mars 2020. La période de la phase d'admission utilisée dans ce travail est du 5 mars au 11 mars et a été mesurée avec un intervalle de temps de 5 minutes.



Figure 10 – Emplacement des sondes au sein de Séguéma et Kankoussaya.

Les sondes sont placées dans des tubes en PVC avec capuchon et sont fixées soit à une paroi en béton aux abords des ouvrages régulateurs, soit à un piquet de bois solidement enfoncé au sein des canaux. Une corde relie le capuchon du tube à la sonde de sorte que celle-ci soit au plus proche du sol sans toutefois être en contact avec la boue (Figure 11).

Enfin, une fois les données des sondes compensées grâce au baromètre, celles-ci ne donnent que la hauteur d'eau à partir de leur point de mesure. Afin d'obtenir l'élévation de l'eau rattachée au levé topographique, un point GPS est pris avec une précision centimétrique (verticale de ± 20 mm et horizontale de ± 10 mm) au niveau du capuchon des tubes en PVC auquel la longueur de la corde reliant la sonde au capuchon et la taille de la sonde elle-même (13,2 cm) sont déduits (Figure 11). Un autre point GPS est également pris au sol en dessous de la sonde en vue d'obtenir la hauteur d'eau par rapport au sol.



Figure 11 – Installation des sondes au sein de la plaine (droite) et système de mesure (gauche)

Une échelle limnimétrique a également été placée au nord de Séguéma côté mer afin de confirmer la précision des données de la sonde au même endroit. L'échelle a été relevée du 9 au 11 mars toutes les quinze minutes lors des marées montantes du matin.

B. Mesure topographique

Le logiciel HEC-RAS nécessite également des données topographiques en entrée : celles des drains afin de réaliser des sections transversales qui représentent les canaux et celles des parcelles pour la modélisation en deux dimensions et la détermination de la courbe hauteur-volume- surface du site. Pour ce faire, un GPS différentiel (DGPS – *Differential Global Positioning System*) Leica GS07 a été utilisé. Le DGPS est une amélioration du GPS classique. Il permet de faire des relevés topographiques avec une précision centimétrique (verticale de $\pm 20\text{mm}$ et horizontale de $\pm 10\text{mm}$) grâce à une station de référence fixe corrigeant les erreurs de mesure en temps réel entre l'antenne mobile et les satellites. La communication entre l'antenne mobile et l'antenne fixe se fait par signal radio. En d'autres termes, l'antenne de référence, placée sur un point précisément connu, capte les fluctuations de mesure (dus aux satellites ou aux conditions de captation) et les transmet à un récepteur mobile observant les mêmes satellites afin de corriger les erreurs locales de mesure.

Dans le cadre de cette étude, les points suivants ont été relevés avec le système de coordonnées WGS84 UTM 28N :

- Les parcelles des périmètres de Kankoussaya et Séguéma à raison de quatre points par parcelle
- Les digues mécanisées (à l'entrée de Séguéma) et HIMO (à l'ouest de Kankoussaya) selon la Figure 12 en réalisant des profils en travers tous les 25 m en ligne droite, 15 m dans les zones présentant des courbures et, dans le cas d'angle droit, 5 m avant l'angle et 5 m après.
- Les drains principaux selon la Figure 12 en réalisant des profils en travers tous les 50 m en ligne droite, 15 m dans les zones présentant des courbures et, dans le cas d'angle droit, 5

m avant l'angle et 5 m après. Ceux-ci ont été relevés soit à pied lorsque la profondeur de l'eau le permettait soit en pirogue.

- Les trois ouvrages régulateurs
- L'échelle limnimétrique et les sondes

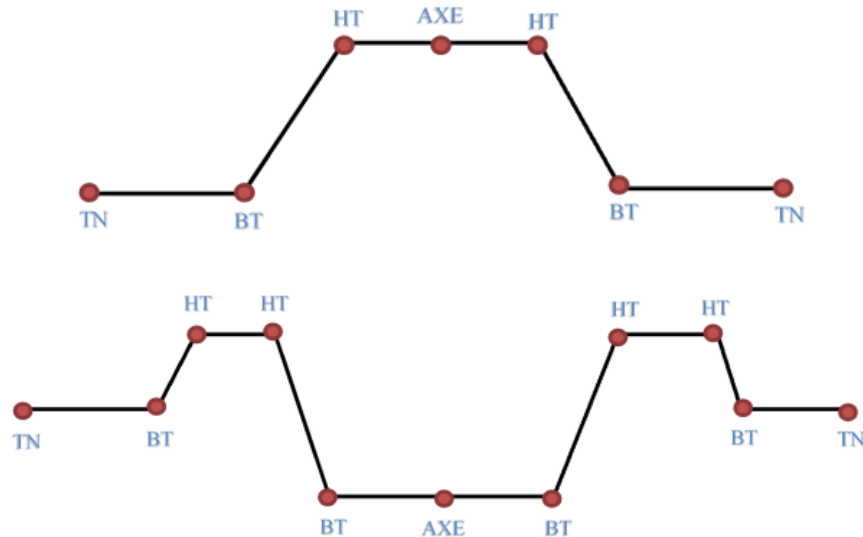


Figure 12 – Haut : Profil en long de sections transversales des digues. Bas : Profil en long de sections transversales des drains. (BT = Bas de Talus ; HT = Haut de Talus ; TN = Terrain Naturel)

Le cordon central séparant les deux plaines a déjà été relevé lors d'une mission antérieure de la même manière que les digues.

C. Incertitude sur les mesures

Les données prises sur le terrain sont soumises à des incertitudes et peuvent provoquer des erreurs plus ou moins importantes. Dans ce cas-ci, les incertitudes ne mènent pas à des différences plus importantes que les variations naturelles du terrain mais il est tout de même important d'en être conscient et elles sont donc exposées dans ce paragraphe.

Tout d'abord, la vanne mise en place est un prototype réalisé à la main afin d'avoir une vanne à clapet adaptée au site mais ne correspond pas aux vannes usuelles à ce genre d'ouvrage. En effet, celle construite ici n'est pas durable dans le temps au vu de ses matériaux de construction (bois blanc, multiplex, vis métallique) et a été arrangée pour obtenir un débit de fuite minimal grâce à du néoprène aux jointures et du béton le long du cadre. De plus, la légèreté du multiplex fait qu'elle se meut très facilement avec l'entrée de la marée et peut s'ouvrir à 90° alors qu'une vanne usuelle est bien plus lourde et ne s'ouvre pas à plus de 45°. Elle appliquera donc des pertes de charge beaucoup plus importantes sur l'admission d'eau. L'erreur induite par le changement de vanne n'est pas quantifiable dans ce cas car les données de pertes de charge sur les vannes usuelles ne sont pas disponibles et ne permettent donc pas une comparaison. Finalement, cette vanne, bien que relativement efficace pour ce travail, n'est donc pas à prendre en exemple et elle peut potentiellement améliorer les résultats de l'accumulation face à une vanne traditionnelle.

Les sondes piézométriques, quant à elles, ont une précision centimétrique. Cependant, l'installation dans des tubes en PVC a pu engendrer certaines erreurs. La corde reliant le capuchon à la sonde a été mesurée avec un mètre ruban sur le terrain et n'est donc pas précise au millimètre. La corde a également pu s'allonger à cause de nœuds mal serrés sur le capuchon PVC ou s'abîmer à cause de la forte chaleur et l'eau salée qui l'entourait. De plus, les sondes étaient accessibles aux usagers du site qui y ont touché. Ces manipulations de leurs parts ont été rattrapées manuellement mais de faibles erreurs peuvent subsister. Et enfin, la masse volumique de l'eau salée n'a pas été prise en

compte. L'erreur totale due aux sondes est donc en partie due aux erreurs de l'appareil (estimée à deux pourcents) et à la simplification de la masse volumique (trois pourcents).

Enfin, le DGPS permet d'avoir une précision centimétrique dans les mesures topographiques à condition de rester immobile. Cette condition a pu être respectée lors des levés réalisés à pied mais ceux en pirogue ont certainement induit quelques erreurs dues au mouvement de la pirogue lors de la mesure. Ces erreurs ne dépassent cependant pas 5 cm sur le plan vertical et ont principalement eu lieu lors de la mesure de l'axe des canaux. D'autant plus que les rizicultures de mangrove sont reconnues pour avoir des couches de boue importantes dans les zones humides. Les mesures dans ces zones ont donc été réalisées en posant la perche du DGPS et en la laissant s'enfoncer naturellement dans la boue et une fois stable, la mesure était prise. Il est donc important d'être conscient que ces mesures (notamment celles des axes des canaux) représentent le fond du drain sous la couche de boue mais ne sont pas plus clairement définies. L'erreur due au DGPS est environ de deux pourcents lorsque l'erreur centimétrique est considérée par rapport à une différence d'élévation de deux mètres entre le point le plus élevé et le plus bas.

Comme dit précédemment, ces erreurs dues aux mesures sont donc bien présentes et ont été estimées à environ sept pourcents mais sont moins importantes que les variations naturelles du terrain. En effet, la couche de boue présente dans les canaux peut, à certains endroits, être supérieure à 50 cm et est variable selon les saisons, les marées et les manipulations des usagers. Ces différences, naturelles ou anthropiques, sont donc bien plus importantes que les erreurs dues aux mesures d'élévation d'eau et de topographie qui sont dès lors considérées comme acceptables. De plus, les erreurs de mesures d'élévation de la surface d'eau ont été corrigées manuellement, les erreurs des levés topographiques peuvent être considérées comme négligeable au vu de la grande densité de point, et enfin, la vanne n'induit pas d'erreur en tant que telle mais doit bien être considérée comme un prototype non adapté durablement à la situation.

III. Modélisation hydraulique sur HEC-RAS

Dans le cas de cette étude, la modélisation est utilisée pour simuler l'entrée et la propagation d'eau de mer au sein d'une riziculture de mangrove. Elle peut par la suite prédire les hauteurs d'eau et les débits au sein du site selon l'amplitude des marées ou l'aménagement hydro-agricole réalisé. Pour ce faire, le logiciel HEC-RAS est utilisé. Il permet de modéliser la plaine et ses canaux en une ou deux dimensions. Cependant, il dépend de nombreux paramètres et de structures propres à HEC-RAS. Les structures doivent être judicieusement choisies et les paramètres les plus sensibles doivent être calibrés afin d'obtenir un modèle fiable et fidèle à la réalité. Cette section va donc d'abord exposer le fonctionnement du logiciel HEC-RAS et les différentes possibilités de création de modèle. Ensuite, les opérations de sensibilité et de calibration sont expliquées. Enfin, la modélisation en deux dimensions est présentée.

A. Fonctionnement d'HEC-RAS

HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centers - River Analysis System*) est un logiciel de modélisation hydraulique mis en place par le ministère américain de la Défense en 1995. La dernière version, utilisée dans le cadre de ce travail, est la version 5.0.7 sortie en mars 2019. Elle permet à l'utilisateur de mettre en place des simulations en une ou deux dimensions, en régime stationnaire ou transitoire, d'évaluer la qualité des eaux et de faire des études de transport de sédiments. Pour ce faire, il est nécessaire d'ajouter au modèle la géométrie de base des canaux et des structures hydrauliques présentes telles que des ponts, des conduits ou des ouvrages régulateurs. Ici, l'admission de marée étant un flux variable entrant dans la plaine, le logiciel ne sera utilisé qu'en régime transitoire à une ou deux dimensions en essayant de modéliser au mieux les ouvrages

régulateurs. Les informations données dans cette section sont tirées du livre de référence d'HEC-RAS écrit par Gary Brunner en 2016.

1. Régime transitoire unidimensionnel

Dans le cadre d'une simulation en régime transitoire unidimensionnel, le logiciel HEC-RAS fonctionne selon le système d'équation de Barré de Saint-Venant qui décrit un écoulement quasi-unidimensionnel dans un canal. Pour ce faire, il utilise deux équations de conservation : le principe de conservation de la masse et celui de la conservation de la quantité de mouvement toutes deux exprimées sous forme d'équations différentielles.

- Le principe de conservation de la masse (ou équation de continuité) stipule que les débits massiques au sein d'un volume de contrôle donné sont égaux à tous les débits massiques hors du volume de contrôle plus le taux de variation de masse dans le volume de contrôle et peut s'exprimer comme ci-dessous :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

Où A = Aire de contrôle [m^2], $Q(x,t)$ = Débit [m^3/s] et q_l = débit latéral par unité de longueur [$m^3/m.s$].

- Le principe de conservation de la quantité de mouvement, basé sur la deuxième loi de Newton, indique que tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état. En d'autres termes, l'accélération subie par un corps dans un référentiel galiléen est proportionnelle à la résultante des forces qu'il subit, et inversement proportionnel à sa masse m . Dans le cas de l'hydraulique, seules les forces de pression, de gravité, de frottement et le taux net de quantité de mouvement entrant sont considérés par le logiciel. Cela donne l'équation ci-dessous :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

Où A = Aire de contrôle [m^2], $Q(x,t)$ = Débit [m^3/s], V = Vitesse [m/s] et S_f = pente de frottement (calculée selon l'équation de Manning).

Le procédé de calcul qui s'ensuit est un calcul itératif au schéma implicite basé sur la méthode des différences finies qui permet d'approcher une solution aux dérivées partielles. En effet, cette méthode va discrétiser le problème dans l'espace et dans le temps afin de créer un maillage en deux dimensions (x et t). Ensuite, le programme utilise les deux principes de conservation exposés ci-dessus pour calculer les hauteurs et les débits en chaque point du maillage. Le processus implicite est plus coûteux en temps mais assure une modélisation plus stable qu'un processus explicite.

Ce problème comprend donc un nombre N de nœuds de calcul, soit $N-1$ cellule du schéma de différence finie. De ces dernières, il est donc possible de développer $2N - 2$ équations. Cependant, il y a $2N$ inconnues étant donné que la hauteur d'eau et le débit sont recherchés à chaque nœud. Il est donc nécessaire d'obtenir deux équations supplémentaires pour résoudre ce système.

Celles-ci sont données grâce aux conditions limites définies comme l'état d'un point du système pendant toute la durée de la modélisation. Elles se répartissent en deux catégories :

- Les conditions intérieures représentent les jonctions entre les différents tronçons de rivières qui sont basées soit sur un principe de continuité de la hauteur d'eau, soit une continuité du débit. Mais elles peuvent aussi être modélisées sous forme d'un hydrogramme

arrivant ou quittant latéralement un tronçon ou encore sous forme d'une connexion à une zone de stockage.

- Les conditions aux extrémités (amont et/ou aval) peuvent se présenter sous différentes formes comme un hydrogramme, un limnigramme ou encore une connexion avec une aire de stockage.

La modélisation nécessite également des conditions initiales décrivant le système au début de la simulation.

Pour la modélisation hydraulique d'une riziculture de mangrove, la condition initiale est la hauteur d'eau dans les canaux et dans les parcelles au début de la phase d'admission. Celle-ci correspond donc à la date de 5 mars aux alentours de 17 heures où a eu lieu la première admission de marée. L'élévation mesurée à cette date vaut 2,6m. Les conditions limites, quant à elles, dépendent du type de régime hydrique mais dans ce cas-ci, les jonctions ont toutes été connectées via une continuité des hauteurs d'eau et les conditions limites aux extrémités amont sont toutes liées à des aires de stockage alors que la condition aval est donnée par un limnigramme représentant les marées entrantes.

2. Données géométriques

Afin de commencer la modélisation, il est nécessaire d'entrer les données géométriques qui définissent la plaine. Il s'agit principalement de sections transversales provenant de la topographie et illustrant les drains, des ouvrages régulateurs, des casiers rizicoles ici représentés par des aires de stockage et enfin, des structures latérales permettant le déversement des canaux dans les aires de stockage.

a) Topographie et géométrie des canaux

Les données topographiques ont été récupérées sur le terrain comme dit au point B. Elles ont ensuite été traitées sur le logiciel AutoCAD Civil 3D où les lignes de rupture (Axe, BT et HT) ont été définies et transformées ensuite en alignement avec des sections transversales tous les 15 mètres. Ces sections sont ensuite importées dans HEC-RAS et chaque tronçon de canal a été assemblé via des jonctions qui assurent une continuité des hauteurs d'eau entre les sections amont et aval de la jonction. Une fois importées et connectées, il est nécessaire d'attribuer une valeur de Manning, notée n , à la surface des drains. Celle-ci définit la rugosité des canaux et est proportionnelle aux forces de frottement. Il est également possible de diviser le drain en plusieurs zones telles que le lit majeur et le lit mineur grâce aux *Bank Station* et, par après, de définir une valeur différente de Manning selon ces zones. Ici, la surface des drains est considérée comme uniforme et n'a donc pas été divisée. La valeur initialement attribuée à n est égale à 0,03 ce qui correspond à un cours d'eau naturel, propre, droit et sans faille ou mare profonde (Figure 13). Cette valeur sera par la suite ajustée par les résultats de la calibration du modèle.

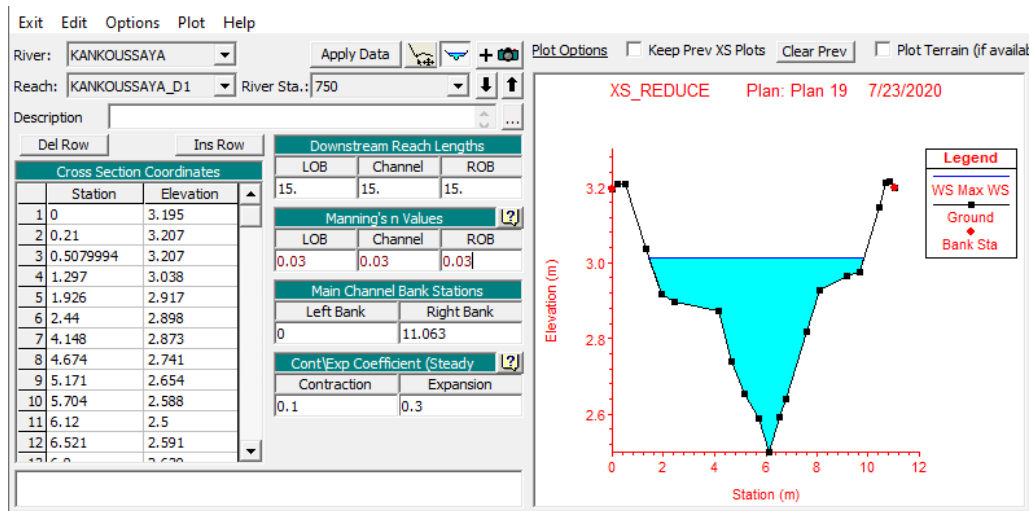


Figure 13 – Interface HEC-RAS de la géométrie des sections transversales.

