Mémoire

Présenté pour l'obtention du

Diplôme d'ingénieur de l'ENGEES **&** **Master** Mention : Eau Parcours : Eau et Agriculture

Etude du fonctionnement hydro-agricole de canaux d'irrigation : Cas des « preks » sur les rives du Bassac au Cambodge

Source : Auteur

par Ophélie PRATX

Année de soutenance : 2017

Organisme d'accueil :

Institut de Recherche pour le Développement - UMR G-EAU

Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du

Diplôme d'ingénieur de l'ENGEES **&** **Master** Mention : Eau Parcours : Eau et Agriculture

Etude du fonctionnement hydro-agricole de canaux d'irrigation :

Cas des « preks » sur les rives du Bassac au Cambodge

Source : Auteur

par Ophélie PRATX

Année de soutenance: 2017

Structure d'accueil :

Institut de Recherche pour le Développement **-** UMR G-EAU

Mémoire présenté le 04 septembre 2017

Devant le jury :

- Jean-Stéphane BAILLY
- Gilles BELAUD
- Samy BOUARFA
- Jean-Philippe VENOT

Enseignants tuteurs :

- Gilles BELAUD [Montpellier SupAgro]
- Pascal FINAUD-GUYOT [ENGEES]

Maitre de stage :

Jean-Philippe VENOT [IRD]

RESUME

Quelques kilomètres après la naissance du delta du Mékong au Cambodge, se trouvent des zones d'irrigation particulières formées de canaux en terre appelés « preks » reliant perpendiculairement la rivière Bassac aux plaines d'arrière berge. Dans l'objectif de réduction de la pauvreté s'appuyant sur le développement des zones agricoles, nombreux sont les organismes internationaux à investir dans les programmes de réhabilitation de zones d'irrigation. Premier pas dans la compréhension hydro-agricole de ces preks, l'étude retranscrite dans ce mémoire a pour but d'apporter des connaissances sur le fonctionnement hydraulique d'un tel système d'irrigation ainsi que de discuter les choix techniques de réhabilitation. Pour mener cette étude, une campagne d'enquêtes auprès des usagers et des relevés terrain ont été réalisés sur deux sous-zones afin d'atteindre une meilleure compréhension du système. Par la suite, l'étude amène à une modélisation du fonctionnement hydraulique d'un prek selon les différentes caractéristiques qu'il peut présenter. Parmi les récentes installations, les vannes apparaissent surdimensionnées ; une ouverture de quelques dizaines de centimètres entraine le remplissage du prek en seulement quelques heures. De plus, le niveau de calibrage du prek joue en rôle essentiel dans la disponibilité de l'eau dans le canal puisqu'un calibrage à 1m asl entraine une absence d'eau pendant plus de 2 mois et demi dans la période de mars à mai. Un calibrage haut peut néanmoins être compensé par l'installation d'une pompe d'approvisionnement dont le coût de redevance pour l'agriculteur nécessite encore d'être affiné au vue de la variabilité des résultats. Une réflexion sur la protection contre les inondations discute les avantages et inconvénients d'une vanne en entrée de prek. Elle empêche les débordements du prek mais également l'amortissement de la crue et l'apport de sédiments. De plus, utilisée de manière isolée elle ne permet pas la protection contre les inondations car la plaine est reliée à d'autres preks capables de déborder. Enfin, pour améliorer et poursuivre l'étude, il serait intéressant d'élargir l'exercice de modélisation à une sous-zone afin de se rendre compte du fonctionnement inter-connecté du système de preks.

Mots clés : Irrigation, Canal, Prek, Enquête, Modélisation hydraulique, Cambodge

ABSTRACT

A few kilometers after the beginning of the Mekong delta in Cambodia, some specific irrigated areas are made of canals called “preks” which perpendicularly connect the Bassac River to the flood plains. With the aim of reducing poverty based on agricultural development, many international organisations are investing in rehabilitation programs for irrigation areas. First step in the hydro-agricultural understanding of these preks, the study transcribed in this thesis aims to deepen the knowledge of the hydraulic scheme of these irrigation systems. It also permits to give some technical advice for future rehabilitations. To carry out this study, a user’s survey and a field investigation were done on two sub-areas. The purpose of this is to achieve a better understanding of the system and to be able to model the hydraulic performance of a prek depending on its characteristics. Currently, the sluice gates are oversized; a few tens of centimeters opening leads to fill up the prek in about a few hours. Moreover, the prek calibration level has a key role in the water availability inside the canal. A one meter (asl) calibration results in a lack of water for more than two months and a half between March and May. Nevertheless, a high calibration can be compensated by the setting up of a pump whose cost per user needs to be better estimated because of the various results. Thoughts about flood protection are discussing the advantages and disadvantages of an entrance gate. By preventing the overflow, it also stops the sediments and the water. Moreover, used alone the gate cannot prevent from the flood because the floodplain is linked with others preks which can overflow. Finally, to improve and carry on the study, it would be interesting to widen the modeling limits to a subzone in order to represent the interconnection into the preks system.

Keywords: Irrigation, Canal, Prek, Survey, Hydraulic modelling, Cambodia

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont en premier lieu à Somaly qui, plus qu'une collaboratrice de travail, a été mon guide, mon interprète, ma pilote, mais surtout mon amie du Cambodge. S'éloignant du conformisme cambodgien, elle trace sa route avec assurance et détermination, portée par son intelligence et ses rêves. Je lui porte toute mon admiration et lui souhaite une réussite dans l'ensemble de ses projets futurs.

C'est également au formidable binôme d'encadrement formé par Jean-Philippe Venot, mon tuteur et Gilles Belaud, mon professeur que je tiens à dire MERCI. Ils ont fait preuve d'une parfaite complémentarité dès les prémices de ce stage en construisant les objectifs de travail en accord avec les besoins du projet de recherche au Cambodge et les attentes de ma double formation. Disponibles à tout moment et toujours pleins de bons conseils, ce travail n'aurait pas été possible sans eux. Merci à vous deux d'avoir permis la réalisation de ce stage, j'espère en avoir été à la hauteur.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont accepté de collaborer pour ce travail notamment l'équipe de SOFRECO au Cambodge dont Rémi Bonvalet et Philippe Becu ainsi que Thierry Dalimier. Merci pour leur disponibilité et leur collaboration notamment dans le partage de données et de connaissances concernant les réhabilitations de preks.

Je tiens également à remercier les « experts en hydraulique » de l'UMR G-Eau, David Dorchies et Pierre-Olivier Malaterre pour leur aide et leurs conseils avisés en modélisation hydraulique. Et plus généralement, je remercie toute l'équipe de G-Eau dont Christine et sa bonne humeur.

Merci aux agriculteurs et habitants des zones étudiées qui ont accueilli avec enthousiasme ce travail. Ils ont chacun fait part d'une grande sympathie et réceptivité à l'égard des enquêtes réalisées. Je tiens à remercier tout particulièrement Mr. Tuy et sa famille ainsi que Sophea pour nous avoir hébergées et accueillies telles des membres de leur famille. Merci également à Mr. Ouk Srorn et Mr. Chun pour leur aide précieuse, leur générosité et leur éternel sourire.

Enfin, merci aux « expats » Dorian, Fanny, Paul et Madenn sans qui la découverte du Cambodge n'aurait pas eu le même goût. A très vite, en France, au Cambodge ou ailleurs...

TABLE DES MATIERES

Résumé i

Abstract ii

Remerciements iii

Table des matières v

Avant-Propos vii

Glossaire ix

Sigles et acronymes xi

Liste des figures xiii

Liste des tables xiv

Introduction 1

1. Présentation du contexte 3

1.1. Généralités 3

1.2. Prek 5

1.3. Programmes de réhabilitation de preks 6

1.4. Les différents types de preks rencontrés 7

2. Méthodologie 9

2.1. Analyse hydrologique 9

2.1.1. Stations hydrologiques du Bassac 9

2.1.2. Reconstitution du niveau d'eau entre les deux stations 12

2.1.3. Analyse statistique des débits 13

2.1.4. Données climatiques 15

2.2. Méthodologie d'enquêtes 16

2.3. Modélisation hydraulique des canaux 18

2.3.1. Construction du modèle 18

2.3.2. Objectifs des modélisations 22

2.3.3. Des indicateurs comme outils d'analyse 23

3. Description des sites d'étude 24
3.1. Zone Nord 24
3.1.1. Présentation géographique 24
3.1.2. Hydrologie 25
3.1.3. Topographie 25
3.1.4. Activités agricoles 26
3.2. Zone Sud 29
3.2.1. Présentation géographique 29
3.2.2. Hydrologie 29
3.2.3. Topographie 30
3.2.4. Irrigation et réhabilitation 30
4. Résultats et discussions 32
4.1. Fonctionnement général du prek 32
4.2. Influence de l'ouverture de la vanne 33
4.3. Influence de la cote de calibrage des preks 35
4.4. Coût de maintenance de réhabilitation VS coût de pompage 36
4.5. Vanne de régulation pour contrôler les inondations 38
5. Limites et perspectives 40
5.1. Enquêter pour comprendre et analyser 40
5.2. Limites et améliorations du modèle 40
5.3. Limites des résultats et perspectives d'évolution 42
Conclusion 44
Références bibliographiques 45
Annexes 1
Liste des annexes 1
Listes des figures des annexes 2
Listes des tables des annexes 2

AVANT-PROPOS

Ce stage de fin d'études s'intègre dans une double formation menée à la fois au sein du parcours ingénieur de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ENGEES) ainsi que dans le Master Eau, parcours Eau et Agriculture co-crédité par AgroParisTech, Montpellier SupAgro et l'Université de Montpellier. C'est dans le cadre du partenariat inter-écoles du Ministère de l'Agriculture que ce parcours a été possible, me permettant ainsi de m'ouvrir aux thématiques de l'eau en milieu agricole.

La monnaie locale du Cambodge est le Riel. Le taux de change utilisé pour exprimer les coûts en dollars américains (US$) est 1 US$=4 000 riels.

GLOSSAIRE

Boeung	Terme khmer désignant les terres basses situées en arrière des berges.
Chamcar	Terme khmer désignant les terres hautes jamais inondées. Elles se trouvent proches des berges et le long des preks.
Deep calibration	Terme anglais désignant un calibrage du niveau du fond du canal à 0 mètre au-dessus du niveau de la mer.
Hystérésis	Propriété d'un système dont l'état à un instant donné dépend de son évolution antérieure et pas seulement des variables externes. En hydrologie, une hystérésis dans la relation hauteur-débit a pour effet de faire correspondre à une hauteur, des débits différents suivant qu'on est en phase de crue ou de décrue.
Marée diurne	Type de marée se caractérisant par une seule basse mer et haute mer par jour.
Prek	Mot khmer désignant un canal d'irrigation en terre reliant la rivière (généralement Mékong ou Bassac) aux plaines inondables. Initialement conçus pour sédimenter les zones basses, ils servent aujourd'hui à l'irrigation des parcelles.
QMNAx	Débit (Q) mensuel (M) minimal (N) d'une année (A). « x » désigne la période de retour. Cela signifie que c'est le débit mensuel minimal ayant une probabilité égale à 1/x de ne pas être dépassé.
Shallow calibration	Terme anglais désignant un calibrage du niveau du fond du canal à 1,5 mètres au-dessus du niveau de la mer.

SIGLES ET ACRONYMES

ADB	*Asian Development Bank* Banque Asiatique de Développement
AFD	Agence Française de Développement
asl	*Above the sea level* Au-dessus du niveau de référence de la mer
CAVAC	*Cambodia Agricultural Value Chain Program*
CGIAR	*Consultative Group on International Agricultural Research*
CHG	*Climate Hazards Group*
CHIRPS	*Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station data*
DFAT	*Australian Department of Foreign Affairs and Trade* Département des affaires étrangères et du commerce d'Australie
DoUBT	*Delta's Dealings with Uncertainty*
FAO	*Food and Agriculture Organization of the United Nations* Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
G-EAU	Gestion de l'Eau, des Acteurs et des Usages
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IWMI	*International Water Management Institute*
JICA	*Japan International Cooperation Agency*
MNT	Modèle numérique de terrain
MOWRAM	*Ministry of Water Resources and Meteorology* Ministère de la ressource en eau et de la Météorologie
MRC	*Mekong River Commission*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
NWISP	*North West Irrigation Sector Project* Projet sectoriel d'irrigation du Nord-Ouest
PADAP	Programme d'Appui au Développement de l'Agriculture Périurbaine
PDWRAM	*Provincial Department of Water Resources and Meteorology* Département provincial du Ministère de la ressource en eau et de la Météorologie

PUC	*Prek Users Community* Communauté des utilisateurs de Prek
QMNA	Débit mensuel minimal de l'année
UMR	Unité Mixte de Recherche
USGS	*U.S. Geological Survey*
WASP	*Water & Agriculture Sector Programme* Projet sectoriel Eau et Agriculture

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du secteur global d'étude 3
Figure 2 : Schéma explicative des chamcars et boeungs 4
Figure 3 : Schéma coupe A-B de la topographie des terres entre deux preks 4
Figure 4 : Schéma coupe C-D de la topographie du terrain 4
Figure 5 : Cote de l'eau à Koh Kelh et pluie pour l'année 1997 5
Figure 6 : Type de forage sur les parcelles 6
Figure 7 : Pompe d'approvisionnement d'un prek non réhabilité 7
Figure 8 : Vanne en entrée de Prek Sem (réhabilité en 2016) 8
Figure 9 : Localisation des stations limnimétriques 10
Figure 10 : Hauteur d'eau aux stations Koh Kelh et Chau Doc 10
Figure 11 : Courbe de tarage à partir de la hauteur d'eau lue à Koh Kelh 11
Figure 12 : Visualisation du phénomène d'hystérésis pour la hauteur d'eau à Chau Doc, 1995 12
Figure 13 : Evapotranspiration quotidienne de référence 15
Figure 14 : Calendrier de pompage d'alimentation du prek 19
Figure 15 : Calendrier de pompage par les agriculteurs 20
Figure 16 : Schéma d'une coupe transversale du prek 21
Figure 17 : Schéma d'une coupe longitudinale du prek 21
Figure 18 : Schéma illustrant l'écoulement au-dessus d'un seuil 21
Figure 19 : Schéma de la zone Nord 24
Figure 20 : Graphique des hauteurs d'eau à Koh Kelh et Prek Toam 25
Figure 21 : Besoins en irrigation mensuels selon cropwat VS apports moyens mensuels en irrigation selon les agriculteurs. Cas de la canne à sucre plantée le 1er mai 27
Figure 22 : Schéma de la zone Sud 29
Figure 23 : Niveau d'eau à la station aval (Chau Doc) et reconstitué au niveau de la zone d'étude Sud 30
Figure 24 : Niveau d'eau dans le Bassac et le prek calibré à 1m asl 32
Figure 25 : Remplissage du prek pour une ouverture de vanne de 30 cm et le Bassac à 3m 33
Figure 29 : Scénario de pompage journalier des agriculteurs en m3 39
Figure 30 : Niveau d'eau dans le Bassac et le Prek lorsque la vanne est fermée au-delà de Zbassac=3,5m 39

LISTE DES TABLES

Table 1 : Débits d'étiages calculés selon différentes périodes de retour 14
Table 2 : Débits de crue calculés selon différentes périodes de retour..... 14
Table 3 : Récapitulatifs des années caractéristiques choisies..... 14
Table 4 : Débits caractéristiques mis en évidence sur la période 1991-2000 de la station Koh Kelh... 14
Table 5 : Coûts des travaux 31
Table 6 : Coûts d'opération et maintenance..... 31
Table 7 : Temps de remplissage du prek selon l'ouverture de la vanne pour un niveau d'eau dans la rivière de 3m 33
Table 8 : Temps de remplissage du prek selon l'ouverture de la vanne pour un niveau d'eau dans la rivière de 2m 34
Table 9: Temps de remplissage du prek selon l'ouverture de la vanne pour un niveau d'eau dans la rivière de 1m 34
Table 10 : Temps de remplissage du prek pour une vanne large de 2m et un niveau dans le Bassac de 3m..... 34
Table 11 : Durée pendant laquelle le prek ne se remplit pas en fonction de l'année considérée..... 35
Table 12 : Coût de la redevance pour le service d'approvisionnement en eau du prek..... 37
Table 13 : Coût de pompage individuel selon le type de culture..... 37
Table 14 : Nombre de jours de débordement du prek pour un seuil de débordement à 3,5m asl..... 38

INTRODUCTION

Le Cambodge a vu son taux de pauvreté diminuer de 50 à 21% entre 2007 et 2011 passant ainsi de 7 millions à 3 millions de personnes vivant avec moins de 1,15 US$ par jour. On estime que plus de 60% de cette réduction de pauvreté a eu lieu dans le secteur agricole notamment grâce à une amélioration de la productivité. En effet, entre 2004 et 2012, on évalue la croissance annuelle de la production agricole brute à 8,7% soit une des meilleures augmentations dans le monde (Eliste & Zorya, 2015). Néanmoins, le Cambodge reste encore en arrière coté productivité avec un rendement moyen de riz de 2,5 tonnes par hectare en 2008 contre 3 à 5 tonnes par hectare pour ses voisins d'Asie du Sud-Est subissant les mêmes conditions géo-climatiques (FAO, 2009).

Ainsi, afin de sécuriser les ressources alimentaires et de réduire le taux de pauvreté dans le pays, de nombreux programmes de développement se concentrent sur l'augmentation de la production et de la productivité agricole. En effet, la place que tient l'agriculture dans le monde du travail et son développement potentiel laissent à penser que la diminution de la pauvreté au Cambodge peut aujourd'hui encore venir d'une augmentation des gains de production.

La hausse des revenus agricoles peut venir de multiples méthodes que ce soit en augmentant les ventes, en diversifiant les cultures, en optant pour des produits à plus forte valeur ajoutée, en diminuant les pertes (notamment dues aux aléas climatiques) ou encore en améliorant la disponibilité de l'eau pour l'irrigation.

Les programmes de réhabilitation de périmètres irrigués menés au Cambodge visent tous à augmenter la production/productivité agricole grâce au moyen premier de rénovation des systèmes d'irrigation. Plusieurs bailleurs internationaux sont investis dans ces programmes de réhabilitation tels que l'Agence Française de Développement (AFD) impliquée au Cambodge depuis 1993 (AFD, 2013), l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (JICA), la Banque Asiatique de Développement (ADB) investie au Cambodge depuis 1966 (ADB, 2016) ainsi que le Ministère des affaires étrangères et du commerce d'Australie (DFAT) à travers le programme de développement agricole « *Cambodia Agricultural Value Chain Program* » (CAVAC) né en 2009 (DFAT, 2008).

Entre Phnom Penh et la frontière vietnamienne, sur les rives du Bassac formant la partie amont du delta du Mékong, l'irrigation se fait principalement à l'aide de « preks ». Initialement conçus pour un apport de sédiments dans les parties basses, ces canaux en terre construits lors du protectorat français (entre 1863 et 1953) (Dy, 2004) relient la rivière aux plaines d'arrière berge. Leur but ayant évolué au fil du temps, aujourd'hui ils permettent principalement d'approvisionner en eau chaque parcelle se

situant le long de ce canal. Face à leur sédimentation, à un changement des usages ainsi qu'à des variations climatiques (débits dans la rivière et répartition des pluies), il devient utile de les rénover afin de leur redonner une plus grande efficacité. Ainsi, les réhabilitations se multiplient, abordant diverses méthodes sans toutefois revenir systématiquement sur le fonctionnement a posteriori. Le fonctionnement hydraulique et agronomique d'un tel périmètre étant majoritairement méconnu, il y a un réel besoin d'enrichir les connaissances de la communauté scientifique dans ce domaine.
C'est donc en partie dans ce cadre que s'intègre le travail réalisé lors de ce stage au sein de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Au sein de l'Unité de Recherche Mixte de Montpellier « Gestion de l'Eau, des Acteurs et des Usages » (UMR G-EAU), c'est sous la tutelle de Jean-Philippe Venot, chargé de recherche impliqué dans le projet international DoUBT (Delta's Dealings with Uncertainty. Multiple practices and knowledges of delta governance) que la présente étude a été réalisée. Premier pas dans la compréhension hydro-agricole de ces preks, l'étude retranscrite dans ce mémoire a pour but de venir apporter des connaissances sur le fonctionnement hydraulique du système d'irrigation s'intégrant dans le schéma complexe de fonctionnement d'un delta. De plus, en s'appuyant sur quelques réhabilitations réalisées, l'analyse permettra d'apporter des recommandations en termes de choix techniques pour les réfections de preks à venir.

Pour ce faire, l'étude a nécessité une campagne de terrain prenant la forme d'enquêtes auprès des usagers ainsi qu'un relevé d'informations concernant la topographie, les usages et le matériel d'irrigation. L'ensemble de ces données a permis d'alimenter un modèle venant décrire le fonctionnement hydraulique de ces preks selon leurs caractéristiques (niveau d'entrée, alimentation par pompage, présence de vanne). Cette modélisation permet de poser les bases quant au fonctionnement hydraulique de preks pour pouvoir poursuivre vers une étude spatialisée de deux zones hydro-agricoles spécifiques. Suite à une présentation du contexte, le mémoire retranscrit les méthodes utilisées pour l'analyse de données, la réalisation des enquêtes ainsi que la modélisation hydraulique. S'ensuit une présentation des deux sous-zones faisant l'objet de l'étude. Pour finir, l'analyse des résultats de modélisation sera exposée suivie d'une discussion sur les limites et perspectives de l'étude réalisée.