HEC-RAS utilise les sections transversales pour linéariser certaines données et faciliter par après les nombreux calculs de modélisation. C'est-à-dire que pour chaque section, la surface de la section et la largeur supérieure de la surface de l'eau (*Top Width*) sont calculées selon l'élévation de l'eau.

b) Aire de stockage

Les aires de stockage, ou *Storage Areas*, sont des zones définies par l'utilisateur dans lesquelles l'eau peut entrer, sortir ou être stockée. Elles peuvent être connectées à l'aval ou l'amont d'une rivière et donc représenter la condition limite de celle-ci ou encore longer un tronçon et être connectées à lui via des structures latérales. L'utilisateur peut également la définir selon une courbe hauteur-volume qui permet de connaître son pourcentage de remplissage selon l'élévation de l'eau. Différentes zones de stockage ont été définies dans le cadre de cette étude selon les objectifs des modèles. Les courbes hauteur-volume ont été calculées directement sur HEC-RAS à partir de l'interface RASMapper.

c) Structures latérales

Bien que la modélisation soit unidimensionnelle, les structures latérales offrent la possibilité aux drains de se déverser latéralement hors de ceux-ci. Elles agissent comme des déversoirs latéraux et peuvent être améliorées en déversoir à vannes, avec des conduits ou encore en porte d'écluse. Elles sont, au minimum, reliées à deux sections transversales du côté du drain et peuvent se déverser dans une zone de stockage (à une ou deux dimensions), dans une autre rivière ou simplement quitter le système.

Pour ce faire HEC-RAS calcule le débit de déversement (Q , [m³/s]) selon la longueur de la structure (L , [m]), la hauteur d'eau par-dessus le remblai (H , [m]) et un coefficient de déversement (C , [m^{1/2}/s]) selon la formule :

$$Q = C L H^{3/2}$$

Le calcul de cette équation peut se réaliser selon deux méthodes laissées aux choix de l'utilisateur :

- Équation standard : l'utilisateur choisit lui-même le coefficient de déversement et le type de hauteur (H) de l'équation. Ce dernier paramètre peut soit être le niveau d'eau soit le niveau d'énergie. Le niveau d'eau est l'option par défaut et est en général plus appropriée lorsque la structure est proche du canal principal.

- Équation de Hager : le coefficient de déversement est calculé automatiquement en fonction d'autres paramètres tels que la hauteur moyenne de la structure, la pente du fond du canal et l'angle de la structure

Ensuite, quand l'eau se déverse par-dessus la structure, le coefficient est ajusté selon la forme de celle-ci. Il existe quatre choix de formes : trapézoïdale à large crête, forme d'ogee (forme de S allongée), crête aigue et enfin, celle appelée « *Zero Height* » qui considère juste la forme naturelle du terrain.

Les structures latérales construites dans les modèles présentés ci-après ont toutes été réalisées selon l'équation standard avec un coefficient de déversement initial de 1,1 et une forme « *Zero Height* ».

d) Ouvrages régulateurs

Les ouvrages régulateurs représentent une part importante des pertes de charge lors de l'admission d'eau de mer. Il est donc primordial de les représenter correctement et de comprendre les processus qui régissent leur modélisation. HEC-RAS permet le calcul de l'eau au travers des ouvrages selon deux méthodes dépendant de la section de contrôle :

- Contrôle de l'admission : Cette option est choisie lorsque l'eau peut s'écouler au travers et hors du conduit plus rapidement qu'elle ne peut y entrer, c'est-à-dire lorsque la capacité du conduit est limitée par la capacité de l'ouverture, les équations utilisées sont tirées du *Federal Highway Administration* (FHWA) qui a mis en place des équations pour des ouvertures submergées (1) ou pas (2)

$$\frac{HW_i}{D} = K \left[\frac{Q}{AD^{0.5}} \right]^M \quad (1)$$

$$\frac{HW_i}{D} = c \left[\frac{Q}{AD^{0.5}} \right]^2 + Y - 0,5S \quad (2)$$

Où HW_i = Hauteur de l'énergie à partir de la base du conduit d'entrée [m], D = hauteur de l'entrée du conduit [m], Q = Débit au travers du conduit [m^3/s], A = aire de la section du conduit [m^2], S = pente du conduit et K, M, c, Y = constante dépendant de la forme du conduit et des conditions d'entrée.

- Contrôle de la sortie : Cette option est choisie quand l'eau s'écoule dans le conduit plus rapidement qu'elle ne peut en sortir, c'est-à-dire que la capacité du conduit est limitée par les conditions à sa sortie. L'équation utilisée dans ce cas est la conservation de l'énergie, ou équation de Bernoulli, présentée ici avec ses paramètres représentés à la Figure 14.

$$Z_3 + Y_3 + \frac{a_3 V_3^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} + H_L$$

Où Z = l'élévation de la base du conduit [m], Y = la hauteur d'eau [m], V = la vitesse moyenne [m/s], g = l'accélération de la gravité [m/s^2], a = le coefficient de pondération de la vitesse [m^{-1}].

Et $H_L = h_{en} + h_{ex} + h_f$

$$\text{Avec } h_{en} = k_{en} \frac{V_{en}^2}{2g} \quad h_{ex} = k_{ex} \left(\frac{a_{ex} V_{ex}^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right) \quad h_f = L \left(\frac{Qn}{1,486AR^{2/3}} \right)^2$$

Où $k_{en/ex}$ = coefficient d'entrée/sortie, $V_{en/ex}$ = vitesse à l'entrée/sortie du conduit [m/s], L = longueur du conduit [m], Q = débit dans le conduit [m^3/s], n = coefficient de Manning [$s/m^{1/3}$], A = Aire du conduit [m^2] et R = rayon hydraulique [m].

HEC-RAS offre la possibilité de choisir entre ces deux options ou que le choix se réalise de manière automatique en calculant l'énergie requise pour faire passer un débit donné dans les deux situations et le logiciel opte pour l'option en requérant le plus.

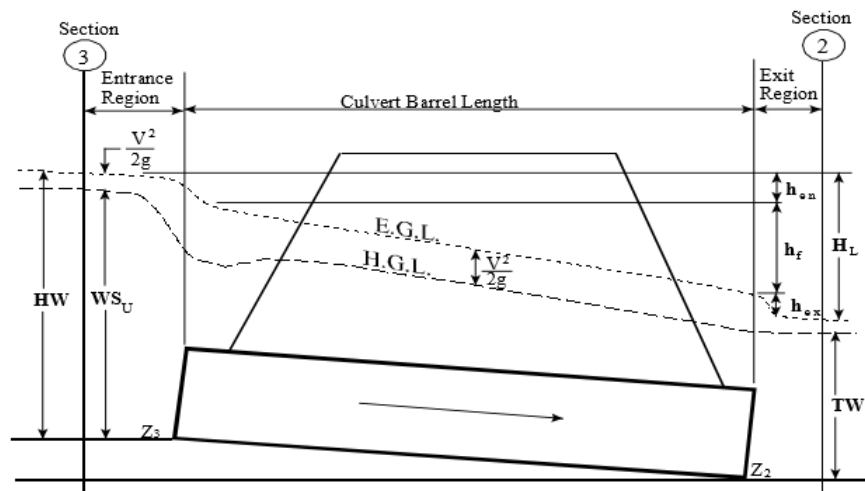


Figure 14 – Représentation des pertes de charges au sein d'un ouvrage régulateur

Les ouvrages sont donc construits dans HEC-RAS grâce à l'onglet *Inline Structure* dans lequel, à l'instar des structures latérales, il est nécessaire de définir leur localisation et le remblai qui les constitue. Ensuite, les passes les traversant sont définies grâce à l'onglet *Culvert* dans lequel la section de contrôle du calcul, la forme, les dimensions, la longueur, la valeur de Manning et les coefficients d'entrée et sortie sont définis. Il est également possible de définir le sens du passage de l'eau dans les passes. L'eau peut soit entrer dans un seul sens défini par l'utilisateur soit circuler dans les deux sens.

Les trois ouvrages ont été construits selon cette procédure. Les dimensions et les longueurs de conduits ont été calculées et intégrées dans le logiciel à partir des données topographiques récupérées. La valeur de Manning est initialement définie à 0,013 pour l'ouvrage régulateur principal avec des conduits carrés en béton et le sens de passage ne permet que l'admission d'eau afin d'imiter la vanne à clapet. Les deux autres ouvrages liant les deux plaines ont des conduits circulaires en métal. Leur coefficient de Manning a été défini à 0,01 et l'eau peut circuler dans les deux sens étant donné qu'aucune structure régulatrice n'est installée pendant la phase d'admission. Le choix du type de calcul se réalise selon la sélection automatique étant donné que celle-ci change au cours de l'admission. En effet, lorsque la plaine est vide, le débit est contrôlé par la section d'entrée mais lorsque le niveau d'eau dépasse la hauteur des conduits, la section de sortie devient limitante.

Cependant, la création d'ouvrages selon cette méthode ne permet pas de développer les bassins de dissipations présents en amont et aval des structures. Pour ce faire, des sections transversales supplémentaires ont été ajoutées en respectant toujours les données topographiques afin de représenter au mieux l'ouvrage réel (Figure 15). Le coefficient de Manning choisi pour ces nouvelles sections est de 0,013 étant donné que ces dernières sont également en béton.

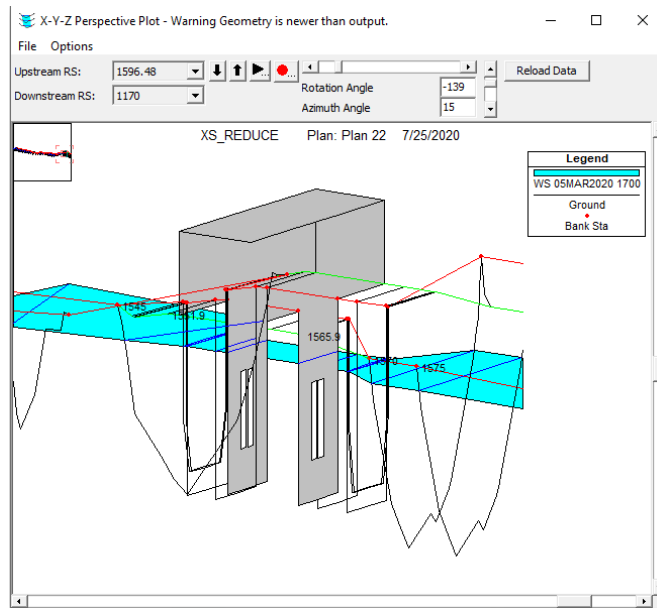


Figure 15 - Représentation 3D de l'ouvrage régulateur de Séguéma sur HEC-RAS.

B. Modèles créés

Les possibilités de construction de modèles sont vastes et variées au vu du nombre de différentes structures possibles et de leurs options. De plus, il n'est pas évident de déterminer l'impact direct des structures sur le modèle et les résultats qui s'ensuivront. Pour remédier à cela, trois modèles principaux ont été construits avec différentes possibilités de structures ou de connexions (Figure 16). Celles-ci ont cependant toutes été construites selon les méthodes et les coefficients expliqués au point précédent et les trois modèles possèdent tous les ouvrages régulateurs construits de la même manière.

Pour chacun de ces trois modèles, l'espace est discrétisé en sections transversales séparées de 15 mètres et ils ont tous été modélisés avec une discrétisation du temps de calcul d'une seconde.

1. Modèle I : Drains complets sans structure latérale

Le premier modèle réalisé est le plus simple. Il reprend la totalité des canaux relevés sur le terrain, les assemble et les relie via les trois extrémités à une zone de stockage reprenant toute la plaine. L'eau entre donc par l'ouvrage principal et ne peut s'échapper des drains que via une des trois extrémités. Ce modèle a l'avantage de reprendre l'entièreté du réseau de canaux de la plaine et d'être assez stable au vu du nombre de structures minimale. Cependant, le logiciel HEC-RAS ne permet pas de modéliser sur des drains secs et, comme dit auparavant, l'élévation initiale de l'eau au début de l'admission est de 2,6m. Or, les tronçons les plus en amont de la plaine ne sont pas encore immergés lors de cette phase. La hauteur initiale doit donc nécessairement être augmentée à 2,93 m et ne peut donc pas prendre en compte la totalité de la phase d'admission.

2. Modèle II : Drains principaux avec structure latérale omniprésente

Le second modèle possède des structures latérales sur toutes les rives des canaux ce qui permet désormais aux drains de se déverser latéralement en tout point. Cependant, si ce modèle reste avec la même zone de stockage que le modèle précédent, le niveau d'eau serait le même partout. En effet, les structures latérales permettent le passage de l'eau dans les deux sens et mettent donc en place un équilibre sur toute la zone. La plaine a donc été divisée en tronçons au sein des deux sites afin de représenter au mieux la propagation de l'eau dans les parcelles. Idéalement, il faudrait une zone

de stockage par parcelle pour représenter parfaitement le système mais l'ajout d'un grand nombre de zones impacte fortement la stabilité du modèle. La plaine de Séguéma a donc été divisée en quatre zones et celle de Kankoussaya en cinq zones. La division est réalisée en tentant de respecter au mieux la réelle division entre les parcelles.

Ensuite, les drains secondaires et ceux situés au bout de Kankoussaya possèdent des élévations minimales supérieures à la hauteur initiale du modèle ce qui empêche de démarrer la modélisation correctement. Ces drains ont donc été enlevés partiellement. Afin que la modélisation reste fidèle à la réalité, la jonction entre le canal principal et le début des drains secondaire est toujours présente et les extrémités se déversent dans les zones de stockage dans lesquelles les drains complets se déverseraient également.

Les canaux principaux sont donc fidèlement représentés grâce aux structures latérales qui approchent au mieux la réalité. Cependant, la grande présence de celles-ci peut causer des oscillations et rend le modèle très sensible aux instabilités en cas de changement dans les paramètres. De plus, le drain principal de Kankoussaya étant raccourci, les données de la sonde Kankoussaya 3 ne sont plus disponibles.

3. Modèle III : Drains principaux avec structures latérales réduites

Ce dernier modèle tente de trouver un compromis entre les deux précédents et donc entre la ressemblance à la réalité et la stabilité numérique.

D'une part, pour pallier les problèmes d'élévation des fonds de drains trop hauts par rapport à l'élévation initiale, des fentes de 5 cm ont été construites dans le fond des drains avec une élévation supérieure à 2,6m. Cela a permis de maintenir le drain principal de Kankoussaya en entier. Cependant, les drains secondaires restent des sources de complexité pour le modèle et ajoute un temps considérable de calcul même avec les fentes ajoutées et sont donc restés raccourcis à l'image du modèle II.

D'autre part, les structures latérales apportant également des problèmes de stabilité, celles-ci ont seulement été placées aux endroits où le débordement de la plaine est évident soit en raison de la topographie plus basse soit car cela été observé sur le terrain. Cela permet de stabiliser le modèle tout en gardant les débordements principaux.

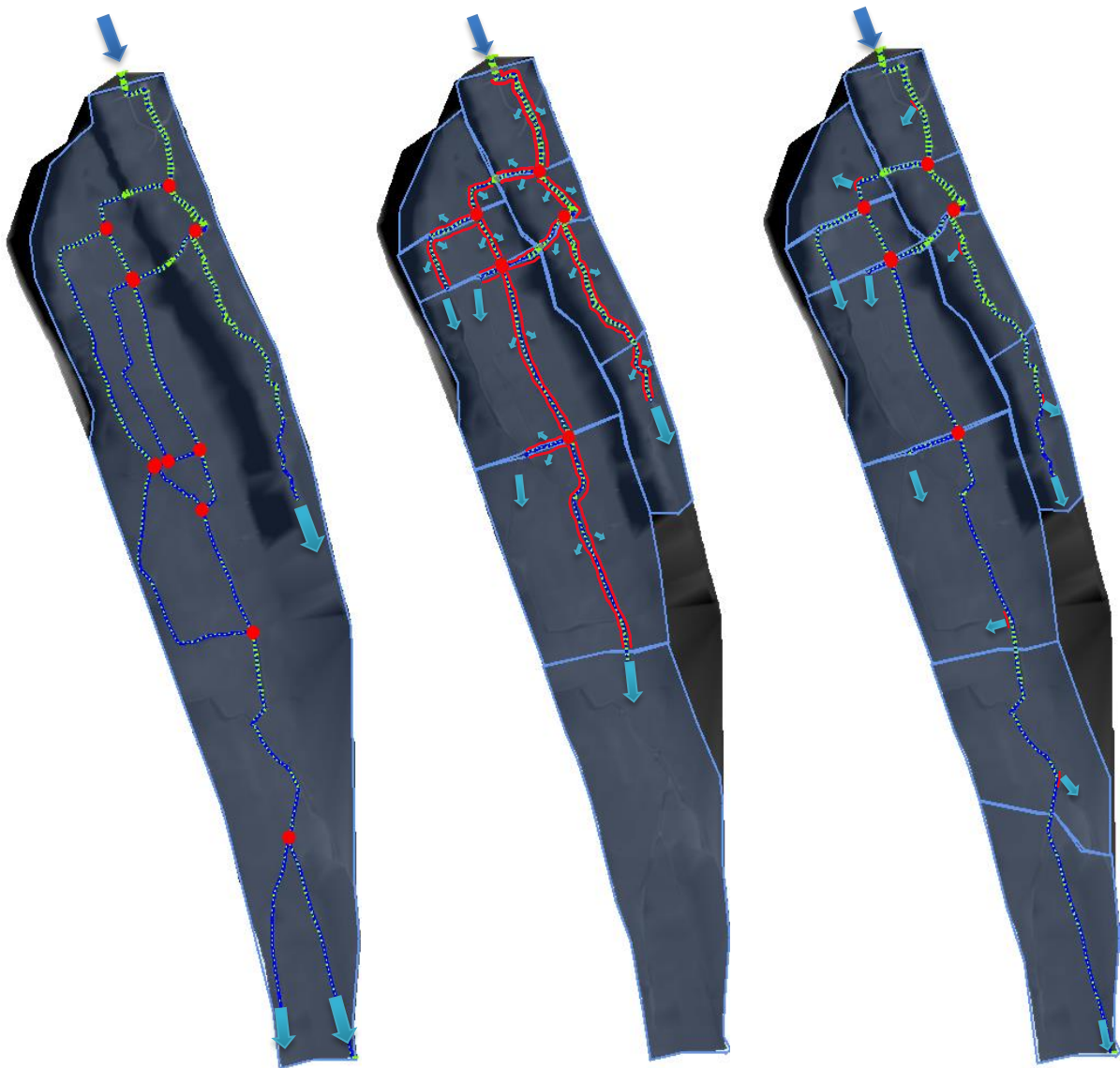


Figure 16 – De gauche à droite : Modèle I, Modèle II, Modèle III. Lignes rouges : Structures latérales ; Flèche bleu foncé : entrée d'eau ; Flèche bleu clair : Sortie d'eau possible vers les zones de stockage (le bout de la flèche indique la zone dans laquelle elle se déverse) ; Point rouge : Jonction.