1. PRÉSENTATION DU CONTEXTE

1.1. Généralités

Le Cambodge se situe en Asie du Sud-Est, bordé par la Thaïlande, le Laos et le Vietnam. Le pays est traversé du Nord au Sud par le fleuve Mékong qui, d'une longueur d'environ 4 900 kilomètres (MRC, 2010) prend sa source sur les plateaux tibétains et se jette dans la mer de Chine Méridionale après avoir traversé la Chine, bordé la Birmanie, la Thaïlande puis le Laos et enfin parcouru le Cambodge et le Vietnam. Considéré comme le 10e fleuve le plus long au monde, il draine les eaux d'un bassin versant de 795 000 km² (MRC, 2010). On estime souvent que le delta du Mékong prend naissance au niveau de la ville de Phnom Penh, capitale du Cambodge, au niveau de la confluence dit des « Quatre-Bras ». En effet, à cet endroit a lieu la confluence avec le Mékong et la rivière Tonle Sap ainsi que la naissance de la rivière Bassac, second bras principal du delta (Figure 1). Cette partie amont du delta au Cambodge se situe dans la province de Kandal dans laquelle se trouvent 11 districts chacun divisé en communes puis villages.

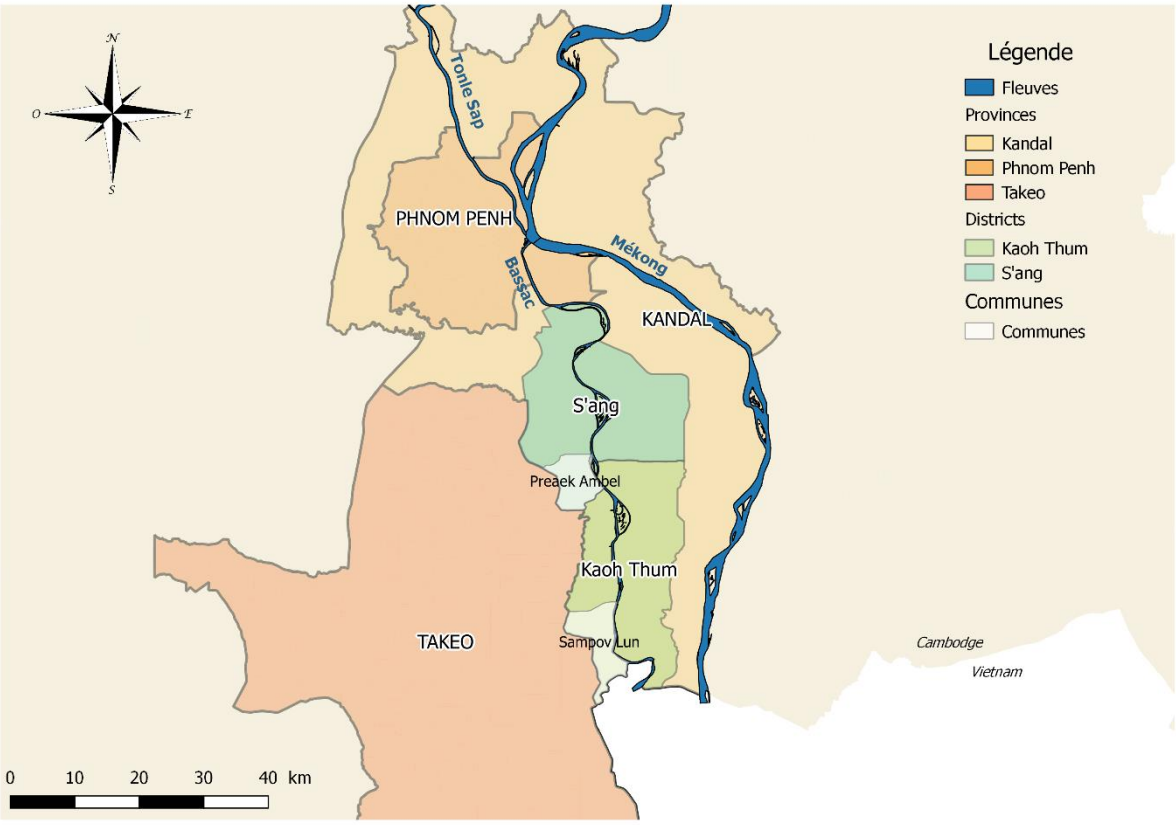


Figure 1 : Localisation du secteur global d'étude
Crédit : Auteur

Dans la plaine alluviale, le fleuve est bordé de berges hautes appelées « chamcar ». En s'éloignant des cours d'eau, il apparaît une plaine topographiquement basse appelée « boeung » et capable d'être inondée et de stocker l'eau en période de saison humide. Ces boeungs sont connectés au Bassac par l'intermédiaire de « preks » ou « canaux de colmatage », schéma typique rencontré dans ce secteur (Figure 2, Figure 3, Figure 4).

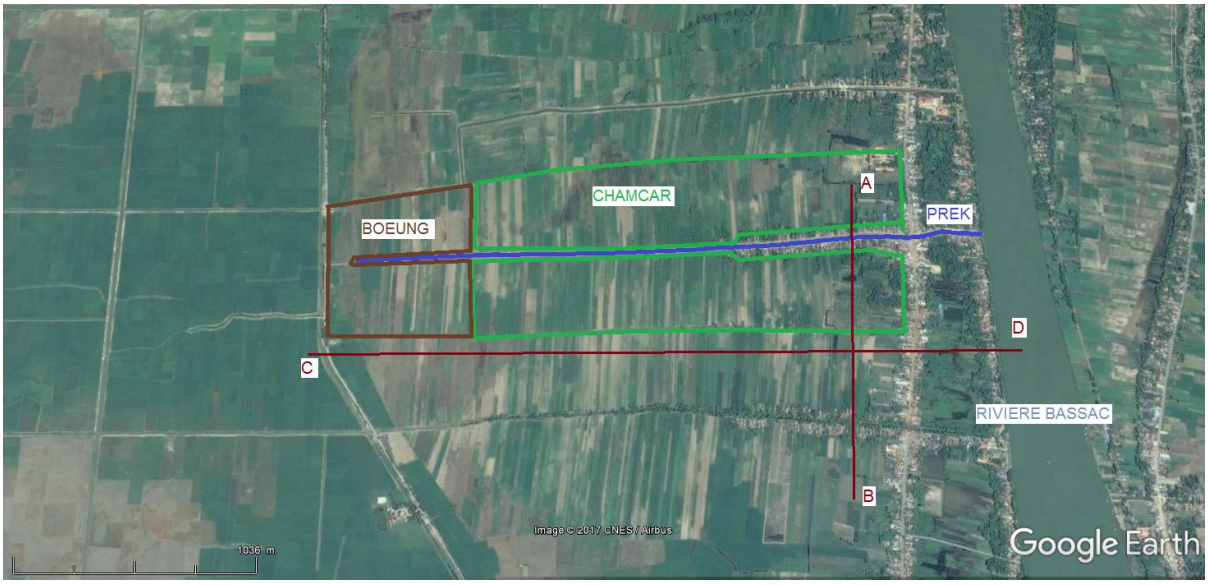


Figure 2 : Schéma explicatif des chamcars et boeungs
Source : Google Earth Crédit : Auteur

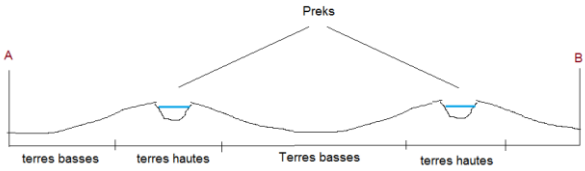


Figure 3 : Schéma coupe A-B de la topographie des terres entre deux preks Source : Auteur

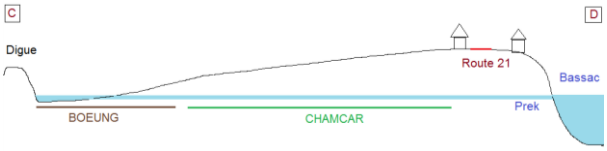


Figure 4 : Schéma coupe C-D de la topographie du terrain
Source : Auteur

D'un point de vue climatique, cette partie du Cambodge est caractérisée par un temps chaud et souvent humide. Lors de la période la plus chaude (mars à mai), la température moyenne mensuelle mesurée à Phnom Penh est de 30-31°C. Les mois les plus frais s'étendent entre novembre et janvier (pour une température moyenne mensuelle à Phnom Penh de 26-27°C) (MRC, 2010).

Le niveau d'eau dans le Bassac résulte du régime de mousson sur l'ensemble du bassin versant du Mékong. Compte tenu de la taille du bassin, la crue est décalée de quelques mois par rapport aux précipitations sur le delta (Figure 5). Le niveau suit une allure régulière avec une phase de crue de juin à fin octobre suivie d'une phase de décrue de novembre à juin (MRC, 2010). Les pluies s'échelonnent

entre 3,5 et 400 mm par mois avec le minimum en janvier et décembre et le maximum en septembre et octobre (MRC, 2010).

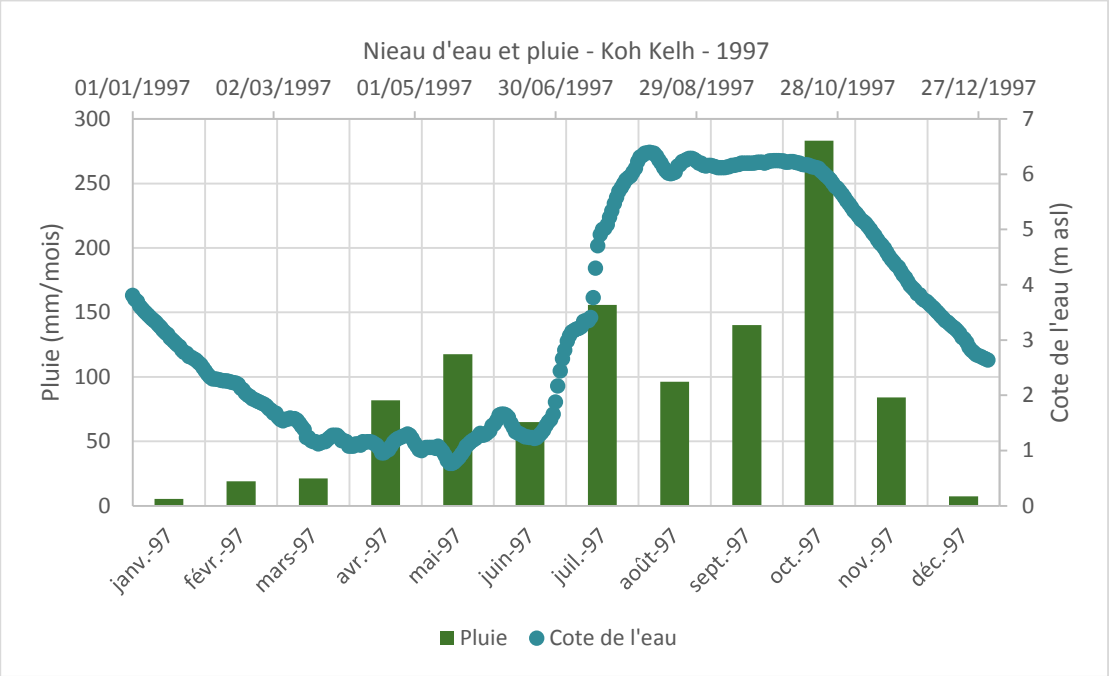


Figure 5 : Cote de l'eau à Koh Kelh et pluie pour l'année 1997
Source : Données MRC *Crédit : Auteur*

1.2. Prek

La création de ces preks date de l'époque coloniale française (entre 1863 et 1953) (Dy, 2004). Ils ont été construits perpendiculairement à la rivière dans le but premier de sédimenter les parties basses de la plaine alluviale afin d'étendre les surfaces cultivables. La fonction d'irrigation est ensuite devenue majoritaire permettant une sécurisation de la ressource en eau. L'existence de ces canaux a donc permis un développement agricole avec la présence de terres jamais inondées proches des berges, de parcelles surélevées parfois inondées mais riches en sédiments et le développement de la riziculture dans les parties basses. La société française SOFRECO, spécialiste du conseil et de l'assistance technique, ayant réalisé les études de certains preks dans le cadre du Projet Sectoriel Eau et Agriculture (en anglais *Water and Agriculture Sector Project* WASP) financé par l'AFD, s'est intéressée aux fonctions principales que tiennent ces canaux aujourd'hui. Selon les utilisateurs, ils servent principalement pour l'irrigation, le transport ainsi que la protection contre les inondations (grâce au stockage). Ne sont que très rarement mentionnées comme fonctions recherchées, l'apport de sédiments, la pêche ou encore la préservation des zones humides. Du fait d'une demande plus élevée à Phnom Penh, il y a un intérêt pour les agriculteurs proches de la capitale à cultiver des produits frais à forte valeur ajoutée tels que les fruits et légumes que l'on retrouve sur les chamcars.

Pour les zones plus reculées, la culture du riz dans les boeungs est plus présente (SOFRECO, 2017). Face à une sédimentation progressive, le niveau de fond des canaux augmente ce qui raccourcit la période de disponibilité de l'eau ainsi que la capacité de stockage laissant apparaitre des périodes de manque d'eau pour l'irrigation. Pour y remédier, les agriculteurs ont souvent recours à l'utilisation de puits sur leur parcelle (Figure 6).

Figure 6 : Type de forage sur les parcelles
Crédit : Auteur

1.3. Programmes de réhabilitation de preks

Afin de rendre l'eau disponible dans les preks plus longtemps et d'augmenter la production tout au long de l'année, des programmes de réhabilitation financés par divers bailleurs sont mis en place. Parmi ces derniers, l'AFD a financé entre 1999 et 2003 (KOSAN Engineering, 2011) une première phase pilote du projet de réhabilitation de preks dans la province de Kandal s'intégrant dans le Programme d'Appui au Développement de l'Agriculture Périurbaine (PADAP) autour de Phnom Penh. Cette première étude menée par AGRISUD International concernant les canaux Ong Pang et Takhut du district de S'ang avait pour but de tester les méthodes de réhabilitation ainsi que le développement des cultures maraichères sur les parcelles en chamcar. BRL ingénierie (2004), fait un bilan de cette phase pilote dans le but de poursuivre ce projet de réhabilitation en s'appuyant sur les résultats mis en avant. Ainsi, il en ressort que la phase pilote a permis le développement d'une production à plus forte valeur ajoutée, une hausse des revenus agricoles, la mise en place d'initiatives venant de la population ainsi qu'une dynamique collective pour la gestion des ouvrages.

Parallèlement, la *Japan International Cooperation Agency* (JICA) a financé en 2001-2002 un projet de réhabilitation de quatre preks sur la rive droite du Mékong suite à une étude menée en 1996-1997 sur le développement agricole de la zone inondable du Mékong au Cambodge (Sanyu Consultants, 1998). Dans la suite de la phase pilote, l'AFD a maintenu son appui en finançant une nouvelle réhabilitation dans la province de Kandal dans le cadre du projet *Northwest Irrigation Sector Project* (NWISP). Ainsi, début 2007, l'entreprise d'ingénierie civile KOSAN ainsi qu'Agri-Cam ont été chargés de la création d'un polder en 2009-2010 entre les preks Ta Roat et Ta Ong du district de S'ang dans la commune de Prek Ambel avec pour objectif général d'intensifier, diversifier et sécuriser les activités agricoles (KOSAN Engineering, 2011). La formation de ce polder, détaillée en Partie 3.1, a consisté en la surélévation des berges des deux preks afin de former un espace clos protégé des inondations par des digues.

S'affranchir du risque d'inondation permet ainsi aux agriculteurs de cultiver sur une plus longue période.

En décembre 2013, l'AFD a de nouveau accordé un financement au Royaume du Cambodge pour le Projet Sectoriel Eau et Agriculture (WASP) permettant entre autre la réhabilitation d'une trentaine de preks dans la province de Kandal pendant une période de quatre ans. Ce sont les agences de consulting SOFRECO en association avec *SBK Research and Development* qui sont en charge de cette étude en tant qu'assistance technique du Ministère de la Ressource en Eau et de la Météorologie du Cambodge (MOWRAM) (SOFRECO, 2015). Le premier lot de preks réhabilités a eu lieu en 2015 et a concerné 13 canaux principalement situés sur les rives de la rivière Bassac. La suite du projet est actuellement en cours avec une deuxième phase concernant 12 preks.

1.4. Les différents types de preks rencontrés

Les choix de rénovation en termes de structures sont assez variés selon les attentes du ministère, les besoins ainsi que la faisabilité des travaux. Ainsi, dans le cadre des réhabilitations, deux choix de conception concernant la profondeur de creusement ont été faits : ceux calibrés pour que le niveau du Bassac soit toujours au-dessus du point d'entrée du prek (fond de canal à zéro mètres au-dessus du niveau de la mer (Above sea Level : asl) dit « deep calibration ») ou ceux n'ayant pas été profondément creusés dont le fond est à 1,5 mètres au-dessus du niveau de la mer (« shallow calibration ») (SOFRECO, 2015,a). Les preks non recalibrés ont une base aux environs de 1 à 3m asl déterminée à partir de la campagne topographique du prek Wat Koh Teav (SOFRECO, 2015,b).

Pour les canaux en *shallow calibration* ou non réhabilités, on peut trouver en entrée une pompe d'approvisionnement (Figure 7) permettant aux preks d'être en eau même lorsque le niveau de la rivière se situe en dessous de celui d'entrée du prek.

Figure 7 : Pompe d'approvisionnement d'un prek non réhabilité
Crédit : Auteur

Figure 8 : Vanne en entrée de Prek Sem (réhabilité en 2016)
Crédit : Auteur

Dans certains cas, il peut également y avoir une ou plusieurs vannes de type martelière (Figure 8) permettant le contrôle des flux d'eau en entrée et/ou sortie du prek. Celle-ci nécessite un scénario spécifique de manœuvre de vanne selon le cas où elle permet une protection contre les inondations ou plutôt un apport contrôlé de sédiments.

En se basant sur l'ensemble des preks rencontrés dans le secteur du Bassac, leurs différentes caractéristiques vont être étudiées afin d'évaluer la disponibilité de l'eau ainsi que la protection contre les inondations.

2. METHODOLOGIE

C'est une étude interdisciplinaire qui s'est ouverte en vue de répondre aux objectifs du stage. Elle se découpe en trois grandes parties à l'image des grandes phases de travail. Une première partie concerne l'analyse hydrologique permettant l'interprétation de données climatiques et hydrologiques. Une deuxième phase axée sur les enquêtes et des observations terrains vient compléter les connaissances de la zone pour pouvoir construire un modèle hydraulique. Ce dernier doit permettre de comprendre les phénomènes de remplissage et vidange du prek ainsi que de discuter les choix d'aménagements qui y sont fait notamment suite aux programmes de réhabilitation.

2.1. Analyse hydrologique

2.1.1. Stations hydrologiques du Bassac

La Mekong River Commission (MRC) est une organisation intergouvernementale œuvrant depuis 1995 avec la Thaïlande, le Laos, le Cambodge et le Vietnam dans le but de gérer collectivement la ressource en eau et les aménagements du fleuve Mékong. Succédant au Mekong Committee existant depuis 1957 (MRC, 2015), elle opère un suivi régulier de diverses stations hydrologiques sur le bassin versant du Mékong. Régulièrement, les données d'hauteur d'eau et de pluie sont publiées en ligne. Il est possible de se procurer davantage de données sur demande (pour cette étude, l'International Water Management Institute (IWMI), centre de recherche du Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR) a accepté de partager les données de la MRC qu'il avait en sa possession). Ainsi, pour la suite du travail des données hydrologiques d'hauteurs d'eau et de débits sont donc exploitables. Etant donné que l'étude se focalise sur le secteur le long du Bassac entre Phnom Penh et le Vietnam, seules les données issues des stations Koh Kelh en amont et Chau Doc en aval dont la localisation est présentée en Figure 9 seront exploitées.