C. Analyse de sensibilité

Les trois modèles ci-dessus, une fois construits, doivent se montrer les plus fidèles possible à la réalité des données observées sur le terrain. Cependant, il existe de nombreuses incertitudes quant aux choix des paramètres et coefficients utilisés. Concrètement, les paramètres variables selon les différentes structures sont résumés ci-dessous :

- Les calculs au sein de drains se réalisent selon les équations de conservations de la masse et de la quantité de mouvement. Ils sont donc dépendants des paramètres de géométrie et du coefficient de Manning. La géométrie est considérée comme fiable au vu de la densité de points et il ne reste donc que le coefficient de Manning ayant une influence sur les résultats.
- Les pertes de charges dues aux ouvrages régulateurs sont soit calculées via les formules du FHWA lorsque que la section de contrôle est à l'admission et elles dépendent donc principalement de la géométrie de l'ouvrage et de la forme de celui-ci. Soit via l'équation de conservation de l'énergie lorsque la section de contrôle est à la sortie. Les pertes de charge sont alors dues à la contraction et à l'expansion des entrées et sorties de l'ouvrage et

aux forces de frottement. Dans le premier cas, la géométrie et la forme des ouvrages sont clairement définies grâce aux observations et mesures de terrain et ne sont donc pas variables. Dans le second, l'équation de Bernoulli dépend du coefficient de Manning et des coefficients de contraction et d'expansion à l'entrée et à la sortie de l'ouvrage.

- Les structures latérales sont construites selon l'équation standard de HEC-RAS et la forme du déversoir est définie comme le terrain naturel. L'équation ne dépend donc que du coefficient de déversement.

Afin que ces paramètres correspondent au mieux à la réalité, il est nécessaire de les calibrer selon les données de terrain. Cependant, cette manipulation peut prendre énormément de temps au vu du nombre de paramètres et du temps de calcul nécessaire à la modélisation. Il est donc utile de réaliser préalablement une analyse de sensibilité afin de mettre en évidence les paramètres ayant une plus grande influence sur le modèle. Celle-ci se réalise selon la formule :

$$s_p = \left(\frac{\Delta O}{O} \right) / \left(\frac{\Delta p}{p} \right)$$

Où $\frac{\Delta O}{O} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|\Delta O_i|}{O_i}}{n}$ et représente la moyenne de la variation relative entre les résultats modélisés selon les différentes valeurs du paramètre testé et Δp est la variation relative du paramètre. En d'autres termes, cette équation indique que plus le résultat s_p de l'analyse de sensibilité d'un paramètre sera élevé, plus ce paramètre a une grande influence sur le modèle. En effet, une variation du paramètre induit une grande variation dans les résultats du modèle.

L'analyse de sensibilité est réalisée en faisant varier le coefficient de déversement latéral et le coefficient de Manning de 5% sur le modèle III et les coefficients d'entrée, de sortie et de Manning des ouvrages varient également de 5% sur un modèle réduit ne reprenant que l'ouvrage principal et deux sections transversales en amont et aval connectée à une aire de stockage reprenant toute la plaine. L'ensemble des paramètres testés est repris dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Résumé des paramètres testés par l'analyse de sensibilité.

Structure	Paramètre	Gamme de valeur	Valeur initiale	Utilisation
Drains	Coefficient de Manning (n)	0,025 (drains naturel lisse et propre) à 0,15 (beaucoup de végétation et de relief)	0,03	Calcul du frottement dans les différentes équations de conservation.
Ouvrage régulateur	Coefficient d'entrée (k_{in})	0,2 à 0,9 (ouvrage circulaire) 0,2 à 0,5 (ouvrage rectangulaire)	0,5	Perte de charge due à la contraction à l'entrée de l'ouvrage
	Coefficient de sortie (k_{ex})	0,3 à 1 (croît avec la brutalité du changement)	1	Perte de charge due à l'expansion à la sortie de l'ouvrage
	Coefficient de Manning (n)	0,011 à 0,027 (béton) 0,011 à 0,015 (métal)	0,013	Perte de charge due à au frottement au sein de l'ouvrage
Structure latérale	Coefficient de déversement (Cd)	0,1 (terrain naturel sans surélévation des rives) à 1,2 (digue ou route à 1m de haut)	1,1	Calcul du débit entrant ou sortant via les structures latérales

Cette opération est automatisée grâce à l'API (*Application Programming Interface*) de HEC-RAS permettant de contrôler le logiciel via une autre entité informatique. Dans ce cas, le langage Python est utilisé afin d'automatiser cette opération. Le code est disponible en Annexe 1.

D. Calibration

La calibration se réalise sur les paramètres avec les facteurs s_p de l'analyse de sensibilité les plus élevés et qui ont donc une plus grande influence sur les résultats. Elle est basée sur une procédure itérative permettant de trouver le RMSE (*Root Mean Square Error*) minimum, c'est-à-dire le paramètre permettant la meilleure similitude avec la réalité en diminuant les erreurs entre les résultats donnés par le modèle et ceux observés sur le terrain. Le calcul du RMSE se réalise selon la formule :

$$RMSE = \sqrt{\sum_i^N \frac{(x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}$$

Où x_i = Résultat du modèle et \hat{x}_i = Données mesurées

Pratiquement, cette équation calcule le carré de la différence entre les résultats donnés par la modélisation et ceux réels obtenus sur le terrain et réalise une moyenne afin d'obtenir l'erreur moyenne quadratique. Le RMSE est ensuite obtenu par la racine carrée de ce résultat et donne un index de comparaison pour trouver les valeurs de paramètres ressemblant le plus aux données réelles. Plus le RMSE est faible, plus les résultats de la modélisation ressemblent aux données réelles. Cette étape est également automatisée via un code Python (Annexe 1).

E. Validation

Le but de la calibration est finalement d'obtenir un modèle hydraulique permettant de réaliser des prédictions pour d'autres plaines rizicoles ou d'autres données de remplissage. Avant cela, il est nécessaire de s'assurer que le modèle répond à l'utilisation prévue, en termes d'exigence globale et d'attentes de l'utilisateur (Bongiorno et al., 2015). Cela peut se vérifier en l'appliquant à différentes situations telles qu'un changement de plaine ou un nouveau jeu de données d'entrée. La comparaison de cette nouvelle situation aux données réelles est réalisée via l'indice de Nash-Sutcliffe, aussi appelé coefficient d'efficacité, qui se calcule selon la formule suivante :

$$E_f = 1 - \frac{\sum_i^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Où E_f est le coefficient d'efficacité, \hat{Y}_i représente les résultats obtenus par le modèle, Y_i les données mesurées et \bar{Y} la moyenne des données expérimentales.

Concrètement, le numérateur indique la somme des carrés des différences entre les valeurs prédites et celles réellement obtenues et le dénominateur représente la variation totale des mesures par rapport à la moyenne. La valeur de E_f varie entre 0 et 1 où 1 représente une correspondance parfaite (McCuen et al., 2006). Une valeur supérieure à 0,75 suppose une correspondance suffisante pour valider le modèle (Castellarin et al., 2004).

Dans le cadre de cette étude, la validation n'est réalisable qu'en appliquant le modèle avec une autre phase de remplissage car le manque de données des autres sites ne permet pas l'application sur une nouvelle plaine rizicole. Les vannes et les sondes piézométriques ont été testés du 23 février à 18h au 25 février à 9h30 où le site a donc accumulé trois marées et les données des sondes ont été récupérées. Ces données peuvent donc être utilisées pour simuler le modèle sur de nouvelles données d'entrée. La dynamique peut cependant être différente car le site n'a pas eu le temps de se vidanger totalement au préalable.

Le E_f du modèle sera donc calculé lors de la phase d'admission réelle (du 5 mars au 11 mars) et comparé au E_f obtenu sur la période de validation.

F. Modélisation en deux dimensions

La modélisation en deux dimensions peut apporter une précision supplémentaire d'une grande importance. En effet, elle permet de prendre en compte les variations d'expansion de la rivière et les pertes de charge qui y sont liées. Elle permet notamment d'avoir une vue précise du remplissage des parcelles. HEC-RAS permet donc à l'utilisateur de réaliser une modélisation de régime transitoire en deux dimensions ou de combiner une modélisation unidimensionnelle dans le lit mineur d'une rivière et bidimensionnelle pour le lit majeur.

Pour ce faire, HEC-RAS est toujours basé sur l'équation de Navier-Stokes et y apporte quelques simplifications de manière à diminuer le temps de calcul. Le logiciel propose deux modes de calcul principaux selon le besoin de précision de la modélisation. Pour la plupart des situations, l'équation de Barré de Saint-Venant en deux dimensions est utilisable avec la possibilité d'ajouter les effets de Coriolis ou de turbulence à l'équation de conservation de la quantité de mouvement. Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont donc présentées respectivement comme ci-dessous :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0$$

Où u et v sont les composantes respectives des directions x et y de la vitesse, H est la hauteur d'eau et q est une arrivée ou une perte de débit.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \end{aligned}$$

Où c_f est la friction, ν_t le coefficient de turbulence et f le paramètre de Coriolis.

Elle peut également s'écrire en une seule équation sous la forme vectorielle :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -g \nabla H + \nu_t \nabla^2 V - c_f V + f_k \times V$$

L'autre possibilité est la résolution via l'équation de diffusion d'ondes en deux dimensions. Cette dernière simplifie l'équation de conservation de la quantité de mouvement en partant du principe qu'en eau peu profonde, les forces de frottement et de gravité contrôlent le flux. Dès lors, les termes d'advection, de turbulence et les forces de Coriolis peuvent être négligés. Autrement dit, le débit est contrôlé par le gradient de pression et contrebalancé par les forces de frottement. Cette simplification peut ensuite être intégrée à la conservation de la masse afin de ne définir le modèle que par une seule équation nommée la diffusion d'onde en eau peu profonde (*Diffusion-wave approximation of the Shallow Water Equation – DSW*) et se note :

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad \text{Avec} \quad \beta = \frac{(RH)^{5/3}}{n|\nabla H|^{1/2}}$$

Cette seconde équation est celle proposée par défaut par le logiciel et est utilisée dans le cadre de cette étude.

Ensuite, à l'inverse de la modélisation unidimensionnelle, l'algorithme utilisé n'est plus celui des différences finies mais bien celui des volumes finis qui permet au programme d'être plus robuste. Il est cependant toujours basé sur un schéma de résolution implicite.

Concrètement, la modélisation réalisée ici est une combinaison entre la modélisation unidimensionnelle pour le lit mineur des canaux comme modélisé ci-avant et bidimensionnelle pour le lit majeur et les parcelles. Pour ce faire, les canaux principaux sont repris sur toute la plaine et des structures latérales sont mises en place tout le long de ceux-ci sur chaque rive. Ces structures

sont connectées à de nouvelles zones de stockage en deux dimensions où un maillage structuré de 5m sur 5m y est appliqué. Des lignes de ruptures ont également été ajoutées au maillage afin d'apporter plus de précision aux emplacements des canaux secondaires. Le schéma Figure 17 montre la construction du modèle.

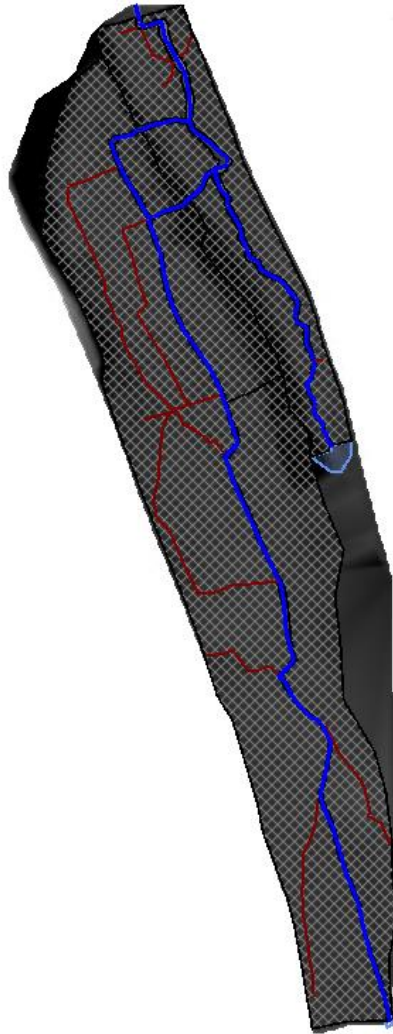


Figure 17 – Interface RASMapper de la modélisation en deux dimensions. Ligne bleue : Canaux modélisés en une dimension, ligne rouge : ligne de rupture représentant les drains secondaires, quadrillage : maillage des zones de stockage en deux dimensions.

Les paramètres et coefficient choisis pour cette simulation ont été calibrés au préalable et seront repris dans la partie E des Résultats et Discussions. Le coefficient de Manning des mailles est défini à 0,06. Les résultats aux emplacements des sondes seront ensuite récupérés afin de les comparer aux données expérimentales et aux résultats obtenus avec le modèle unidimensionnel.

Résultats et Discussions

I. Accumulation de l'eau dans la plaine

Le premier objectif de ce travail de fin d'étude est de modéliser la plaine en phase d'admission d'eau de mer. Il a donc été nécessaire de créer une infrastructure capable d'accumuler l'eau au sein de la riziculture de mangrove et prendre des mesures de l'élévation de la surface de l'eau afin de s'assurer de son efficacité et d'observer la dynamique réelle de la propagation de l'eau dans la plaine. Le premier résultat présenté à la Figure 18 est la conséquence de l'installation des vannes à clapet lors de la phase d'admission des marées d'équinoxe. Les marées basses ne sont pas représentées totalement sur ce graphe car elles empêchent une bonne lisibilité mais, à titre d'information, les amplitudes varient entre 2,1m au début de la phase jusqu'à 3,8m à la fin.

Globalement, l'accumulation d'eau se déroule bien dans toute la plaine. Les sondes plus proches de l'ouvrage principal, c'est-à-dire Ouvrage plaine, Ouvrage 2 passes, Ouvrage 3 passes et Séguéma, ont des tracés similaires avec des montées du niveau d'eau rapides en concordance avec les marées et des redescende progressive jusqu'à la marée suivante. Les sondes de Kankoussaya, plus éloignées du point d'entrée d'eau de mer, réagissent différemment. D'abord, la sonde Kankoussaya 1, proche des sondes Ouvrages deux et trois passes, a le même rythme de fluctuations selon les marées entrantes. Cependant, les pentes de montées s'avèrent moins raides que les sondes précédentes et démarrent avec un léger retard. Ensuite, l'élévation de l'eau de la sonde Kankoussaya 2 n'arbore presque plus le rythme variable des marées et monte progressivement tout au long de la phase d'admission. Un léger soubresaut est observable aux environs du 7 mars dans la matinée mais doit probablement être dû à une obstruction du capteur piézométrique lors de l'arrivée d'eau. Enfin, l'eau n'arrive à la sonde Kankoussaya 3, la plus distante des ouvrages, qu'aux environs du 11 mars et semble adopter une montée du niveau d'eau régulière à l'instar de la sonde Kankoussaya 2.

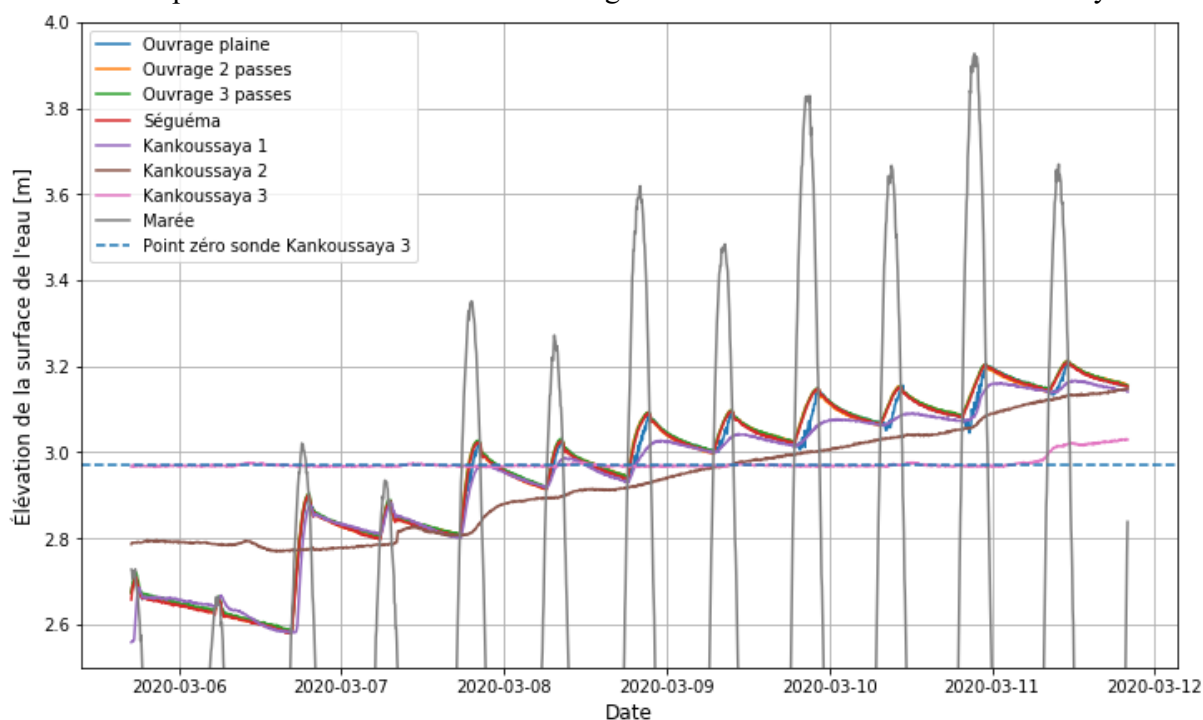


Figure 18 - Mesure des élévations de surface d'eau par les sondes durant la phase d'admission.

Ces premiers résultats permettent d'observer la différence des dynamiques de propagation de l'eau selon l'éloignement du point d'entrée. En effet, les sondes les plus proches sont fortement influencées par les mouvements de marées et ont un régime cyclique de montée avec la marée et s'ensuit une descente légère due principalement à la propagation de l'eau dans la plaine et également

au débit de fuite des vannes à clapet. A l'inverse, les sondes les plus éloignées ne font qu'augmenter avec une pente plus faible car elles sont moins soumises aux forces de poussées des marées et ne subissent donc que la propagation de l'eau qui s'avère plus lente et progressive.

Il est également possible d'observer le temps de propagation de l'eau au sein de la plaine. Les niveaux d'eau donnés par les sondes de Kankoussaya montrent effectivement que plus la sonde est éloignée de l'entrée d'eau, plus le début de la montée d'eau est décalé.

Les sondes de Kankoussaya 1 et 2 indiquent une montée d'eau plus rapide avec la marée du soir du 10 mars. Cette légère augmentation est due à une entrée d'eau de mer par la digue HIMO qui a directement pu inonder la plaine de Kankoussaya. Les données sur cette plaine après le 10 mars sont donc surestimées et, par conséquent, les données de la sonde Kankoussaya 3 ne sont pas prises en compte pour la suite des étapes ci-dessous. Elles sont néanmoins représentées pour comparer les temps de propagation et l'arrivée d'eau.

Enfin, la vanne à clapet a bien permis une accumulation d'eau au cours du temps et cela laisse supposer qu'au vu de la montée d'eau d'une seule marée, la vanne à clapet permet une meilleure entrée d'eau dans la plaine que la technique actuelle consistant à utiliser les batardeaux pour intercepter la plus grande marée.

II. Modélisation

Afin d'observer l'impact des différentes structures d'HEC-RAS, trois modèles ont été créés et ont été présentés dans la section B de la partie Matériel et Méthode. Les résultats de chacune de ces trois modélisations vont d'abord être présentés individuellement. Ensuite, une comparaison des impacts de chaque structure des modèles sera discutée. Par soucis de lisibilité et étant donné que les sondes des trois ouvrages et celle de Séguéma sont similaires, seuls les graphiques de la sonde Ouvrage plaine, Kankoussaya 1, 2 et 3 seront représentés dans cette section. Les Figures présentent dans cette section précisent également l'élévation réelle du fond du drain pour la sonde de Kankoussaya 3 étant donné que des fentes de 5 cm ont été ajoutées ainsi que l'élévation de la sonde afin de préciser que ces sondes ne savent donc pas mesurer l'élévation de l'eau en deçà de cette altitude. Les autres graphes sont visibles en Annexe 2.

Pour rappel, ces trois modèles ont été réalisés avant la calibration et ont donc tous les mêmes valeurs de coefficient de rugosité, de déversement latéral et de paramètres d'entrée et sortie des ouvrages.

A. Modèle I

Le premier modèle créé sur HEC-RAS comprend la totalité du réseau de drains des deux plaines. Il s'agit du modèle le plus simple car il ne comprend que les structures des ouvrages, les drains et une grande aire de stockage reprenant l'ensemble des deux plaines. L'eau de mer ne peut entrer que via l'ouvrage régulateur principal et ne peut quitter le réseau de canaux que vers la zone de stockage par une des trois extrémités des drains.

La Figure 19 montre que le modèle réalise des montées et descentes bien plus grandes que celles faites réellement. Ce phénomène s'explique par le fait qu'il n'y ait pas d'échange entre les canaux et les plaines de stockage en dehors des extrémités. En effet, les limites des sections transversales agissent comme des murs au travers desquels l'eau ne peut pas s'échapper. Dès lors, l'afflux d'eau important créé par la marée provoque une vague de propagation dans les drains qui ne peut s'échapper que via l'extrémités de ceux-ci.

Ensuite, comme observé ci-dessus, le niveau d'eau moyen (sans prendre en compte les pics) ne correspond pas non plus à la réalité. Cela provient du fait qu'il n'y ait pas de possibilités d'entrée d'eau au sein du système modélisé en dehors de celle présente à l'ouvrage. De plus, l'onde arrivant aux extrémités des drains est assez conséquente et représente une perte importante d'eau qui ne pourra entrer à nouveau dans le système.

Enfin, il est tout de même possible d'observer une dissipation des pics en s'éloignant du point d'entrée d'eau. Cela peut être dû à la rugosité des drains et aux forces de frottement qu'ils génèrent, aux pertes de charges dues aux ouvrages régulateurs ou encore à la dissipation de l'eau dans les drains secondaires.

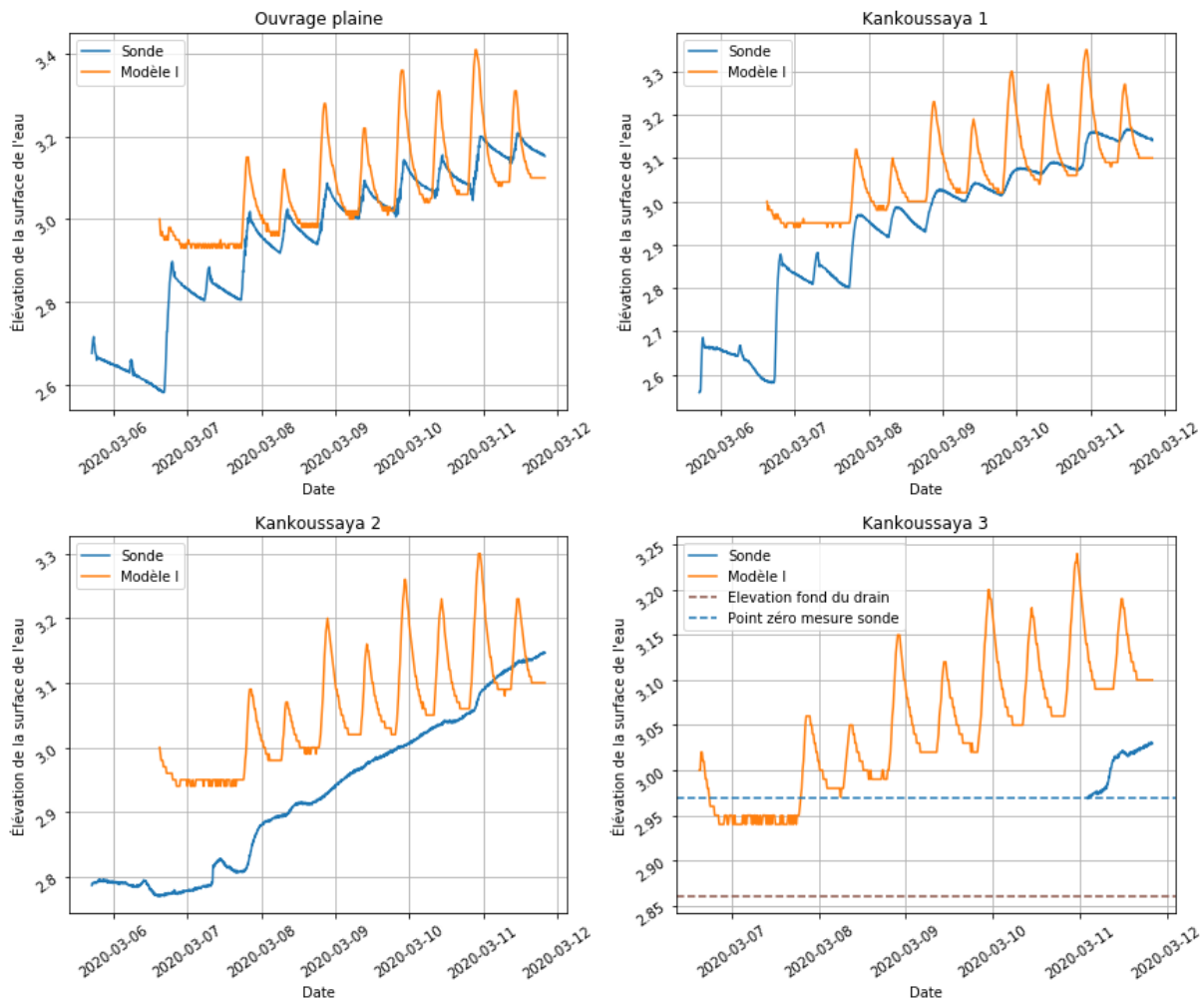


Figure 19 – Comparaison entre la simulation du Modèle I et l'élévation de l'eau mesurée par les sondes.

Le modèle unidimensionnel sans échange possible d'eau avec les zones de stockage s'avère irréaliste dans ce cas. Il peut cependant être intéressant de l'utiliser pour isoler les effets de dissipation dus aux drains secondaires ou à la rugosité des canaux.

B. Modèle II

Le modèle II est le modèle le moins stable mais potentiellement le plus ressemblant à la réalité du point de vue de la conception des drains. En effet, bien que le réseau de canaux soit diminué, il possède en tout point des structures latérales sur chacune de ses rives qui lui permettent de se déverser latéralement dans les zones de stockage. Dans ce cas-ci, les résultats de la modélisation de l'emplacement de Kankoussaya 3 n'ont pas pu être récupérés étant donné que les drains ont été raccourcis au niveau de la sonde Kankoussaya 2.

Les résultats à la Figure 20 montrent que la simulation approche mieux la réalité que le premier modèle. Cette meilleure correspondance est en grande partie due aux structures latérales ajoutées au modèle. Celles-ci permettent à l'eau de quitter les canaux en se déversant dans les zones de stockage et le modèle représente alors la réalité. Cependant, bien que plus fidèle à la réalité que le précédent, ce modèle n'est pas parfait. Les redescentes des pics à l'Ouvrage plaine diminuent trop rapidement alors que les sondes Kankoussaya 1 et Kankoussaya 2 indiquent que les pics de marées

sont trop faibles et l'accumulation d'eau n'est pas assez rapide. Cela peut être dû à une dissipation de l'eau trop rapide vers les zones de stockage induite par un nombre de structure latérale trop important. En effet, le débit se déversant dans la plaine par ces structures est calculé selon la hauteur d'eau dépassant le déversoir et est proportionnel à la longueur de ce dernier. Si le nombre de structures augmente, le débit se déversant dans les zones inondables croît également et l'eau quitte trop rapidement les drains.

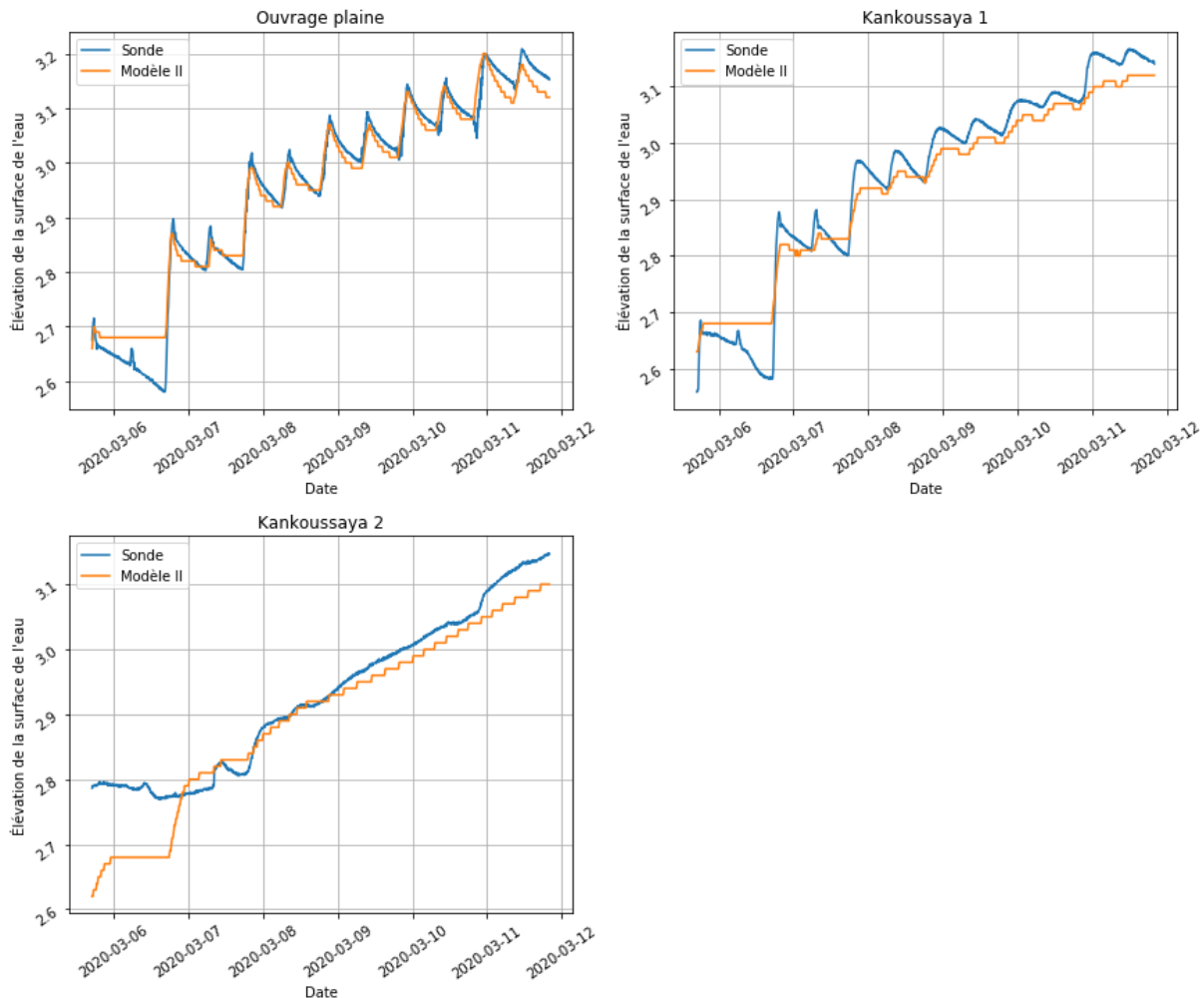


Figure 20 - Comparaison entre la simulation du Modèle II et l'élévation de l'eau mesurée par les sondes.

Ce modèle met en évidence l'importance des transferts d'eau entre les canaux et les zones de stockage mais est cependant trop instable pour être utilisé dans la suite de ce travail. En effet, les structures latérales peuvent créer des oscillations et rendent le modèle instable face aux changements.

C. Modèle III

Le troisième et dernier modèle créé reprend les mêmes drains que le second modèle auxquels l'amont des drains principaux a pu être ajouté grâce à la mise en place d'une fente de 5cm au fond du drain. L'élévation réelle de l'eau dans le drain de la sonde Kankoussaya 3 ne commence donc qu'à partir de 2,87m. Ensuite, les structures latérales ont également été minimisées afin de ne représenter que les débordements latéraux évidents. C'est un compromis intéressant entre les deux modèles précédents car il offre une stabilité suffisante grâce au nombre de structures réduit et permet de réaliser la calibration tout en assurant une certaine fidélité à la réalité. Les résultats de cette modélisation sont visibles à la Figure 21.

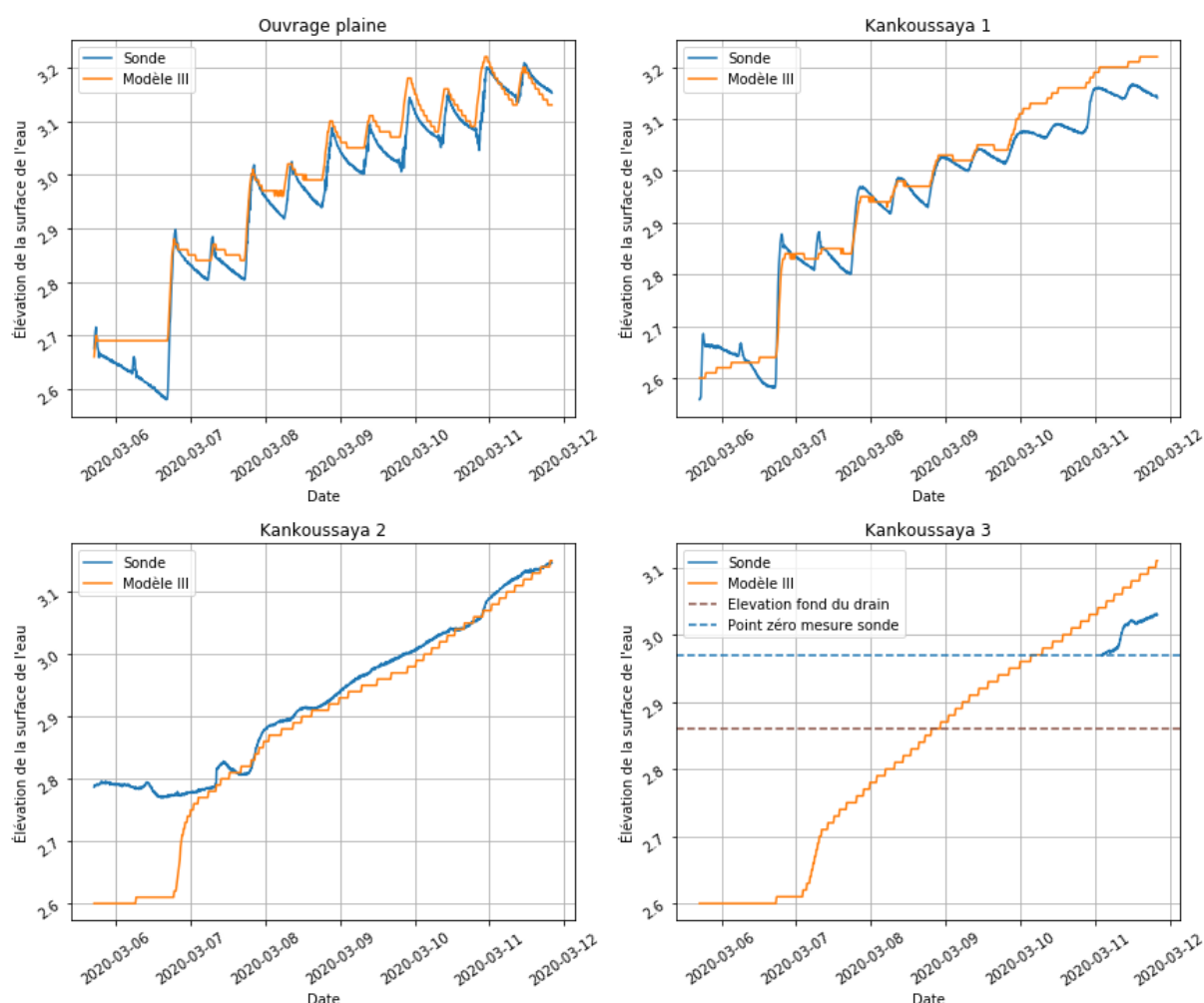


Figure 21 - Comparaison entre la simulation du Modèle III et l'élévation de l'eau mesurée par les sondes.

Les résultats montrent en effet que les courbes sont semblables à celles données par le Modèle II avec moins de précisions notamment pour les redescentes aux emplacements de l'Ouvrage plaine et de Kankoussaya 1. En revanche, Kankoussaya 2 est bien aligné sur les données réelles et, enfin, l'eau arrive trop rapidement au niveau de Kankoussaya 3 par rapport aux données mesurées.

Ces résultats sont intéressants à comparer avec le modèle précédent car ils permettent de mettre en évidence l'impact du nombre de structures latérales sur la modélisation. Premièrement, les descentes de pics de la sonde Ouvrage plaine sont trop lente pour la presque totalité de la simulation et les modélisations aux sondes de Kankoussaya 1 et 3 montrent toutes les deux qu'il y a de l'eau excès arrivant dans le canal. Cela laisse supposer que l'eau ne se dissipe pas assez rapidement dans les canaux et vers les zones de stockage proches de l'ouvrage. La comparaison confirme bien que plus il y a de déversoirs, plus la dissipation de l'eau vers les zones inondables est favorisée et que dans ce cas-ci, ils ne sont plus assez nombreux et l'eau ne peut donc pas se propager correctement. Enfin, cette modélisation correspond mieux à la sonde Kankoussaya 2 que la précédente ce qui signifie qu'il y a un équilibre des déversoirs en amont et en aval qui permet une propagation de l'eau adéquate à cet emplacement.

En résumé, alors que la simulation précédente semble avoir trop de déversoirs qui dissipent un surplus d'eau dans les zones de stockage, celle-ci semble manquer de déversoirs car elle révèle les effets inverses du Modèle II.

D. Impact des structures

La comparaison de ces trois modèles permet de tirer des conclusions sur l'influence des structures et leur nombre.