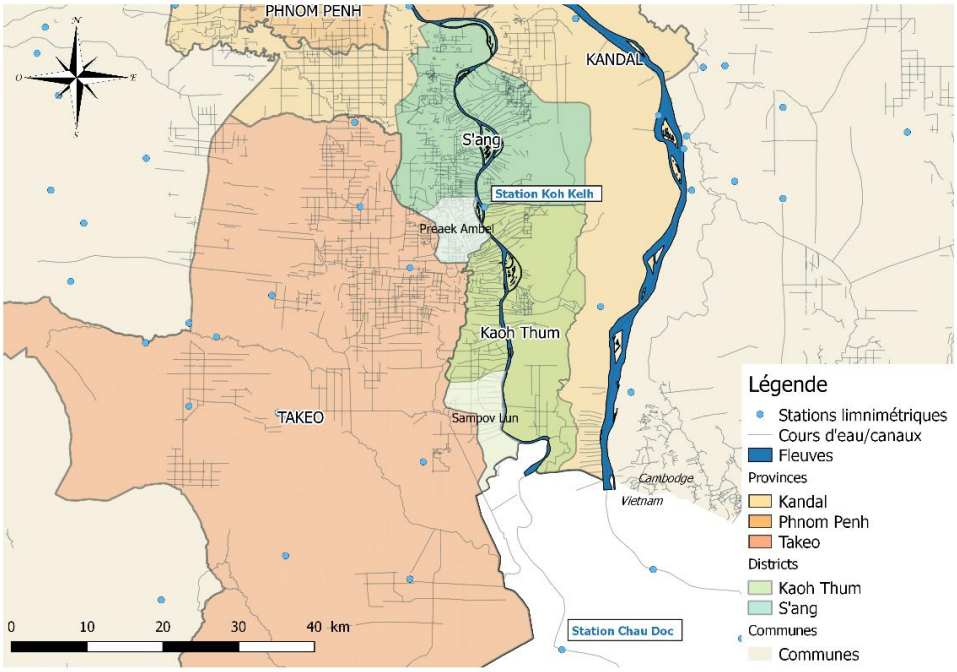


Figure 9 : Localisation des stations limnimétriques
Crédit : Auteur

Les caractéristiques et l'analyse hydrologique de ces deux stations sont présentées plus en détail en Annexe A et Annexe B.

La plage de données communes aux deux stations pour la hauteur d'eau est comprise entre septembre 1990 et décembre 2000 ainsi qu'entre juin 2013 et février 2017.

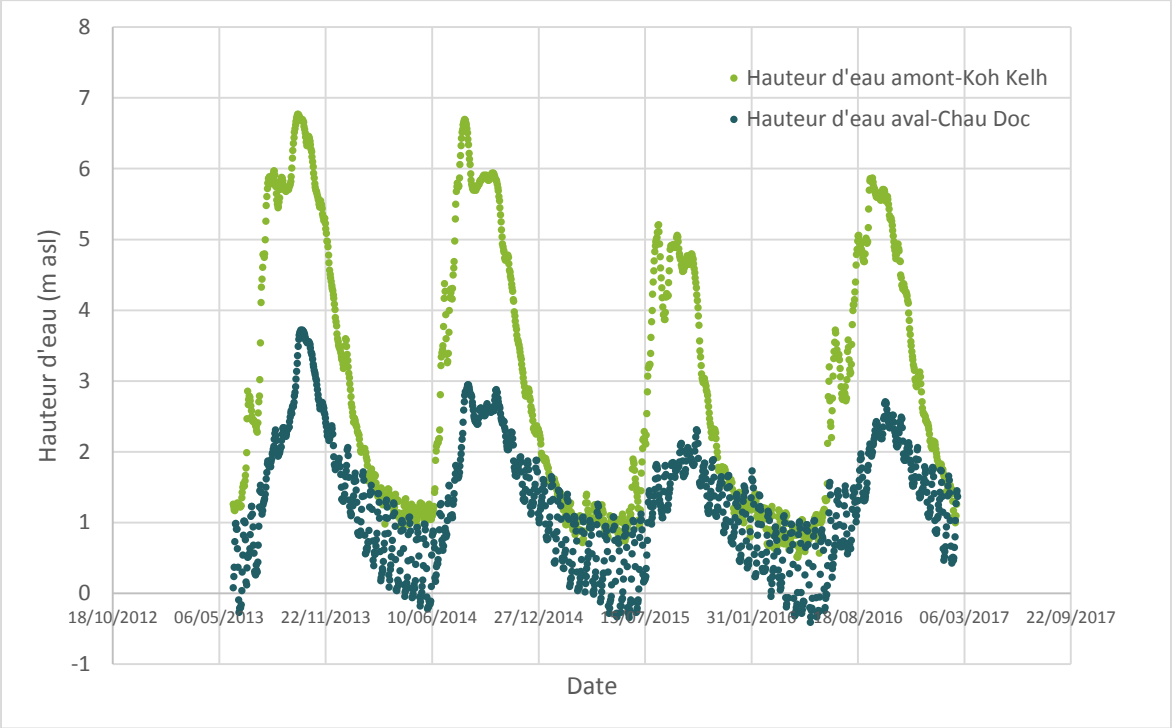


Figure 10: Hauteur d'eau aux stations Koh Kelh et Chau Doc
Données : MRC

Sur la Figure 10 sont représentées les hauteurs d'eau pour les deux stations entre juin 2013 et février 2017. On y remarque dans un premier temps une différence de hauteur d'eau entre les deux stations d'environ 3 mètres pour les hautes eaux et de l'ordre du mètre pour les basses eaux. A chaque pas de temps, cette différence de niveau peut être calculée ce qui permet de déterminer une pente moyenne approximative de la section de $2{,}5 \times 10^{-5}$ (en accord avec Zanobetti et Lorgeré (1968) qui estiment la pente du Bassac dans le delta du Mékong à $3{,}5 \times 10^{-5}$).

De plus, il apparait un phénomène d'oscillations quotidiennes du niveau d'eau essentiellement marqué pour les basses eaux et d'autant plus pour la station aval. Cela s'explique par le phénomène de marée dont les ondes peuvent remonter les bras du delta depuis la mer puisque le régime d'écoulement est fluvial. Néanmoins, l'onde étant amortie au fur et à mesure de sa propagation, elle est majoritairement ressentie à la station Chau Doc et très peu à Koh Kelh.

Pour la station amont (Koh Kelh), puisque les données de hauteur d'eau et débit sont toutes deux disponibles entre 1991 et 2000, il est possible de reconstruire la courbe de tarage présentant la relation entre le débit et la hauteur d'eau (Figure 11). On observe que la courbe de tarage est univoque. Les données de débit peuvent alors être reconstituées lorsque seules les données limnimétriques sont présentes.

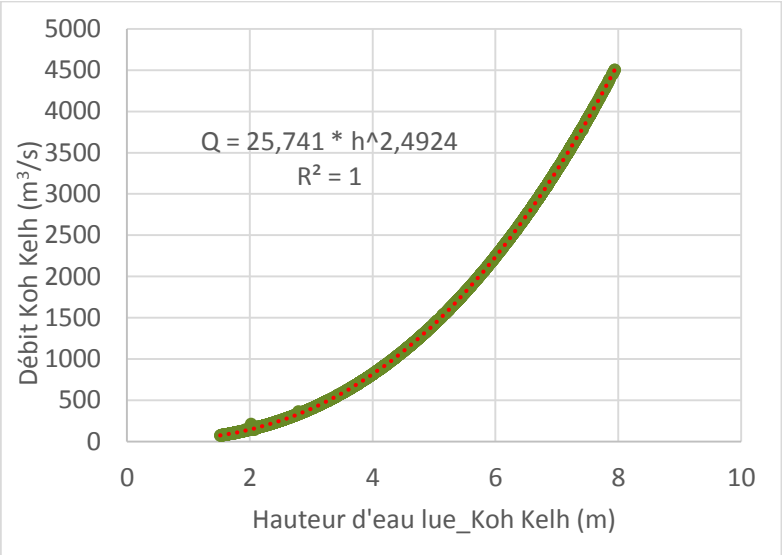


Figure 11 : Courbe de tarage à partir de la hauteur d'eau lue à Koh Kelh
Source : Données MRC Crédit : Auteur

Pour la station aval (Chau Doc) se situant à 73 kilomètres en aval de Koh Kelh, cette fois ci la correspondance entre le débit et la hauteur d'eau n'est pas univoque. Ceci est lié à un phénomène d'hystérésis très classique sur les cours d'eau de faible pente. D'autre part, la non-univocité peut aussi être liée au phénomène de marée (le débit étant imposé essentiellement par l'amont, selon le rythme saisonnier, alors que le niveau est aussi influencé par la marée diurne).

L'hystérésis, propre aux régimes fluviaux à très faible pente, implique des hauteurs d'eau différentes pour un débit fixé selon que le cours d'eau est en phase de crue ou en phase de décrue. En effet, pour

un débit donné, la hauteur d'eau observée en phase de crue (généralement de mai à septembre) est plus faible qu'en phase de décrue (septembre à mai). Cela s'explique par la propagation de l'onde de crue qui, en régime fluvial, a une célérité supérieure à la vitesse de l'eau. La démonstration de la relation non univoque entre le débit et la hauteur d'eau est présentée en Annexe B.

En l'absence de plage commune de données de hauteur d'eau et débit à la station aval, il est nécessaire de faire l'hypothèse d'un débit constant entre les deux stations. Ainsi, la représentation de la hauteur d'eau aval en fonction du débit à Koh Kelh permet de visualiser le phénomène d'hystérésis (Figure 12).

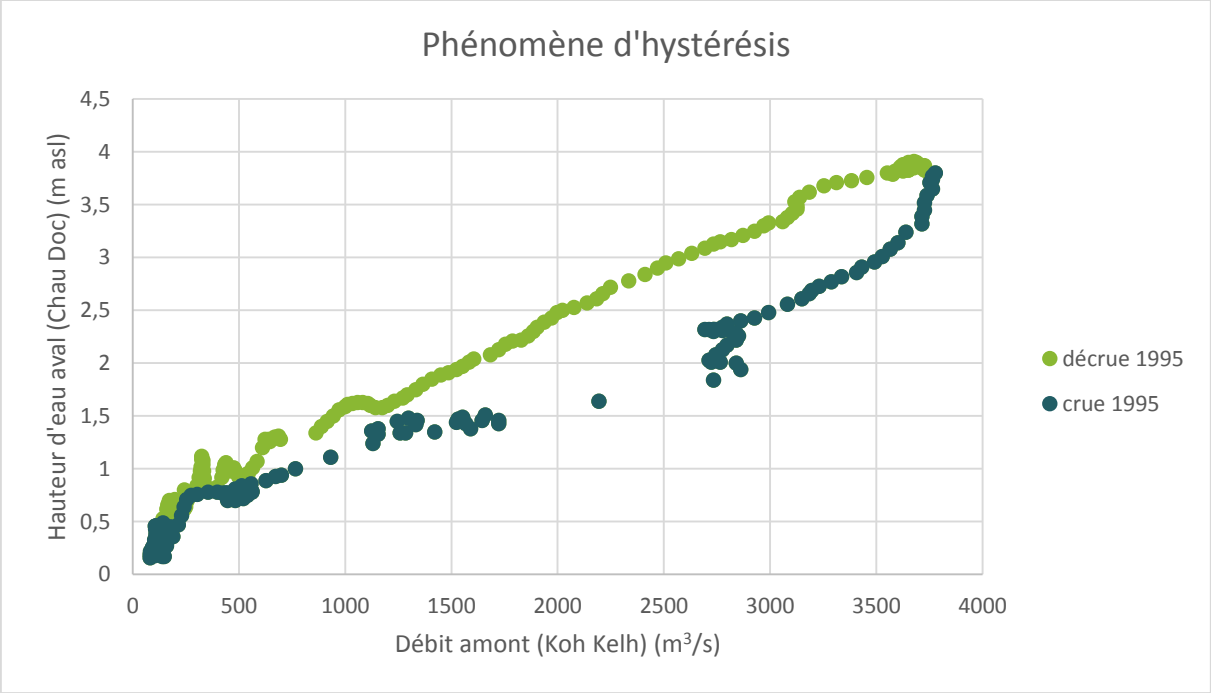


Figure 12 : Visualisation du phénomène d'hystérésis pour la hauteur d'eau à Chau Doc, 1995
Source : Données MRC *Crédit : Auteur*

2.1.2. Reconstitution du niveau d'eau entre les deux stations

Le niveau d'eau (h) entre les deux stations s'avérant très différent (Figure 10), nous reconstituons celui-ci pour tous les pas de temps pour chaque point i du bassac se situant à une distance d_i en aval de Koh Kelh grâce à l'équation suivante :

$$h_i = h_{Koh\ Kelh} - (J * d_i)$$

Où $J\ (m/m) = (h_{Koh\ Kelh} - h_{Chau\ Doc})/distance_{Koh\ Kelh_Chau\ Doc}$

Le niveau d'eau ainsi ajusté à la position sera utile pour la suite de l'étude. Il peut également permettre d'affiner les études de conception de réhabilitation notamment en ce qui concerne les niveaux d'entrée des preks.