Tout d'abord, l'une des structures jouant un rôle capital semble être la structure latérale. Elle permet à l'eau de se dissiper hors des canaux en agissant tel un déversoir sur les extrémités des sections transversales. Sans elle, et sans autre structure permettant l'échange avec les plaines, le Modèle I montre que la simulation n'est pas rationnelle car il en ressort des ondes de propagation allant jusqu'à 30 cm et les échanges entre les canaux et les aires de stockage sont impossibles. Cependant, bien qu'essentiel, il est difficile de trouver le juste équilibre permettant de conserver la quantité d'eau réelle dans les drains. Cet équilibre peut être trouvé en ajustant soit le nombre de déversoirs soit en modifiant le coefficient de déversement qui régule le débit sortant. Les effets du nombre de structures sont visibles en comparant les Modèle II et III et peuvent être interprétés grâce aux formules utilisées par HEC-RAS. Celles-ci calculent le débit de déversement latéral selon le coefficient de déversement, la hauteur d'eau au-delà de la structure et la longueur de celle-ci. L'augmentation du nombre de structure ou de leur longueur implique un plus grand débit quittant les canaux vers les zones inondables et donc une perte de quantité d'eau au sein du système. Quant aux conséquences du changement de coefficient de déversement, elles seront abordées lors de l'analyse de sensibilité au point suivant.

Ensuite, un autre changement important entre les différents modèles est la réduction du réseau de drains de la plaine. D'une part, le Modèle I est le seul représentant la plaine en entier mais n'a malheureusement pas de structures latérales car celles-ci le rendent instable. Le graphe de cette simulation permet néanmoins de remarquer que ce réseau de drains dissipe potentiellement une partie de la vague de propagation car cette dernière diminue fortement entre l'aval et l'amont de la plaine. Toutefois, cette dissipation est également due aux forces de frottement des canaux et aux pertes de charges diverses lors des traversées des ouvrages régulateurs. Au vu des résultats actuels, il n'est donc pas possible d'isoler l'influence du réseau de canaux. D'autre part, bien que les Modèles II et III ne représentent pas entièrement les canaux, une partie de cette dissipation au travers de drains secondaires est normalement toujours présente car les jonctions entre les drains principaux et secondaires sont toujours d'actualité dans ces modèles. Il est d'ailleurs probable que la dissipation soit même surestimée étant donné que la longueur des drains secondaires arrivant dans les zones de stockage est raccourcie. Les pertes de charge provenant des frottements de ces canaux sont donc diminuées. Il pourrait être intéressant de comparer l'impact de ces canaux supplémentaires en réalisant un nouveau modèle sans structure latérale avec des canaux réduits pour isoler cet effet.

Enfin, les dernières structures mises en place sont les ouvrages régulateurs. La comparaison entre la marée en aval de l'ouvrage et l'eau entrant réellement dans la plaine (Figure 18) montre bien que l'ouvrage principal influence énormément l'admission. Les modélisations réalisées semblent également bien reprendre cet impact. Cependant, les influences respectives des ouvrages principaux ou au sein même de la plaine n'ont pas été testées dans le cadre de cette étude. Il pourrait, par exemple, être intéressant d'observer l'impact des ouvrages à deux et trois passes sur la propagation de l'eau dans le bloc de Kankoussaya.

Ces comparaisons ont montré que la construction du modèle peut énormément influencer le résultat final de la modélisation, notamment l'impact des structures latérales dans le cadre de cette étude. HEC-RAS propose de nombreuses structures aux caractéristiques variables et il est donc important de prendre connaissance de ces différentes possibilités avant de créer un nouveau système afin que celui-ci corresponde au mieux à la réalité. Cependant, ces structures dépendent de paramètres qui peuvent également fortement influencer les résultats et il est donc primordial de connaître les effets de ces paramètres ou de connaître leur signification pour réaliser un modèle adapté.

III. Analyse de sensibilité

Comme présenté au point C du Matériel et méthode, une analyse de sensibilité a été réalisée sur les paramètres et coefficients des drains, des ouvrages régulateurs et des structures latérales. Les résultats de cette analyse sont présentés sur le Tableau ci-dessous.

Tableau 2 – Résultat de l'analyse de sensibilité.

	Paramètre/coefficient	Valeur de sensibilité (s_p) [10⁻⁴]
Modèle complet	Coefficient de Manning des drains (n)	50,51
	Coefficient de déversement latéral (Cd)	23,55
Ouvrage régulateur principal	Coefficient de Manning des ouvrages (n)	1,52
	Coefficient d'entrée (k_{in})	1,73
	Coefficient de sortie (k_{ex})	1,62

D'abord, en observant le système dans son entièreté, l'analyse révèle que le coefficient de Manning est, de loin, le paramètre avec la plus grande influence sur le modèle. Ce résultat semble normal étant donné que ce paramètre est le seul utilisé à chaque section transversale et, au vu de la longueur des canaux, la rugosité influe sur la quasi-totalité du modèle.

Le coefficient de déversement latéral montre également une sensibilité assez élevée. Celle-ci doit toutefois être différenciée du nombre de structures latérales vu auparavant. En effet, l'analyse de sensibilité se réalise sur un nombre de structure fixe et seul le coefficient régulant le débit passant par-dessus les déversoirs est pris en compte.

La Figure 22 et la Figure 23 montrent respectivement les influences du coefficient de Manning et du coefficient de déversement sur la modélisation aux emplacements des sondes de l'Ouvrage plaine et de Kankoussaya 1. Les résultats aux autres sondes sont visibles en Annexe 3 et 4. Dans les deux cas, lorsque les coefficients sont diminués de 5%, il n'y a pas de différence visible par rapport au paramètre initial. L'augmentation de 5% crée une différence bien plus marquée.

Premièrement, le coefficient de rugosité montre des différences par rapport à la valeur initiale de 0,03. D'une part, le niveau d'eau modélisé à la sonde Ouvrage Plaine est légèrement supérieur à celui de la sonde et du modèle initial et la descente du niveau d'eau est amortie au milieu de la phase d'admission. Cet amortissement peut être interprété comme le fait que le coefficient est trop élevé et les forces de frottement freinent la propagation de l'eau. L'eau s'accumule donc en excès dans cette zone. D'autre part, le modèle avec le coefficient de rugosité augmenté de 5% semble plus approprié à la sonde Kankoussaya 1. La courbe orange suit mieux les fluctuations réelles du niveau d'eau perçu par la sonde alors que les autres ne suivent plus les variations dues aux marées dès le 9 mars et le niveau d'eau est trop important. Cela signifie que lorsque le coefficient de Manning est diminué, l'eau arrive plus rapidement aux sondes éloignées car les drains sont plus lisses et il y a moins de frottement. La propagation de l'eau est donc freinée et, de ce fait, cela maintient le régime fluctuant des marées.

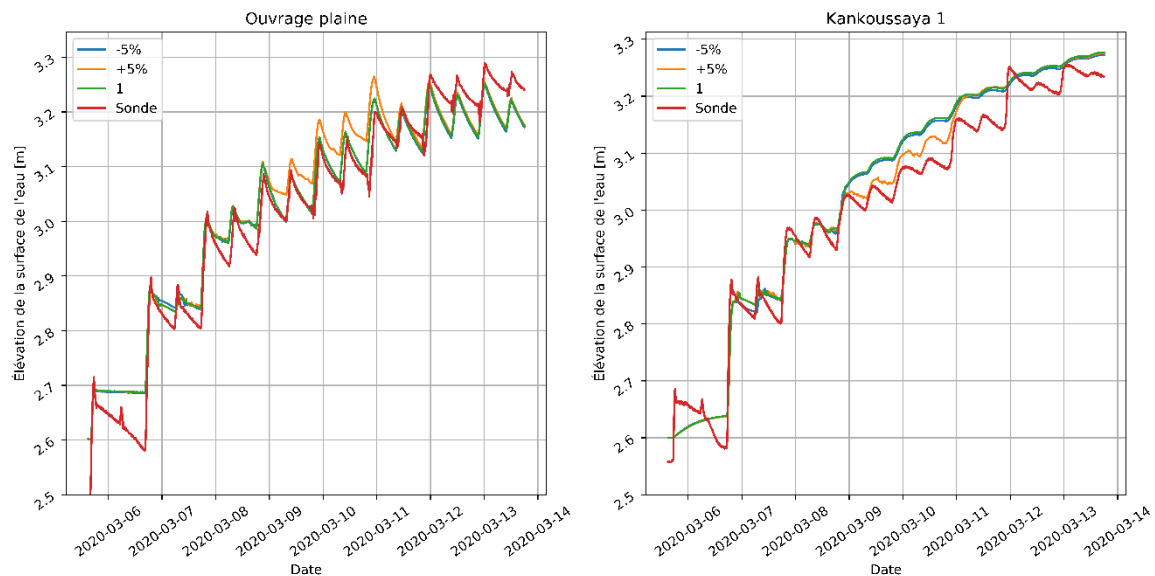


Figure 22 – Résultat de l’analyse de sensibilité du coefficient de Manning.

Les changements du coefficient de déversement (Figure 23) apportent des résultats similaires. Lorsque le coefficient augmente de 5%, le débit quittant les canaux vers les zones de stockage augmente car ce débit est proportionnel au coefficient de déversement selon la formule au point c) du Matériel et méthode. Les zones proches de l’entrée d’eau de mer seront donc plus vite saturées en eau et l’eau arrivera moins rapidement auprès de la sonde Kankoussaya 1.

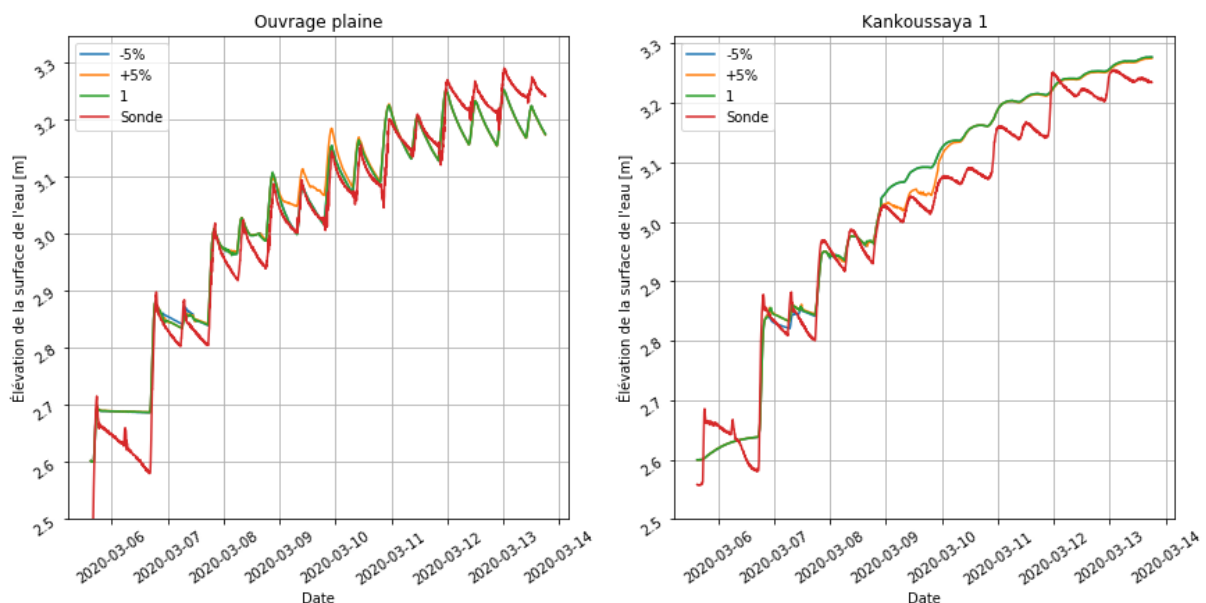


Figure 23 - Résultat de l’analyse de sensibilité du coefficient de déversement.

Les résultats des analyses de sensibilité des paramètres propres aux ouvrages régulateurs sont beaucoup plus faibles et ne montrent visuellement pas de différences significatives en comparaison avec les valeurs initiales.

Cette analyse permet donc de constater que les deux paramètres les plus influents, les coefficients de Manning et de déversement, agissent tous deux de manière assez similaire sur la propagation de l’eau dans les canaux. Cependant, les mécanismes derrière ces résultats sont assez différents. D’un côté, par sa formule, le débit est inversement proportionnel au coefficient de Manning. Cela signifie que lorsque le coefficient de rugosité augmente, le débit diminue et ralentit la propagation

de l'eau. Elle s'accumule alors aux environs du point d'entrée d'eau et est donc plus sujette aux fluctuations des entrées de marées. Alors que lorsque les surfaces des canaux sont plus lisses, donc que le coefficient diminue, l'eau circule plus facilement à des distances plus lointaines et la propagation n'est donc pas freinée et se propage rapidement au sein des drains.

D'un autre côté, le débit passant par-dessus les structures latérales est proportionnel au coefficient de déversement. Plus ce dernier est important, plus les échanges entre les zones de stockage et les canaux seront importants. Cela induit que l'eau entrant dans la plaine, plutôt que de se propager rapidement dans les canaux et aller vers l'amont, risque de rejoindre la première zone de stockage disponible et va donc ralentir la propagation de l'eau. Cependant, comme dit auparavant, les structures latérales dépendent aussi de leur nombre et leur longueur qui influence également le débit quittant les canaux.

IV. Calibration

L'analyse de sensibilité et la comparaison des Modèles II et III mettent en évidence que les paramètres des structures latérales (la longueur et le coefficient de déversement) et le coefficient de rugosité influencent de manière similaire la propagation d'eau dans les drains. Cependant, le débit sortant par les structures latérales est dépendant des autres paramètres. En effet, étant donné que le coefficient de Manning est inversement proportionnel au débit, lorsqu'il diminue, le débit augmente et l'eau se propage plus rapidement dans les canaux. Le niveau d'eau s'élève donc moins au point d'admission et, étant donné que le débit passant par les structures latérales dépend de la hauteur d'eau, l'eau aura plus tendance à rester dans les canaux et à ne pas les quitter latéralement. A l'inverse, lorsque la rugosité augmente, l'eau est freinée par les surfaces des canaux et a tendance à s'accumuler près du point d'entrée d'eau et le niveau d'eau monte entraînant donc une plus grande échappée d'eau vers les zones de stockage. Il en est de même pour les paramètres d'entrée et sortie des ouvrages qui peuvent influencer la vitesse d'entrée d'eau au sein de la plaine et donc la hauteur d'eau.

Pour calibrer le modèle de manière optimale, les structures latérales devraient être présentes le long de tous les drains de la plaine afin de supprimer la variable de la longueur de déversoir. Cependant, les structures latérales entraînent des oscillations menant régulièrement à des instabilités trop contraignantes pour modéliser la plaine. Leur nombre doit être limité pour pouvoir réaliser la calibration et le Modèle III a donc été utilisé.

Ensuite, au vu de la dépendance du coefficient de déversement vis à vis du coefficient de Manning, ces deux paramètres fort influents devraient être calibrés simultanément afin de trouver un équilibre optimal entre la vitesse de propagation de l'eau au sein des canaux et le déversement vers les zones de stockage. Cette méthode n'a pas pu être mise en place car, en plus d'être très couteuse en temps de calcul, HEC-RAS entraîne souvent des problèmes informatiques qui ont empêché l'automatisation complète de la calibration. Ceux-ci sont causés soit à cause de l'instabilité du modèle pour certaines valeurs de paramètres, soit à cause de la retranscription des résultats qui entraîne des valeurs aberrantes ou ne retranscrit pas les résultats et empêche donc le calcul du RMSE.

La calibration a donc dû se réaliser par étape en calibrant un paramètre à la fois. Le premier paramètre est le coefficient de Manning car il s'agit du paramètre le plus influent dans la dynamique de propagation de l'eau. Ensuite, il peut être intéressant de faire varier les coefficients d'entrée et sortie qui peuvent potentiellement ajuster l'intensité des pics d'entrée. Enfin, le coefficient de déversement latéral est calibré en dernier lieu. Par conséquent, le coefficient trouvé sera adapté pour cette situation mais changera dès que le nombre ou la longueur des structures latérales sera modifié. Les valeurs de coefficient ont été choisies de manière à couvrir la gamme de valeurs des différents paramètres en les faisant varier de dix pourcents sur toute cette gamme (certaines valeurs ne sont pas présentes pour les raisons énoncées ci-dessus). Ensuite, de nouveaux coefficients autour de ceux donnant les valeurs les plus faibles ont été testées jusqu'à arriver à une valeur de RMSE visiblement

plus faible que les autres. Étant donné que la totalité de la gamme de valeur a été testée, le coefficient avec la plus faible valeur de RMSE peut être considéré comme assez proche du minimum global.

A. Coefficient de Manning (n)

Le coefficient de rugosité est le premier à être calibré. La Figure 24 montre les différents RMSE trouvés en fonction des valeurs de Manning. Cette figure confirme l'influence importante de ce coefficient par la variabilité des valeurs de RMSE. Il apparaît que globalement, le RMSE diminue quand le coefficient diminue également jusqu'à trouver un minimum à la valeur de 0,0216. Cette valeur semble assez faible pour une rivière naturelle (Tableau 1) mais il s'agit bien ici de canaux relativement droit et entretenu et cette valeur paraît donc plausible.

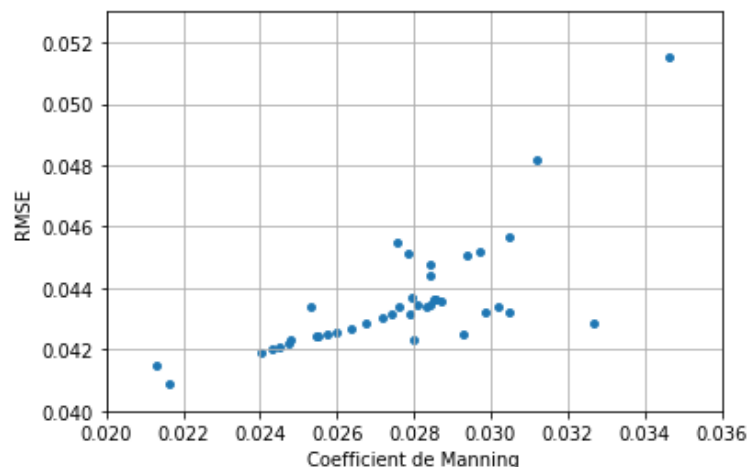


Figure 24 – Résultat des différents RMSE obtenus selon la valeur du coefficient de Manning

Comme cela a été vu avec l'analyse de sensibilité, la diminution de la rugosité entraîne une meilleure dynamique proche de l'ouvrage principal où les montées et descentes d'eau correspondent mieux à la réalité mais cela entraîne également une arrivée d'eau trop rapide aux sondes les plus éloignées. Ce défaut est néanmoins potentiellement rattrapable via la mise en place de structures latérales.

Cependant, cette calibration peut être soumise à plusieurs critiques. D'abord, comme dit auparavant, la calibration d'un unique paramètre à la fois peut entraîner une valeur de l'indice de convergence faible mais avec une réalité physique irréaliste car elle ne prend pas en compte l'influence des autres paramètres. Elle risque donc d'entraîner des erreurs lors de la réutilisation de cette valeur dans d'autres conditions (Refsgaard et al., 1990; Pappenberger et al., 2005). De plus, la valeur de Manning peut varier selon la saisonnalité car elle va conditionner l'état des canaux (Zhang et al., 2016). Par exemple, si la période est sèche et les canaux taris, il y a un risque d'infiltration beaucoup plus important qui va fortement ralentir la propagation de l'eau. La valeur de la rugosité est dès lors perçue comme trop élevée car elle prend en compte l'infiltration qui n'est normalement pas incluse dans la valeur de Manning. A contrario, lors d'une saison humide, l'eau se propage plus rapidement et le coefficient calibré est plus faible.

Finalement, dans ce cas-ci, la valeur de 0,0216 est plausible mais reste néanmoins très faible pour un canal naturel. D'autres études (Reza Ghanbargpour et al., 2011; Hameed et al., 2019; Abbas et al., 2020) ont également réalisé des calibrations sur la valeur du coefficient de Manning et ont généralement trouvé des valeurs entre 0,025 et 0,06. De plus, la partie amont du site de Kankoussaya était sèche lors de la phase d'admission ce qui devrait avoir pour effet d'augmenter la valeur du coefficient. Par ailleurs, l'étude de Ardiclioglu en 2019 a notamment démontré que la calibration du coefficient de Manning par HEC-RAS donne souvent une valeur sous-estimée.

B. Coefficient de sortie (k_{ex})

Le coefficient de sortie varie en théorie entre 0,3 et 1 où 0,3 représente un ouvrage avec une sortie d'eau progressive alors que la valeur 1 signifie une expansion soudaine. Dans le cas de la plaine de Séguéma-Kankoussaya, les sorties des ouvrages sont toutes considérées comme abrupte et le coefficient de 1 choisis par défaut est donc le plus approprié. La Figure 25 confirme que cette valeur est bien adéquate.

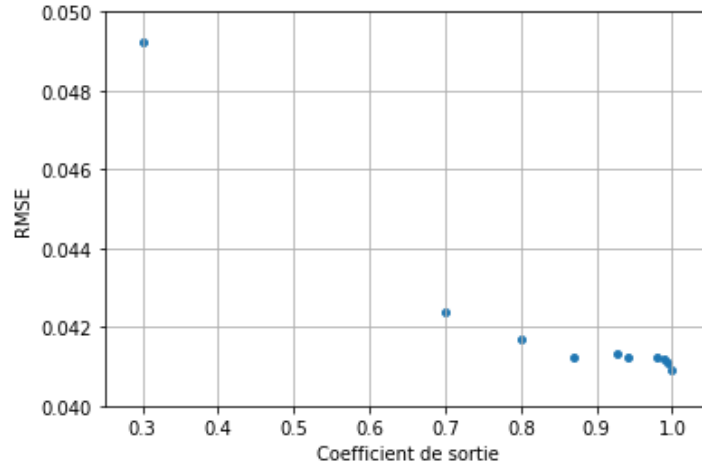


Figure 25 – Résultat des différents RMSE obtenus selon la valeur du coefficient de sortie

C. Coefficient d'entrée (k_{in})

A l'instar du coefficient de sortie, une valeur élevée du coefficient d'entrée représente également une contraction de l'ouvrage soudaine pour l'entrée d'eau. Cependant, dans ce cas-ci, HEC-RAS propose des gammes de valeurs différentes selon la forme des passes de l'ouvrage. Ceux rectangulaires varient entre 0,2 et 0,5 alors que les conduits circulaires peuvent monter jusqu'à 0,9. Les coefficients des trois ouvrages ont donc varié ensemble pour les valeurs inférieures à 0,5 et, une fois ce seuil atteint, seuls les coefficients des ouvrages à deux et trois passes circulaires ont continué d'augmenter.

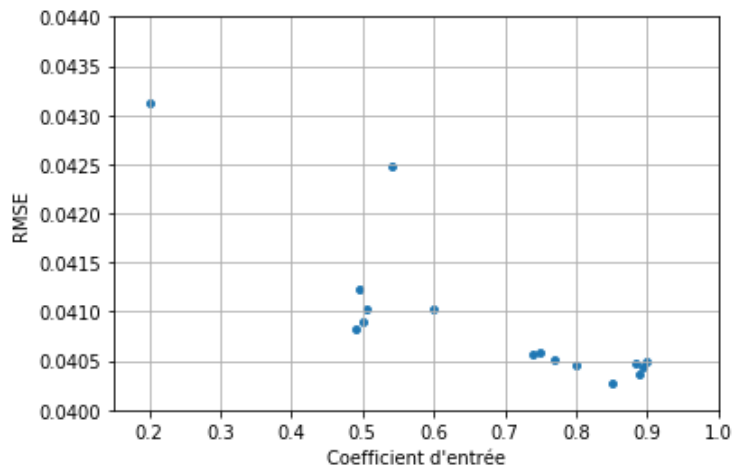


Figure 26 – Résultat des différents RMSE obtenus selon la valeur du coefficient d'entrée

La Figure 26 montre donc que la valeur de RMSE minimale obtenue est de 0,0403 pour un coefficient d'entrée de 0,85 pour les ouvrages aux passes circulaires et de 0,5 pour l'ouvrage principal.

D. Structure latérale (Cd)

Enfin, le coefficient de déversement latéral peut être calibré. Le coefficient trouvé ne sera plus utilisable dès que le nombre de déversoirs sera changé.

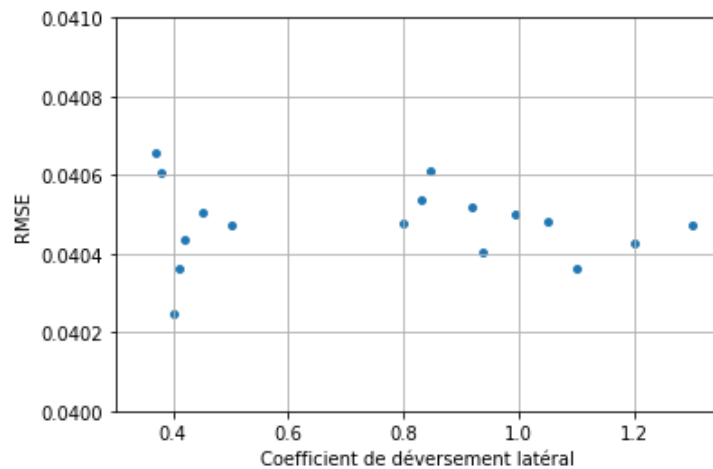


Figure 27 – Résultat des différents RMSE obtenus selon la valeur du coefficient de déversement latéral

La Figure ci-dessus montre que le RMSE minimum correspond à une valeur du coefficient de déversement de 0,4. Cependant, par rapport aux graphiques précédents, la valeur du RMSE ne varie presque pas. Ce qui signifie que le coefficient influence moins le résultat final.

Ce changement de sensibilité du coefficient est probablement lié à la valeur de Manning également changée. En effet, cette dernière a fortement diminué et la vitesse dans les canaux s'en trouve augmentée. L'effet d'accumulation d'eau dans certaine zone est donc moins présent et l'eau est moins sujette au déversement (Liu et al., 2019).

E. Modèle calibré

La Figure 28 montre que le modèle calibré correspond donc bien aux sondes en aval de la plaine où l'amplitude des montées et descentes semble convenir et il n'y a pas de décalage temporel. La modélisation de la sonde Kankoussaya 1 résulte en une courbe suivant globalement le niveau d'eau avec des fluctuations légèrement plus faibles que celles des données observées. Ensuite, l'emplacement de Kankoussaya 2 donne également un résultat satisfaisant à l'exception du début de la simulation où le canal n'était pas sec. Enfin, la modélisation de la dernière sonde montre que l'eau arrive légèrement trop tôt.

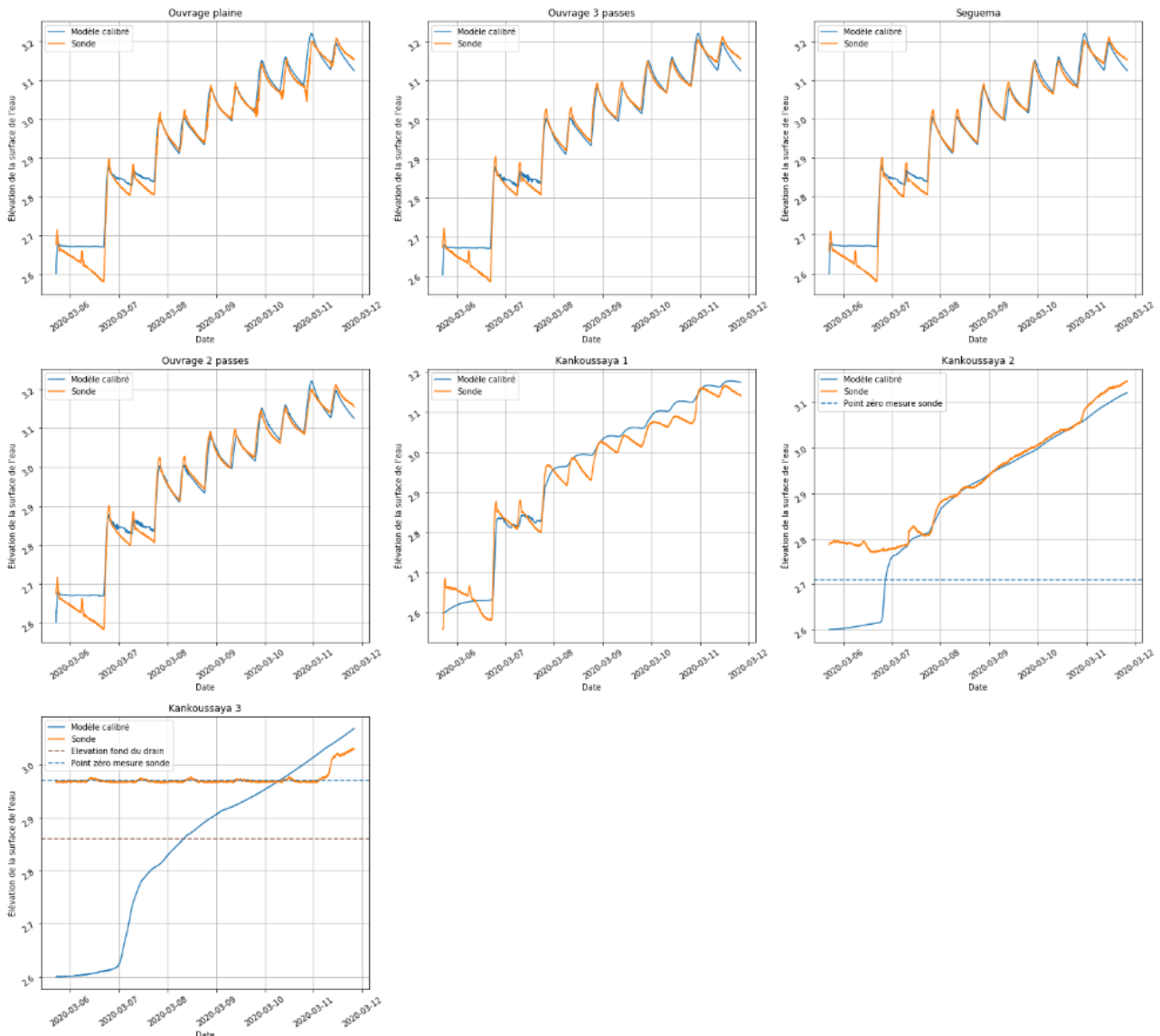


Figure 28 – Comparaison du modèle final calibré aux données expérimentales.

V. Validation

Les données calibrées ont ensuite été testées sur une autre phase de remplissage du 23 au 25 février afin de vérifier le pouvoir de prédiction sur une autre situation. Pour ce faire, le coefficient de Nash-Sutcliffe a été calculé à partir des résultats selon la méthode expliquée au point Validation du Matériel et méthode. Le coefficient obtenu est de 0,74 pour le modèle avec les valeurs par défaut et de 0,749 pour celui le modèle calibré. La différence entre les deux modèles est représentée à la Figure 29 où, à l'instar de la calibration sur la phase d'admission, le modèle calibré s'adapte mieux aux sondes proches du point d'entrée d'eau et les sondes les plus éloignées reçoivent un excès d'eau trop rapidement. Le coefficient de Nash-Sutcliffe a également été calculé pour la réelle phase d'admission du 5 au 11 mars et est égal à 0,945.

La sonde Kankoussaya 3 n'est pas représentée dans ce cas-ci car l'admission d'eau n'est pas assez importante pour que l'eau se propage jusqu'à son emplacement.

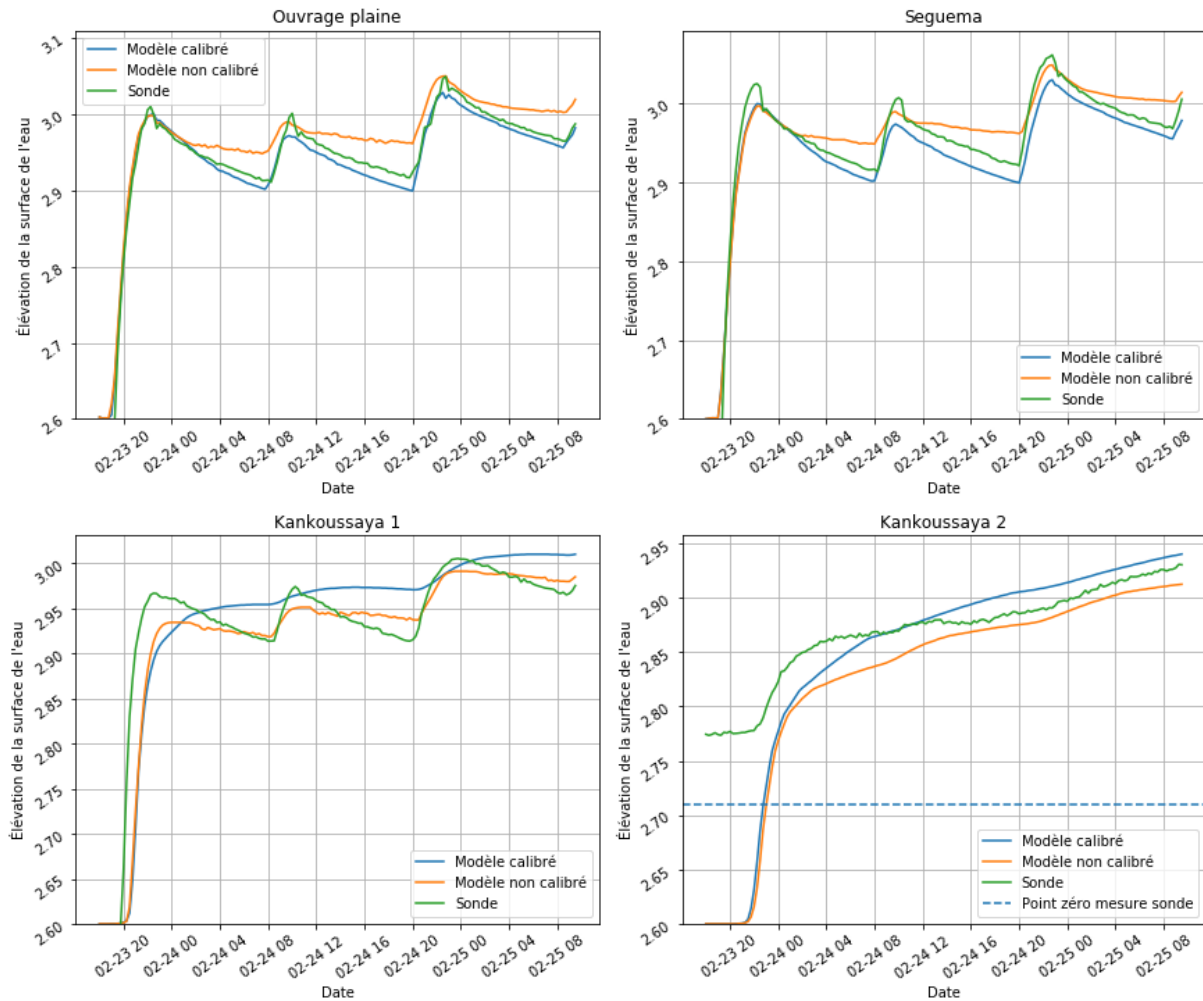


Figure 29 – Comparaison des modèles calibrés et non calibrés

Pour le modèle calibré de la réelle phase d'admission, la valeur de E_f est proche de 1 ce qui signifie que le modèle correspond à la réalité. Les valeurs obtenues pour les données de validation sont plus faibles mais il y a une légère amélioration entre le modèle calibré et celui par défaut.

Il a été démontré par McCuen et al. en 2006 que la diminution de la valeur E_f est principalement due aux valeurs aberrantes et, dans une moindre mesure, au décalage temporel et d'amplitude. Dans ce cas-ci, il n'y a visiblement pas de valeurs aberrantes mais il existe des décalages tant au niveau temporel qu'au niveau de l'amplitude. Ces décalages peuvent être dû à un choix inexact des paramètres du modèle ou dépendent des conditions initiales données. La Figure 29 montre en effet l'impact des valeurs de paramètres sur l'amplitude mais n'explique pas les décalages temporels présente aux sondes de Kankoussaya. Ceux-ci peuvent donc s'expliquer par des conditions initiales différentes lors de cette admission où le site n'avait pas été totalement vidangé au préalable. Cela permet de souligner l'importance de la connaissance du site au départ de la modélisation.

Les valeurs obtenues pour l'indice de Nash-Sutcliffe restent néanmoins très proche de 0,75 pour les données de validation et permettent de réutiliser ce modèle dans la plaine de Kankoussaya-Séguéma à condition d'avoir une bonne connaissance des données d'entrée. Il serait néanmoins intéressant de réaliser la validation sur une autre plaine pour confirmer le pouvoir prédictif de ce modèle.

VI. Modèle en deux dimensions

Le modèle en deux dimensions a été réalisée avec les paramètres trouvés par la calibration pour la période d'admission et la comparaison avec le modèle calibré en une dimension est présenté à la Figure 30.