2.1.3. Analyse statistique des débits

Dans le but d'identifier des années caractéristiques de niveau d'eau dans le Bassac, nous procédons à une analyse fréquentielle sur les débits de la station Koh Kelh. La relation reliant le débit à la hauteur d'eau étant univoque, les résultats obtenus sur l'analyse des débits pourra être appliquée aux hauteurs d'eau.

Pour cela, nous déterminons les débits mensuels d'étiage (QMNA) pour différentes périodes de retour (2, 3, 5, 8, 10 et 20 ans) ainsi que les débits mensuels de crue pour des périodes de retour 2, 3, 5, 10, 15 et 20 ans (Table 1 et Table 2). Le débit d'étiage est calculé à l'aide de la loi de Galton (ou loi log-normale). Détaillons ci-dessous le calcul de QMNA2. Les autres QMNAX étant calculés selon la même méthode. Nous disposons d'un échantillon de débits moyens mensuels (en m^3/s) pour plusieurs années. Pour chaque année de l'échantillon, la valeur minimale du débit moyen mensuel (nommé QMNA) est déterminée (exemple : pour l'année 2001, le débit moyen mensuel minimal est de 107,6 m^3/s correspondant au mois de mai). Nous en prenons ensuite le logarithme. A partir de cet échantillon de log QMNA, nous déterminons sa moyenne ainsi que son écart type. Pour une période de retour T= 2 ans, la fréquence est égale à 1/T soit 0,5. Une telle fréquence est associée à une variable centrée réduite de Gauss U_2 égale à 0 selon la table en Annexe C. Le débit moyen mensuel d'étiage de période de retour 2 ans (QMNA2) est alors égal à

$$QMNA2 = 10\hat{}(Moyenne + Ecart\ type * U2)$$

Soit dans ce cas QMNA2= 124 m^3/s.

Le débit de crue quant à lui est généralement déterminé à partir de la Loi de Gumbel. Cette loi est applicable pour des évènements extrêmes et rares tant que la période de retour calculée est inférieure à trois fois la taille de l'échantillon soit dans notre cas 30 ans. Ici, nous cherchons plus à qualifier l'occurrence des crues observées qu'à déterminer une valeur extrême. Pour les événements observés, les méthodes doivent donner des résultats similaires, et comparables avec les périodes de retour observées expérimentalement. Nous retenons néanmoins la méthode de Gumbel, appliquée aux débits mensuels de crue. Ceci nous permettra d'extrapoler les débits de crue à des périodes de retour plus élevées que les 10 années d'observation. Prenons l'exemple d'un débit de crue d'une période de retour de 5 ans. On détermine dans un premier temps le débit moyen mensuel maximal (Qcrue) pour chaque année puis la moyenne et l'écart type de cette série de Qcrue. L'évènement étant extrême, la fréquence vaut $F = 1 - \frac{1}{T} = 0{,}8$ avec T=5 dans ce cas. On détermine ensuite la variable centrée réduite $U5 = \ln(-\ln(F)) = 1{,}5$ ainsi que les paramètres

$X_0 = moyenne - 0{,}45 * ecart\ type$ et $g = 0{,}78 * ecart\ type$.

On en déduit alors le débit de crue de période de retour 5 ans $Q5 = U5 * g + X_0 = 3\,869\ m^3/s$

Table 1 : Débits d'étiages calculés selon différentes périodes de retour

	Période de retour (an)	Débit d'étiage (m^3/s)
QMNA2	2	124
QMNA3	3	114,4
QMNA5	5	106,2
QMNA8	8	103
QMNA10	10	97,9
QMNA 20	20	91,6

Table 2 : Débits de crue calculés selon différentes périodes de retour

	Période de retour (an)	Débit de crue (m^3/s)
Q2	2	3 335
Q3	3	3 587
Q5	5	3 869
Q10	10	4 223
Q15	15	4 422
Q20	20	4 562

Grâce aux débits mis en couleurs dans la Table 4, nous en déduisons que l'année 2000 a été une année d'hautes eaux correspondant à une période de retour comprise entre 10 et 15 ans. L'année caractérisée comme sèche dans l'échantillon est l'année 1993 dont le débit d'étiage correspond à une période de retour entre 8 et 10 ans. L'année 1997 sera considérée comme une année dite « normale » étant donné qu'elle ne possède pas de débit extrême (Table 3).

Table 3 : Récapitulatifs des années caractéristiques choisies

Année de hautes eaux	2000	Débit de crue de période de retour entre **10 et 15 ans**
Année normale	1997	Pas de débit extrême
Année de basses eaux	1993	Débit d'étiage de période de retour entre **8 et 10 ans**

Afin de compléter cette analyse, regardons les débits moyens annuels (également appelés modules) pour s'assurer que les années caractéristiques déterminées correspondent à des débits moyens annuels faible, moyen et fort. La dernière ligne de la Table 4 montre ainsi que l'année 2000 correspond au module le plus élevé (bleu). L'année 1993 possède un débit moyen annuel faible (orange) et celui de 1997 se situe proche de la moyenne (vert).

Table 4 : Débits caractéristiques mis en évidence sur la période 1991-2000 de la station Koh Kelh

Q moyen mensuel (m^3/s)										
Année	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Janvier	676	536	313	352	482	594	885	442	325	782
Février	280	264	167	177	243	300	442	223	181	384
Mars	145	149	129	148	154	173	226	140	116	227
Avril	114	112	102	130	122	148	171	112	120	177
Mai	108	106	114	118	126	235	154	124	357	469
Juin	234	278	243	787	321	384	238	229	1 337	1 488
Juillet	1 460	837	1 354	2 463	1 195	1 102	1 695	990	1 838	3 237
Août	3 151	2 469	2 377	3 368	2 816	2 960	3 544	1 412	3 260	3 588
Septembre	3 847	2 888	2 931	3 804	3 630	3 349	3 500	2 216	3 289	4 254
Octobre	3 545	2 515	2 702	3 465	3 532	3 893	3 374	2 130	3 328	3 912
Novembre	2 403	1 657	1 603	1 890	2 440	3 227	2 016	1 344	2 937	2 875
Décembre	1 128	646	823	991	1 275	1 914	947	884	1 698	1 600
Q moyen annuel	**1 431**	**1 040**	**1 077**	1 483	**1 368**	1 527	**1 440**	**858**	1 573	**1 921**

2.1.4. Données climatiques

Pluie

Nous disposons de données de pluies mensuelles depuis 1981 jusqu'à avril 2017 issues d'une grille de données d'une résolution de 5,6 kilomètres. Cette base de données pluviométriques disponibles sur l'ensemble de la planète nommée Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) est issue de plusieurs études menées depuis 1999 par notamment l'U.S. Geological Survey (USGS), les scientifiques du Climate Hazards Group (CHG) ainsi que la NASA. CHIRPS est ainsi le résultat d'un couplage de modèles de terrain, de stations pluviométriques et d'observations satellites permettant de construire une grille de haute résolution dont les erreurs sont corrigées grâce aux données terrain (Funk, 2015).

Evapotranspiration

Dans son rapport de 2006 concernant la ressource en eau dans les sous-bassins du bassin versant du Tonle Sap au Cambodge, l'Agence de consulting GFA décrit les différents termes intervenant dans l'évaluation de la ressource en eau dont notamment l'évapotranspiration (GFA Consulting Group, 2006). Cette dernière est évaluée à partir de données climatiques issues du Ministère de la ressource en eau et de la météorologie du Cambodge (MOWRAM) selon la méthode Penman (Allen, 1991). Pour la suite de l'étude, une évapotranspiration mensuelle sur une année type est donc disponible. Elle est comprise entre 4,3 et 7 mm/jour (Figure 13).

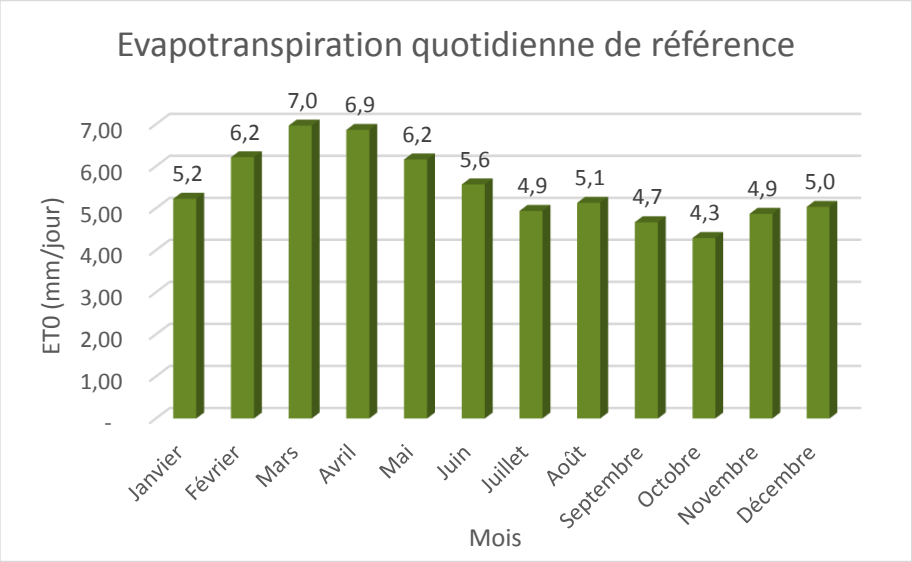


Figure 13 : Evapotranspiration quotidienne de référence
Source : Données MOWRAM, GFA consulting Group Crédit : Auteur

2.2. Méthodologie d'enquêtes

L'objectif étant de comprendre le fonctionnement hydraulique de deux zones spécifiques du secteur, en se basant sur le comportement hydraulique de preks, il a été nécessaire d'aller dans un premier temps s'imprégner du terrain. En couplant, des relevés de terrain ainsi que des enquêtes auprès des usagers, il a été possible de récolter les données venant entre autre alimenter un modèle hydraulique. Avec la collaboration de Somaly Oum, étudiante cambodgienne ayant une formation en économie agricole à l'Université Royale d'Agriculture de Phnom Penh, nous nous sommes rendues dans la province de Kandal entre mai et juin 2017 avec pour objectifs principaux la récolte de données agronomiques, hydrauliques et topographiques. Pour ce faire, des enquêtes ainsi que des relevés d'observations de terrain ont été menés. La population parlant uniquement khmer, la collaboration avec Somaly a amplement facilité les discussions et les approches auprès des populations locales.