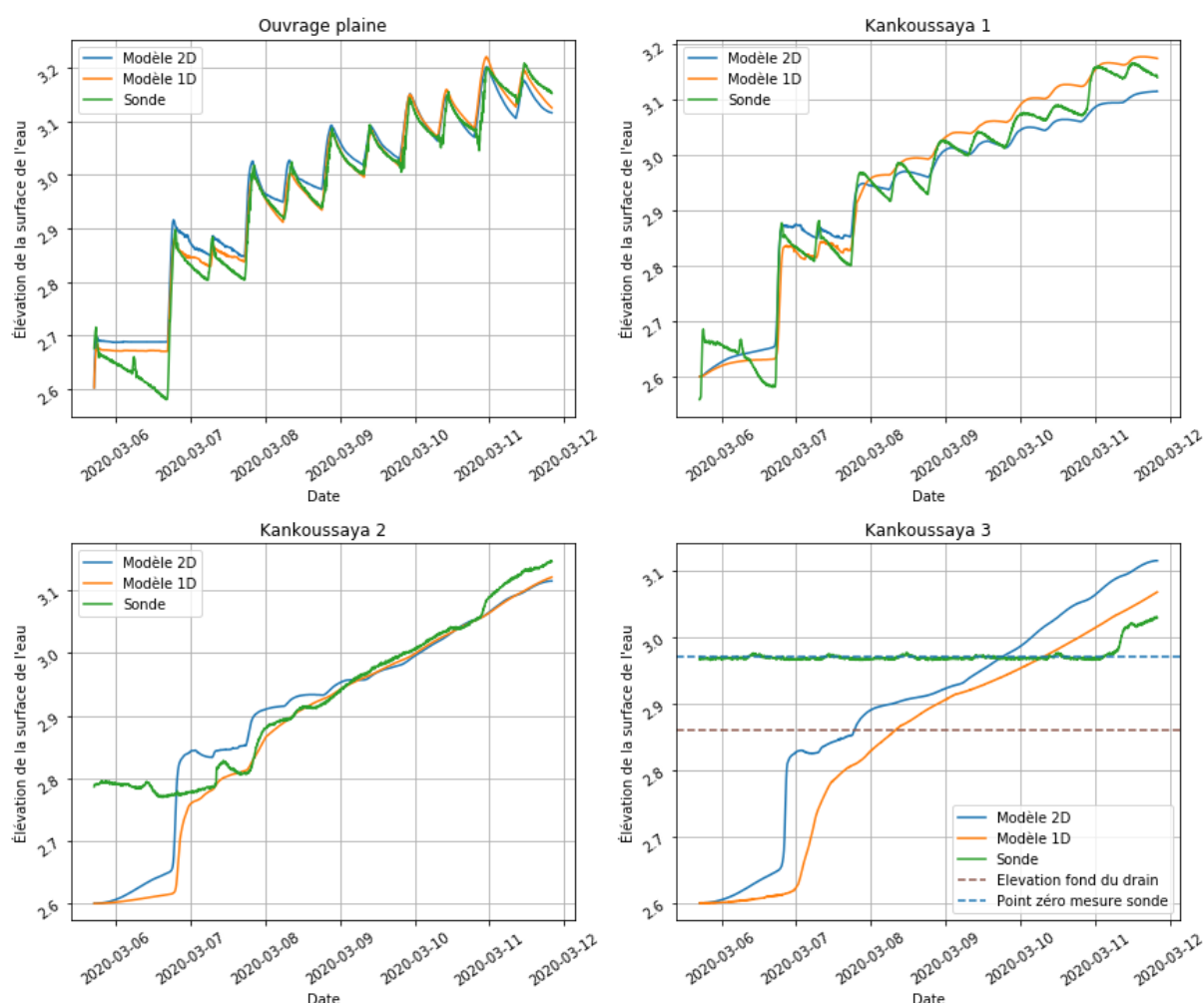


Figure 30 – Comparaison des modèles calibrés uni et bi-dimensionnels.

Ce résultat montre que le modèle calibré en une dimension semble plus adapté que celui en deux dimensions. En effet, au niveau de l'ouvrage principal, le modèle bidimensionnel montre des descentes de niveau d'eau post marée trop faible. Ensuite, alors que le modèle unidimensionnel surestime légèrement la hauteur d'eau à la sonde Kankoussaya 1, le modèle bidimensionnel semble plutôt la sous-estimer. Les deux modélisations à la sonde Kankoussaya 2 diffèrent seulement au début de la phase d'admission et s'égale à partir du 9 mars. Enfin, le modèle 2D montre une arrivée d'eau à la sonde Kankoussaya 3 en avance de plus d'un jour.

Ces résultats ne correspondent pas aux résultats trouvés dans la littérature. Les études réalisées dans ce domaine ont en effet démontré que la modélisation 2D ou le couplage 1D/2D apporte généralement plus de précision que le modèle 1D (Ahmad et al., 1999; Gharbi et al., 2016). Cette différence peut s'expliquer notamment par la calibration qui a été réalisée précédemment. Cette dernière a été réalisée en variant un paramètre à la fois de manière à faire correspondre au mieux les données de modélisation aux données expérimentales et il se peut que les valeurs trouvées ne correspondent pas à la réalité de la plaine.

De plus, les zones de stockage en deux dimensions sont présentées comme des surfaces planes et ne prennent pas en compte les nombreuses diguettes séparant les parcelles. Cette simplification peut entraîner des erreurs dans la dynamique de l'eau au sein des zones inondables car l'eau a donc plus tendance à s'étendre rapidement dans la plaine alors que la présence de diguette peut empêcher cette propagation rapide. Il serait nécessaire de compléter les données topographiques avec l'entièreté des diguettes pour représenter la réelle dynamique de l'eau dans la plaine en deux dimensions.

VII. Application du logiciel HEC-RAS dans le cadre du projet SARITEM

Pour terminer cette discussion, il est intéressant de revenir au but de ce travail de fin d'étude pour l'entreprise SHER dans le cadre du projet SARITEM. L'objectif pour ce bureau d'étude est en effet d'entrevoir dans quelle mesure le logiciel HEC-RAS pourrait être utilisé pour faciliter la mise en place ou la réhabilitation de rizicultures de mangrove.

D'abord, du point de vue de la facilité d'utilisation, HEC-RAS est un logiciel avec une interface relativement instinctive qui permet une adaptation rapide. Cependant, la création des données d'entrées telles que les données géométriques ou les conditions limites et initiales peuvent demander une réflexion plus approfondie afin de créer un modèle suffisamment conforme à la réalité de la plaine. Ce TFE a notamment montré l'importance du nombre de structures latérales et de leur longueur. Mais l'importance de ces effets peut être étendue aux autres structures proposées par HEC-RAS tels que les ponts, les structures latérales avec conduits, etc... La création du modèle demande donc une bonne connaissance du terrain et des structures proposées par HEC-RAS.

Ensuite, les coefficients ont été calibrés pour ce travail et sont donc adaptés au site de Kankoussaya-Séguéma mais, dans le cadre du projet SARITEM, les données de niveau d'eau au sein des plaines ne sont pas récupérées et il ne sera donc pas possible de réaliser de nouvelles calibrations. Cependant, comme l'ont montré les trois modèles dans la section Modélisation, un modèle non calibré fournit tout de même des résultats satisfaisants à partir du moment où il est correctement construit. De plus, HEC-RAS est couramment utilisé par la communauté scientifique et donc de nombreuses valeurs de coefficient sont fournies par la littérature selon les situations.

Une dernière fonctionnalité de HEC-RAS qui n'a pas été présentée auparavant mais qui peut être d'une grande utilité pour la création et la cartographie des plaines d'inondations est l'outil RASMapper. À partir de données topographiques, cette nouvelle interface permet de développer entièrement la géométrie de nouveaux modèles et de visualiser les résultats des simulations hydrauliques facilement. En 1D ou en 2D, les résultats peuvent être représentés sous différentes formes telles que l'élévation de la surface de l'eau, la vitesse ou encore la profondeur. Cette dernière forme permet notamment de connaître la hauteur d'eau dans les parcelles et de visualiser les surfaces inondées pour une simulation donnée.

Pratiquement, HEC-RAS peut également s'avérer très utile pour tester des scénarios d'aménagements. Deux scénarios ont donc été testés pour ce travail afin de montrer les utilisations possibles de ce logiciel dans le cadre du projet SARITEM.

A. Dimensionnement de l'ouvrage principal

Le premier scénario d'aménagement consiste à réaménager l'ouvrage principal comme à son origine, c'est-à-dire avec quatre passes et non deux. Cela permet d'observer les changements au sein de la plaine en phase d'admission et en phase de drainage. Cette dernière est cruciale lors de la saison des pluies car les infrastructures doivent être capables de drainer l'eau suffisamment rapidement pour évacuer l'excès entre deux marées hautes (environ six heures s'écoulent entre deux marées hautes). Un nombre important de passes est, la plupart du temps, l'aménagement le plus avantageux car cela permet une grande admission d'eau de mer et un drainage efficace mais cela représente également des infrastructures plus coûteuses du point de vue économique. HEC-RAS permet donc de simuler les phases d'admission comme celles de drainage afin de trouver l'optimum du nombre de passes entre efficacité et coûts.

Pour ce faire, le Modèle III calibré a été utilisé où deux passes ont été ajoutées de part et d'autre de celles déjà présentes. Le sens d'écoulement de l'ouvrage a également été inversé pour la simulation en phase de drainage. Les résultats comparant les modèles avec deux passes et avec quatre passes sont visibles à la Figure 31 et à la Figure 32.

L'augmentation du nombre de passes augmente la surface d'écoulement et le débit entrant au sein de la plaine augmente proportionnellement. Par conséquent, l'amplitude du pic lors de l'entrée de

marée est fortement influencé par le nombre d'ouverture. En effet, le graphique représentant l'emplacement proche de l'ouvrage montre que les pics de l'ouvrage à quatre passes sont supérieurs à ceux de l'ouvrage à deux passes et les descentes sont identiques. Les sondes de Kankoussaya montrent également que l'eau s'accumule plus rapidement lorsque le nombre de passes augmente.

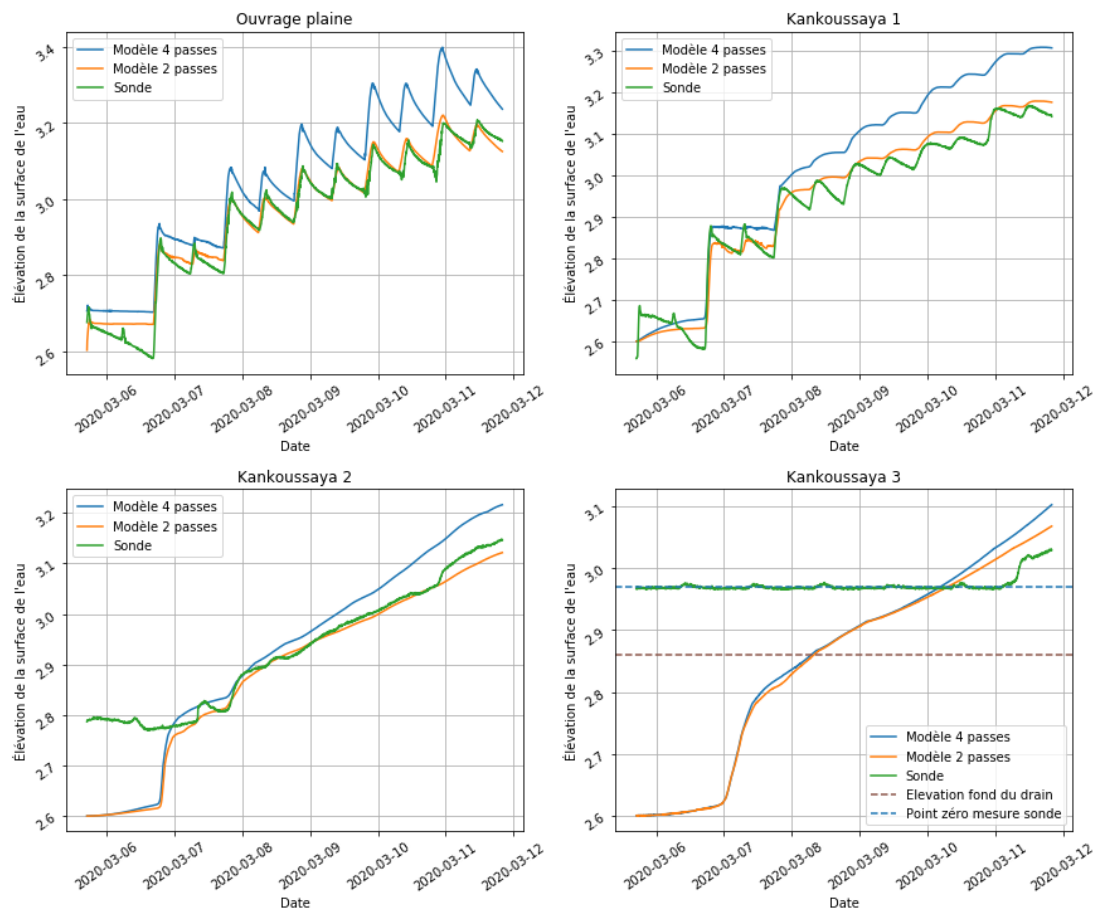


Figure 31 – Impact du nombre de passe de l'ouvrage principal sur la phase d'admission.

La seconde figure montre la diminution du niveau d'eau dans la plaine selon le nombre d'ouverture traversant l'ouvrage principal. Encore une fois, l'augmentation de la surface d'écoulement au sein des ouvrages permet d'augmenter le débit quittant la plaine. Les résultats au niveau de la sonde Ouvrage plaine le confirme car le modèle avec quatre passes arrive à une élévation de 2,4m en quinze heures alors que celui à deux passes prend six heures de plus.

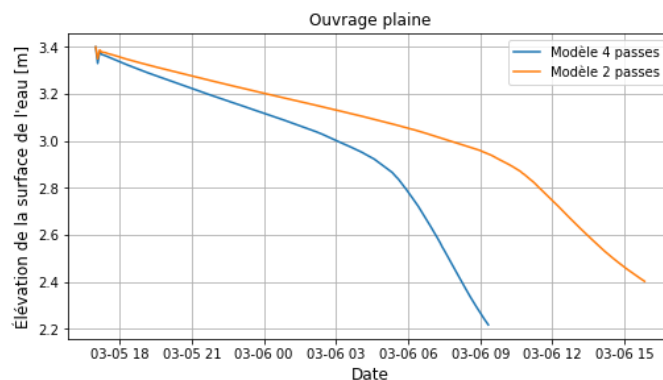


Figure 32 - Impact du nombre de passe de l'ouvrage principal sur la phase de drainage

Ces durées de 15 et 21 heures ont juste été montrées à titre d'exemple d'utilisation de HEC-RAS mais ne doivent cependant pas être retenues car le modèle n'a pas été construit pour fonctionner en phase de drainage et les structures tel que les extrémités de drains connectées aux zones de stockage ou le manque de structures latérales modifient la dynamique de l'écoulement et faussent le résultat.

B. Gestion de l'eau à la parcelle

Ensuite, le deuxième scénario va tenter de simuler la mise en place d'une gestion de l'eau à la parcelle. Actuellement, dans le site de Kankoussaya-Séguéma, l'eau est gérée principalement via l'ouvrage régulateur principal. Il permet d'admettre l'eau de mer dans la plaine en saison sèche et les parcelles sont ensuite inondées soit via le déversement par-dessus les diguettes soit via une brèche creusée dans ces dernières. En saison des pluies, le niveau d'eau de la plaine entière est également géré par l'ouvrage régulateur car les usagers n'ont pas d'infrastructures pour gérer l'eau au sein de leur propre parcelle. Cela peut occasionner des problèmes lorsque certaines parcelles avec une élévation plus faible ou plus grande se retrouvent donc inondées ou à sec. L'aménagement d'une gestion de l'eau à la parcelle par les utilisateurs peut résoudre ce problème. Pour ce faire, il est possible d'installer des tubes en PVC coudés au travers des diguettes. La simple rotation du coude permet de remplir ou vider la parcelle ou de maintenir l'eau à l'équilibre en son sein (Figure 33). Cependant, cet aménagement nécessite des diguettes correctement entretenues et suffisamment haute pour que l'eau ne se déverse pas par-dessus et également l'installation de tubes PVC les traversant.

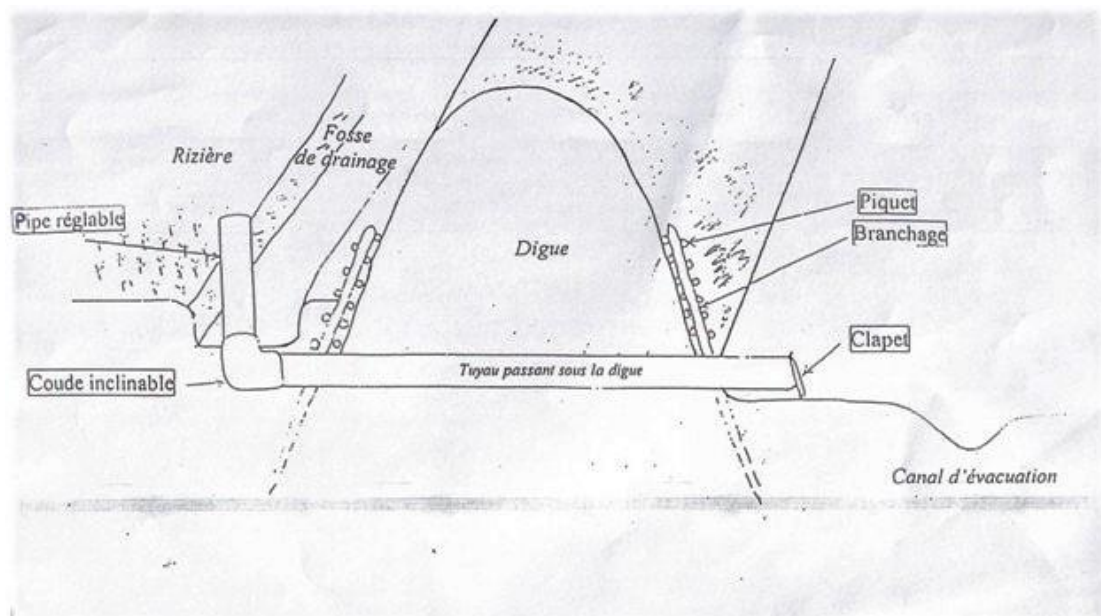


Figure 33 – Schéma de l'utilisation des tubes en PVC coudés dans le cadre de la riziculture de mangrove
(Source : <https://slideplayer.fr/slide/2495690/>)

Un nouveau modèle a donc été créé à partir du Modèle II où les structures latérales sont omniprésentes. Ce modèle a été préféré au Modèle III dans ce cas-ci car il compare l'inondation des parcelles via le déversement au-dessus des diguettes, et nécessite donc des structures latérales en grand nombre, et l'inondation via les tubes PVC.

Le modèle est identique au Modèle II à l'exception que les structures latérales ont été rehaussées à une élévation de 3,4m sur toute la plaine et des conduits de 50cm de diamètre ont été ajoutés tous les 200 m environ.

La Figure 34 montre que, du au rehaussement des rives, les courbes du nouveau modèle proches du point d'entrée d'eau créent des pics plus grands que ceux modélisé précédemment. Cela signifie que les échanges entre les canaux et les zones de stockage sont plus limités qu'avec les déversoirs

mais sont tout de même toujours présent car les montées sont plus faibles qu’avec le Modèle I. La sonde Kankoussaya 2 montre cependant que l’eau se dissipe trop à l’aval de la plaine et qu’une trop faible quantité arrive au fond du site.

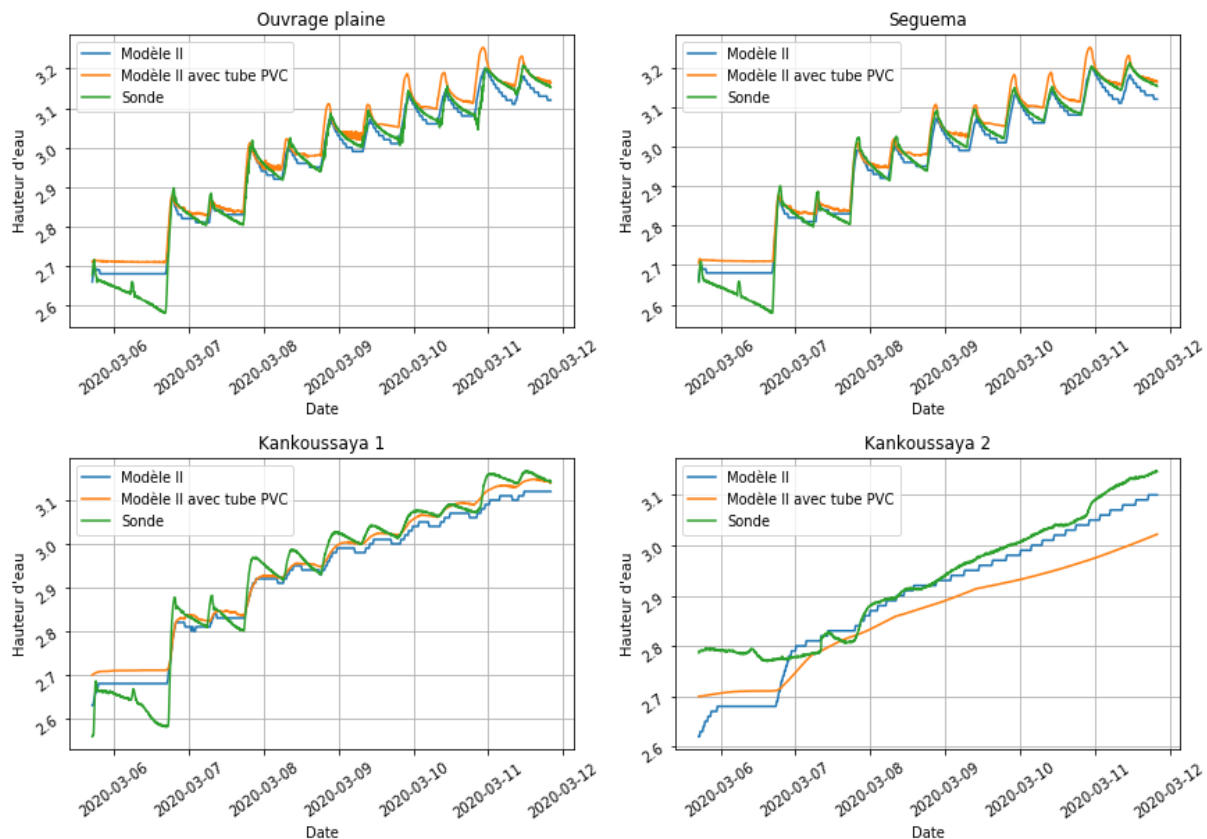


Figure 34 – Impact d’un aménagement de gestion de l’eau à la parcelle.

L’outil RASMapper peut être utilisé dans ce cas afin de visualiser les différences de remplissage selon les deux méthodes. La Figure 35 comparant les deux scénarios mets en évidence que selon la gestion de l’eau, la répartition de celle-ci est différente. L’endiguement avec des tubes PVC indique que l’eau se dissipe plus rapidement dans l’aval de la plaine où les parcelles sont inondées de plus de 15 cm d’eau alors que l’amont n’est pas suffisamment irrigué car certaines parcelles ne sont pas immergées. À l’inverse, la gestion de l’eau par surverse des structures latérales montre que l’eau se répartit plus équitablement sur toute la plaine.

Ce résultat, bien qu’intéressant, n’est pas totalement exacte car il ne prend pas en compte le fait que les usagers remontent les tuyaux coudés une fois leur parcelle suffisamment inondée. L’eau devrait donc en réalité mieux se répartir entre les parcelles grâce à cette intervention humaine. De plus, la répartition de l’eau dépend également de la taille des zones de stockage et de leur connexion entre elles. L’utilisation de zones de stockage en deux dimensions pourrait apporter dans ce cas-ci une réelle plus-value.

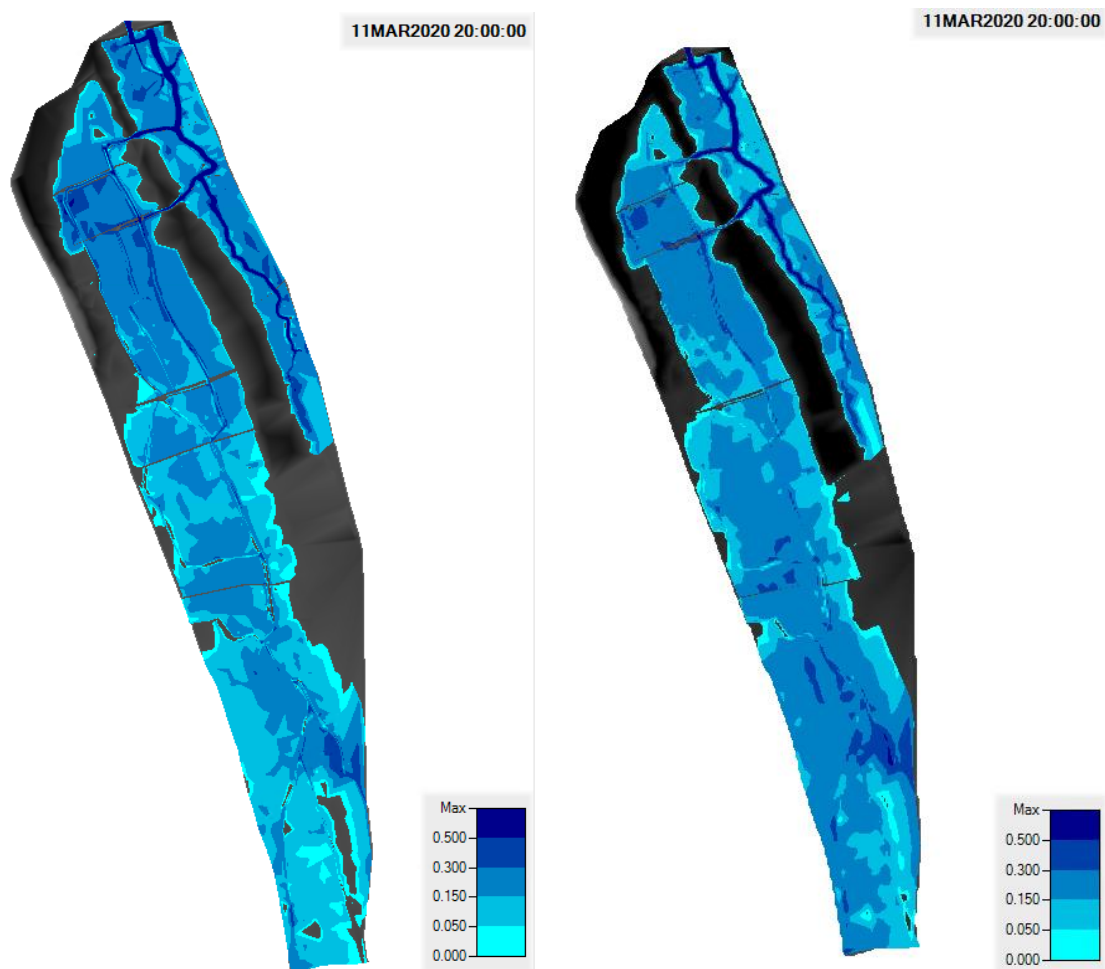


Figure 35 – Comparaison de la profondeur de l’eau sur la plaine à la fin de la phase d’admission entre une gestion de l’eau à la parcelle avec tube PVC (gauche) et une gestion de l’eau à l’ouvrage avec inondation des parcelles via les structures latérales (droite)

La mise en place des deux scénarios ci-dessus a pour but de montrer des exemples d’utilisations d’HEC-RAS dans le cadre d’un aménagement hydro-agricole de riziculture de mangrove. HEC-RAS propose encore de nombreuses autres possibilités d’aménagements plus ou moins faciles à mettre en œuvre pour lesquels il est cependant important de comprendre l’utilisation précise des structures.

Enfin, HEC-RAS est un logiciel couramment mis à jour et il est important de surveiller l’évolution de ces technologies afin de toujours pouvoir utiliser la plus appropriée. Aujourd’hui, la dernière version 5.0.7 est efficace et a fait ses preuves dans la communauté scientifique mais présente encore plusieurs problèmes notamment l’incapacité de calcul sur des zones sèches qui oblige l’utilisateur de modifier la géométrie. Une nouvelle version 5.1 doit arriver prochainement et est sensée apporter un panel de nouvelles fonctionnalités qui vont assurément améliorer la qualité des simulations. Par exemple, il sera désormais possible d’ajouter des données de précipitations pour les zones de stockage ainsi que des données sur l’infiltration du sol, de calculer l’impact du vent sur l’écoulement, un nouvel algorithme 1D selon la méthode des volumes finis permettra de rendre le modèle plus stable et de l’utiliser lorsque les canaux sont secs, une nouvelle visualisation en 3D, un outil de calibration de la valeur de Manning et bien d’autres encore (Brunner et al., n.d.).

Conclusion

En conclusion, ce travail de fin d'étude a permis d'évaluer les capacités du logiciel HEC-RAS dans un contexte d'aménagement hydro-agricole en riziculture de mangrove.

D'abord, la campagne de terrain a une importance capitale dans la suite de cette étude. En effet, la précision des mesures et la justesse de leur emplacement permettent d'obtenir une représentation correcte du système. Ici, la prise de mesure a permis de récolter des informations sur la topographie et sur le niveau d'eau au sein de la plaine. Cependant, les sondes piézométriques n'ont été installées que dans les canaux principaux avec parfois une distance trop faible séparant deux sondes. Il aurait été intéressant de mieux les répartir au sein des drains, d'en installer dans les canaux secondaires et également dans les parcelles afin d'avoir une meilleure représentation globale de la plaine, notamment pour la modélisation en deux dimensions.

Ensuite, ce logiciel offre de bons résultats pour la modélisation unidimensionnelle et une grande facilité d'utilisation. Il nécessite cependant de construire le modèle en connaissance des différentes structures et de leurs impacts respectifs. En effet, il est indispensable de respecter au mieux les échanges entre les zones de stockage et les canaux modélisés. Ces transferts peuvent se réaliser par le biais de structures latérales, de connexions aux extrémités des canaux à ces zones ou encore via des conduits. Mais qu'importe la structure, il est primordial que celle-ci soit correctement positionnée et modélisée afin d'approcher au mieux la réalité.

La modélisation en deux dimensions a ensuite été réalisée mais ne s'est pas révélée plus précise que celle unidimensionnelle. Ces résultats peu concluants sont dus à la campagne topographique incomplète qui n'a pas pris les séparations des parcelles en compte au sein de la plaine. Cela implique que la dynamique de l'eau au sein des parcelles n'est pas correctement représentée et peut générer des résultats incorrects. Il serait dès lors intéressant de compléter les données topographiques afin de représenter entièrement le système. De plus, des sondes piézométriques pourraient également mesurer le niveau d'eau au sein des parcelles pour calibrer le coefficient de Manning de celles-ci.

L'analyse de sensibilité et la calibration ont montré que les paramètres influents sont principalement le coefficient de Manning, représentant la rugosité des drains, et les paramètres liés aux structures propres à HEC-RAS telles que les structures latérales. Cela a également permis de remarquer que le coefficient de Manning a une influence majeure sur les autres structures et sur la propagation de l'eau. En cas de calibration, il est donc nécessaire de varier ces différents paramètres ensemble.

Enfin, le logiciel HEC-RAS a démontré son efficacité dans le cas de cette plaine et a pu être utilisé pour quelques aménagements potentiels. Toutefois, il persiste certaines expériences qu'il pourrait être intéressant de réaliser telles que la calibration des paramètres en prenant en compte les interactions entre ceux-ci, l'évaluation des influences mutuelles entre les différentes structures, la représentation réelle des vannes à clapet usuelles, ... Ces différentes études pourraient mener à une excellente compréhension du logiciel et à une utilisation de plus en plus adaptée aux différentes problématiques.

Finalement, le développement de HEC-RAS et l'arrivée de la version 5.1 apportent énormément de nouvelles fonctionnalités qui nécessiteront d'être testées afin de s'assurer de leur fiabilité.

Bibliographie

- Abbas S.A., Al-aboodi A.H. & Ibrahim H.T., 2020. Identification of Manning's Coefficient Using HEC-RAS Model : Upstream Al-Amarah Barrage **2020**.
- Adout S., 2001. Avant Projet Sommaire - Méthodologie. *Le Référentiel Benthique Méditerranéen (REBENT MED)* 1–124.
- Ahmad S. & Simonovic S., 1999. Comparison of One-Dimensional and Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling Approaches For Red River Basin. *Rep. to Int. Jt. Comm. River Basin Task Force, Ottawa, Washing.* (December), 1–51.
- Archambeau P., Dewals B., Erpicum S., Mouzelard T. & Piroton M., 2010. L'utilité de la modélisation numérique en hydrodynamique de surface.
- Ardiclioglu M. & Kuriqi A., 2019. Calibration of channel roughness in intermittent rivers using HEC-RAS model: case of Sarimsakli creek, Turkey. *SN Appl. Sci.* **1**(9).
- Audebert A., Ahmadi N. & Jamin J.-Y., 2010. Riz, rizière, riziculture — Les Mots de l'agronomie. https://mots-agronomie.inra.fr/mots-agronomie.fr/index.php/Riz,_rizière,_riziculture, (27/04/2020).
- Banque Mondiale, April-27-2020a. Guinée - Vue d'ensemble. <https://www.banquemondiale.org/fr/country/guinea/overview>, (27/04/2020).
- Banque Mondiale, April-27-2020b. Employés, agriculture, hommes (% d'emploi des hommes) - Guinea | Data. <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SL.AGR.EMPL.MA.ZS?locations=GN>, (27/04/2020).
- Bayol B., 2016. Système informatique d'aide à la modélisation mathématique basée sur un langage de programmation dédié pour les systèmes dynamiques discrets stochastiques . Application aux modèles de croissance.
- Bongiorno J. & Mariscotti A., 2015. Performance of indexes used for model validation. *Proc. 13th Intern. Conf. Circuits, Syst. Electron. Control Signal Process.* 95–104.
- Borgonovo E., 2007. A new uncertainty importance measure. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **92**(6), 771–784.
- Brunner G.W., 2016. HEC-RAS River Analysis System. *Hydraul. Ref. Manual, Version 5.0* (November), 1–790.
- Brunner G.W., Asce M., Wre D. & Engineer S.H., n.d. What's New in HEC-RAS 5.1 ? 1–10.
- Castellari A., Galeati G., Brandimarte L., Montanari A. & Brath A., 2004. Regional flow-duration curves: Reliability for ungauged basins. *Adv. Water Resour.* **27**(10), 953–965.
- CIRAD, April-27-2020. Riz - CIRAD. <https://www.cirad.fr/nos-recherches/filieres-tropicales/riz/contexte-et-enjeux>, (27/04/2020).
- Cormier-Salem M.-C., 1999. *Rivières du Sud : Sociétés et mangroves ouest-africaines*. IRD éditions ed.
- Doligez F. & Balde Y., 2016. Etude d'évaluation et de capitalisation des programmes d'appuis à la filière riz de mangrove et étude de faisabilité d ' un nouveau programme riz Basse Guinée.
- Gharbi M., Soualmia A., Dartus D. & Masbernard L., 2016. Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda River in Tunisia **7**(8), 3017–3026.
- Guinot V., 2003. Les modèles numériques en hydrologie et en hydraulique.
- Hameed L.K. & Sami H., 2019. Calibration of Manning ' s Friction Factor for Rivers in Iraq Using Hydraulic Model (Al-Kufa River as Case study) (December 2014).
- Husson F., 2001. Construire un modèle stochastique à partir d'un modèle déterministe. *Rev. Stat. Appliquée* 5–27.
- Kathiresan K. & Bingham B.L., 2001. Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems *ADVANCES IN MARINE BIOLOGY VOL 40*: 81-251 (2001).
- Klipp E., Nordlander B., Krüger R., Gennemark P. & Hohmann S., 2005. Integrative model of

- the response of yeast to osmotic shock. *Nat. Biotechnol.* **23**(8), 975–982.
- Liu Z., Merwade V. & Jafarzadegan K., 2019. Investigating the role of model structure and surface roughness in generating flood inundation extents using one- and two-dimensional hydraulic models. *J. Flood Risk Manag.* **12**(1).
- Makarova M.A., Mamedov V.I., Alekhin Y. V. & Shipilova E.S., 2019. The Unique Role of Pore Water in Lateritic Bauxite Formation, Republic of Guinea. *Dokl. Earth Sci.* **489**(1), 1297–1300.
- McCuen R., Knight Z. & Cutter A., 2006. Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. *J. Hydrol. Eng.* **11**(6)(December), 631–635.
- Ministère de l’agriculture B. de S. et de D., 2018. République de Guinée MINISTERE DE L ’ AGRICULTURE Bureau de Stratégie et de Développement - BSD - Programme d ’ Appui aux Des Filières National Acteurs Agricoles - Bulletin de suivi des importations sur les produits vivriers 2018 Bulletin N ° 8 ÉDITORIAL, 1–10.
- Pappenberger F., Beven K., Horritt M. & Blazkova S., 2005. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *J. Hydrol.* **302**(1–4), 46–69.
- Refsgaard J.C. & Storm B., 1990. Construction, Calibration And Validation of Hydrological Models (January 1990), 41–54.
- RESCIF, 2014. Modélisation hydraulique à surface libre Principes et applications.
- Rey P. & Rétif M., 2017. Le mythe de l’autosuffisance en riz en Guinée. Le paradoxe des politiques face aux stratégies locales. *Cah. d’Outre-Mer* **LXX**(275), 93–114.
- Reza Ghanbarpour M., Salimi S., Saravi M.M. & Zarei M., 2011. Calibration of river hydraulic model combined with GIS analysis using ground-based observation data. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* **3**(5), 456–463.
- Rossi G. & Lauffer D.B.M., 2002. La Guinée maritime aujourd’hui. *Cah. O. M.*
- Scholten H. & Waveren R. Van, 2000. Good Modelling Practice in water management. *Proc.* ... (July), 23–27.
- Song X., Bryan B.A., Paul K.I. & Zhao G., 2012. Variance-based sensitivity analysis of a forest growth model. *Ecol. Modell.* **247**, 135–143.
- Sow M. & Barry M.B., 2003. Innovations en aménagement des sols de mangrove pour la riziculture **10**, 95–106.
- Telliano J.M., 2012. Plan National d’investissement agricole et de sécurité alimentaire.
- Treuil G. & Hossain M., 2004. *Le riz : enjeux écologiques et économiques*, Belin, Paris.
- Yombouno A. & Bah S., 2011. RAPPORT SYNTHÈSE ETUDE DE LA FILIÈRE RIZ EN GUINÉE.
- Zhang S. tang, Liu Y., Li M. miao & Liang B., 2016. Distributed hydrological models for addressing effects of spatial variability of roughness on overland flow. *Water Sci. Eng.* **9**(3), 249–255.