Le protocole d'enquête préalablement choisi fut un entretien mené à la manière d'une discussion s'appuyant sur un guide (Annexe D). A l'image des entretiens semi-structurés, il permet la construction d'un échange à partir de questions plus ou moins générales (Cohen & Crabtree, 2006). Néanmoins, contrairement aux enquêtes semi-structurées, l'information récoltée peut être qualitative ou bien quantitative (Laforest, 2009). Trois types de guides ont été élaborés selon les personnes ciblées et donc l'information recherchée.

L'un interroge les agriculteurs sur l'aspect principalement agricole de la zone. On cherche à connaitre la taille et la localisation des parcelles ainsi que leurs pratiques culturales telles que le type de culture, les dates du cycle cultural, le rendement ainsi que les éventuels changements ou difficultés dans leur activité. Certaines questions sont plus axées sur l'irrigation, pour savoir quelle est la source d'eau et la fréquence d'irrigation. Si la parcelle se trouve près d'un prek, on souhaite alors connaitre la disponibilité de l'eau dans celui-ci et les principaux changements et bénéfices d'une réhabilitation si elle existe. Enfin, une partie concernant les inondations est également abordée. Elle permet d'élaborer une base de données à dire d'acteurs à propos des fréquences d'inondation, des hauteurs d'eau, des périodes inondées ainsi que de leur perception face au risque d'inondation et aux potentielles pertes agricoles. La connaissance plus approfondie des inondations et de leur localisation permet d'affiner notre perception de la topographie du terrain. L'échantillonnage de la région à sonder s'est fait de manière à représenter l'hétérogénéité spatiale des cultures ainsi que du comportement hydraulique en récoltant les données d'une trentaine de parcelles. La localisation des parcelles interrogées est présentée en Annexe E.

Un autre guide d'entretien s'adresse aux entrepreneurs alimentant le prek en eau. Ceux-ci, en plus d'être agriculteurs, sont également en charge de l'approvisionnement en eau du canal à l'aide d'une pompe lorsque que le niveau du Bassac est trop bas pour permettre une entrée gravitaire. Auprès d'eux, il est donc intéressant de se renseigner sur cette activité qui, en l'échange d'une redevance des agriculteurs, assure d'une disponibilité en eau visiblement suffisante toute l'année. L'enquête cherche à comprendre le rôle qu'ils tiennent dans cette communauté agricole (redevance perçue, historique et évolution de l'activité) et également à connaître la fréquence et le coût de pompage.

Un troisième type d'entretien s'est déroulé à l'image des « groupes de discussion » (*focus group discussion* en anglais) défini selon Marczak et Sewell (2007) comme étant un groupe de personnes interagissant autour d'un sujet de discussion et rassemblées autour d'un modérateur. Ce dernier tire profit du groupe et de ses interactions pour obtenir des informations à propos du thème abordé. Ces discussions ont réuni une dizaine de personnes issues de l'autorité locale (chefs de villages), des communautés d'irrigants (président/vice-président des associations d'usagers des preks (PUC), fournisseur en eau du prek) ainsi que quelques agriculteurs volontaires. Le choix de cette forme d'interview est né de la volonté de créer un échange entre les différents acteurs sur diverses thématiques de la zone (types de culture, irrigation, inondation). De cette manière, il est plus aisé de récolter des informations à l'échelle globale de la zone d'étude. Pour ce faire, la discussion s'est déroulée autour d'une carte au format A0 composée d'éléments de base nécessaires pour se situer (Annexe F). Les acteurs ont pu intervenir en y ajoutant des éléments tels que les zones inondables, les grands types de culture et corriger des éléments présents. Ce type d'enquête se rapproche ainsi de ce que l'on appelle la « cartographie participative », qui selon Palsky (2010), consiste en « l'élaboration collective de représentations cartographiques par la base, c'est-à-dire par un ensemble de personnes n'appartenant pas aux milieu de la cartographie professionnelle ou académique ». La différence étant que pour notre étude, l'objectif est de collecter des données pouvant être représentées sur une carte et non pas la création d'une carte à proprement parler. Cette technique a également permis un gain de temps ainsi que l'obtention d'une information préalablement discutée par les acteurs.

L'ensemble de ces méthodes d'entretien s'appuie donc sur le savoir de la population locale afin de cerner le fonctionnement hydraulique et agronomique global d'un milieu qu'ils connaissent bien. Bien que n'étant pas une étude fine, ce processus d'enquêtes permet d'améliorer notre connaissance de la topographie et donc des zones et niveaux d'inondation, d'établir des scénarios de gestion et pompage en phase avec la réalité et enfin de comprendre la dynamique agricole et son évolution face à une réhabilitation de preks.

En complément de ces enquêtes ont été réalisés des relevés et observations concernant la topographie générale, les points spécifiques (hauteur de digue, de déversement, dimensions de conduite), les niveaux d'eau (prek et zones inondées) ainsi que les caractéristiques permettant de déterminer la capacité d'une pompe (hauteur de relèvement, longueur d'aspiration et refoulement, diamètre du tuyau, puissance du moteur).

2.3. Modélisation hydraulique des canaux

Face à une meilleure compréhension de la zone et de son fonctionnement général grâce aux enquêtes, il est désormais possible d'envisager de modéliser le fonctionnement hydraulique des preks.

Etant donné les divers programmes de réhabilitation, les preks rencontrés dans la région de Kandal possèdent des caractéristiques différentes. L'étude s'intéresse à eux selon trois grandes caractéristiques : la cote d'entrée du prek, la présence d'une vanne en entrée et l'existence d'un service d'approvisionnement en eau par pompage en entrée. Le fonctionnement hydraulique sera ainsi évalué selon les caractéristiques que peut présenter le canal. Les attributs du prek tels que sa longueur et sa géométrie seront choisis en s'appuyant sur ceux du Prek Wat Koh Teav du district de Koh Thom. De par sa récente réhabilitation de 2016, il demeure le mieux documenté des zones d'étude (SOFRECO, 2015,c) .

2.3.1. Construction du modèle

En tant que première approche de modélisation hydraulique d'un prek, il a été décidé de se limiter à une approche de bilan journalier. Cette méthode simple est suffisante pour rendre compte des phénomènes qui commandent le niveau d'eau dans le canal ainsi que dans la plaine d'inondation qui lui est associée. En revanche, elle ne permet pas de représenter les dynamiques hydrauliques rapides, comme la propagation des ondes hydrauliques dans les canaux ou les vitesses d'écoulement dans les preks. Il a également été choisi de construire le modèle via le logiciel de calcul numérique SciLab plutôt que d'utiliser un modèle déjà existant. Cela a l'avantage d'une flexibilité sur les termes à renseigner, spécifiques du domaine étudié. De plus, la construction d'un modèle simple mais spécifique au cas d'étude s'avère avantageux face à l'adaptation d'un modèle déjà construit (Savenije, 2009).

Bilan journalier

Le bilan journalier consiste à évaluer quotidiennement le remplissage et la vidange du prek et de la plaine inondable afin de calculer l'évolution journalière du stock d'eau présent. L'hypothèse est donc faite que le canal se comporte tel un réservoir dont le volume à l'instant t est régi par le volume au pas de temps précédent auquel il faut ajouter les apports et déduire les prélèvements. A ce premier réservoir est connecté un second venant représenter la plaine inondable.

A l'état initial, le prek est généralement considéré comme vide. Pour les pas de temps suivants, le remplissage est régi par le niveau d'eau du Bassac, que l'analyse hydrologique a permis de reconstituer au point d'entrée considéré, et l'ouvrage éventuel qui contrôle le débit entre le Bassac et le prek. La variation de volume (dV) au cours du temps est égale à la somme des flux :

$$\frac{dV}{dt} = \sum Flux$$

Parmi ces flux, on ajoute les débits entrant dans le prek et on soustrait ceux sortant. Les flux intervenant dans le bilan sont donc le débit échangé entre le prek et la rivière, le débit prélevé par pompage des agricultures, les débits correspondant à la pluie et l'évaporation et enfin le débit échangé entre le prek et la plaine inondable.

D'où $\frac{dV}{dt} = Q_{échangé\ (Bassac-prek)} - Q_{prélèvements} + Q_{pluie}$[1] $- Q_{évaporation} - Q_{échangé\ (Prek-plaine)}$

Le débit pompé quotidiennement pour alimenter le prek (Figure 14) lorsque le niveau de la rivière est trop bas est compté dans le débit échangé entre le Bassac et le prek. A partir du calendrier de pompage établis par les enquêtes, il a été possible d'évaluer le nombre d'heures de pompage moyen par jour, ensuite converti en volume en considérant un débit moyen de pompage de l'ordre de 300 m^3/h. Ce débit résulte d'une moyenne faite sur la détermination des capacités des pompes rencontrées en entrée. La méthode d'évaluation de la capacité de ces pompes utilisant la puissance du moteur est explicitée en Annexe G.

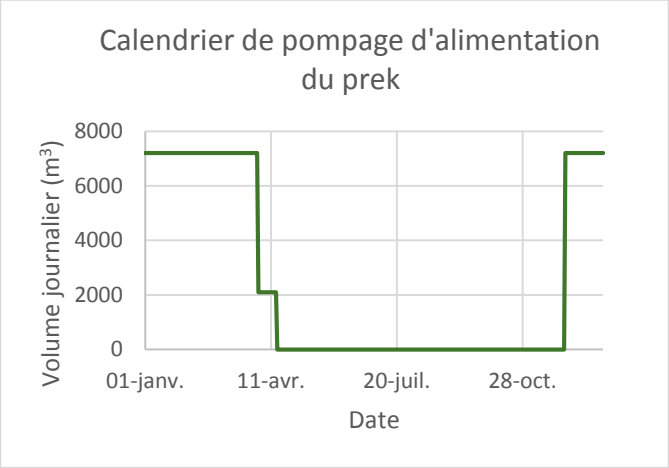


Figure 14 : Calendrier de pompage d'alimentation du prek

[1] Pour obtenir des valeurs journalières de pluie, les données mensuelles ont été divisées par le nombre de jours dans le mois considéré.

En s'appuyant sur les dires des agriculteurs le long du Prek Ta Ong dans la commune de Prek Ambel, il a été possible d'estimer le temps de pompage quotidien représentatif des cultures présentes. Une analyse géométrique faite sur le jet d'une pompe individuelle a permis d'évaluer le débit de ces pompes individuelles à 18 m^3/h. La méthode de calcul est présentée en Annexe H. A partir des observations, nous avons également estimé le nombre moyen de pompes à 6 tous les 100 mètres.

Cela permet alors d'établir un calendrier de pompage par les agriculteurs représentant le volume pompé par jour et par mètre linéaire de canal (Figure 15).

Dans l'absence d'information concernant l'infiltration ainsi que l'apport de la nappe phréatique, nous ferons l'hypothèse qu'il n'y a pas de transfert d'eau entre le sol et le canal.

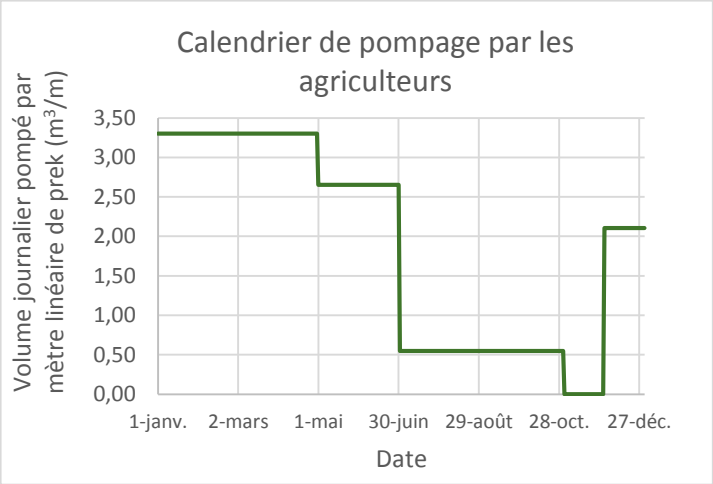


Figure 15 : Calendrier de pompage par les agriculteurs

Le schéma de calcul utilisé pour le modèle est de type explicit, c'est-à-dire que le calcul à l'instant t dépend du calcul à l'instant précédent. Afin de permettre une meilleure précision, ce mode de calcul nécessite donc d'opter pour un pas de temps de calcul fin que l'on a choisi égale à 1 min pour l'étude. Cela permet d'éviter des oscillations incessantes autour de la valeur réelle.

Géométrie

Le Prek Wat Koh Teav situé à 27 kilomètres en aval de la station Koh Kelh et ayant fait l'objet d'une réhabilitation en 2016 (SOFRECO, 2015,c) sera pris comme référence pour les caractéristiques géométriques. Ainsi la longueur est fixée à 2400 mètres, la section est trapézoïdale de largeur au fond 3 mètres avec une pente des berges de 1,5. La cote minimale de la berge, c'est-à-dire la cote du point de déversement lorsque le prek est sur le point de déborder est fixée à 3,5 mètres asl avant réhabilitation (Figure 16 et Figure 17). L'option après réhabilitation envisage un niveau de débordement à 5,7m asl. Le niveau de fond du prek dépend du type de calibration : 0m asl pour une *deep calibration*, 1,5m asl pour une *shallow calibration* et on impose un niveau de fond de 2m asl pour représenter les canaux non réhabilités.

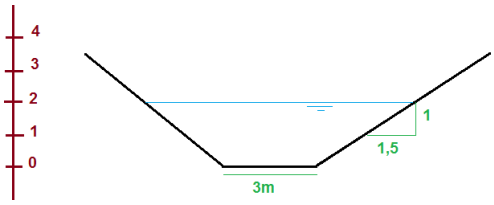


Figure 16 : Schéma d'une coupe transversale du prek
Source : Auteur

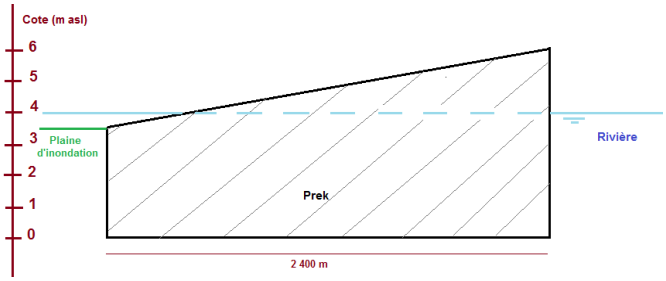


Figure 17 : Schéma d'une coupe longitudinale du prek
Source : Auteur

Lois hydrauliques

Plusieurs lois hydrauliques commandent les transferts d'eau dans le prek.

Tout d'abord la loi de vanne qui contrôle l'entrée d'eau dans le prek depuis la rivière. Dans le cas d'une vanne noyée, c'est à dire que le ressaut aval est collé à la vanne ce qui entraine une influence de la hauteur d'eau aval sur le débit, ce qui est presque toujours le cas:

$$Q = C_d * A * W * \sqrt{2g} * \sqrt{h_{AM} - h_{AV}}$$

Avec Q : le débit sous la vanne (m^3/s)

W : ouverture de la vanne, distance entre le seuil et le bas de la vanne (m)

A : largeur de la vanne égale à 4 mètres (2 mètres par vanne)

C_d : coefficient de débit pouvant être pris égal à 0,6 lorsque $\frac{W}{h_{AM}}$ est petit.

g : 9,81 m/s²

h_{AM} : hauteur d'eau en amont de la vanne (m)

h_{AV} : hauteur d'eau en aval de la vanne (m)

(Belaud, Cassan, & Baume, 2009)

Dans le cas d'absence de vanne, le comportement hydraulique suivra une loi de seuil (Figure 18).

Si le seuil est dénoyé, c'est-à-dire si $H_{AV} < \frac{2}{3} H_{AM}$

Alors $Q = C_d * A * \sqrt{2g} * H_{AM}^{3/2}$

Avec $C_d = 0{,}4$

Au contraire si le seuil est noyé,

$$Q = C'_d * A * \sqrt{2g} * H_{AV} * \sqrt{H_{AM} - H_{AV}}$$

$$Avec\, C'_d = C_d * \frac{3\sqrt{3}}{2}$$

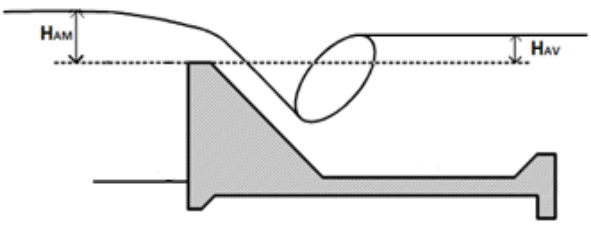


Figure 18 : Schéma illustrant l'écoulement au-dessus d'un seuil

Dans le cas d'un débordement du canal, on fera l'hypothèse que le seuil de débordement se comporte tel un déversoir frontal de largeur égale à celle du canal à la hauteur de déversement fixée. Le volume

déversé va alors remplir ce qui forme une deuxième bassine dont le remplissage est régi par une relation entre la hauteur et la surface (représentation de la topographie de la plaine inondable).
Le script du modèle est présent en Annexe I.

2.3.2. Objectifs des modélisations

Influence de l'ouverture de la vanne

La mise en place de vannes doit permettre de bloquer le flux d'eau entrant ou sortant. Il est donc intéressant de connaitre la sensibilité d'ouverture de la vanne face au transfert d'eau. La simulation de remplissage du canal va permettre de se rendre compte du temps de remplissage de celui-ci selon l'ouverture de la vanne et le niveau d'eau dans la rivière. A l'état initial le prek est vide et le niveau d'eau du Bassac sera pris à 1, 2 ou 3m asl. Il sera alors possible d'évaluer l'influence du niveau d'eau de la rivière sur le remplissage du prek ainsi que l'influence de l'ouverture de la vanne. Un scénario envisagera également l'influence d'une réduction de moitié de la largeur de la vanne. Ces résultats permettront également d'émettre un commentaire quant à l'erreur de construction qui, selon les habitants, bloque actuellement la fermeture des trois vannes installées à Prek Wat Koh Teav et Prek Sem à une ouverture entre 30 et 50 centimètres.

Influence du niveau de calibrage du prek sur la disponibilité en eau

Selon le niveau d'entrée du canal, il est facilement imaginable que la disponibilité en eau va en être impactée. En effet, un prek non réhabilité dont le fond se situe en moyenne à 2m asl, ne pourra recevoir d'eau lorsque que la cote de la rivière est supérieure à la sienne. De plus, il a été remarqué que certains preks devant être calibrés à un niveau zéro asl sont en réalité conçus au niveau 1 mètre asl. Quel en est la conséquence sur la disponibilité en eau ? La modélisation a donc pour objectif de quantifier cette disponibilité en eau.

Disponibilité de l'eau : Coût de réhabilitation VS coût de pompage

Dans le cas où l'eau est disponible en permanence, que ce soit grâce à un approvisionnement par pompage ou grâce à une arrivée gravitaire, nous discuterons le coût pour l'agriculteur entre la redevance de pompage ou la redevance de maintenance. Ainsi, cela ouvrira des pistes de réflexions pour poursuivre vers de futures recommandations en termes de choix de réhabilitation optimaux pour l'agriculteur.

Protection inondation VS coût d'investissement et maintenance de la vanne

Les enjeux face aux inondations des périmètres irrigués sont nombreux. D'une part, pour augmenter la production en multipliant les cycles de cultures, les agriculteurs souhaitent s'affranchir du risque d'inondation pour pouvoir cultiver tout au long de l'année. D'autre part, il y a un intérêt à laisser la crue envahir les parcelles afin d'apporter les nutriments nécessaires au sol.

Parmi les options de réhabilitation, la mise en place de vanne d'entrée et/ou sortie est envisagée. Elles doivent permettre de retarder ou stopper la crue tout en maintenant un niveau d'eau suffisant pour le pompage des agriculteurs. A l'aide de plusieurs simulations, nous évaluerons si la vanne est capable de répondre totalement ou partiellement aux attentes de protection contre les inondations et de disponibilité de l'eau. De plus, nous évaluerons la période d'inondation en l'absence de vanne.

2.3.3. Des indicateurs comme outils d'analyse

Dans le but de pouvoir répondre aux objectifs de la modélisation, il est nécessaire d'établir des indicateurs permettant une comparaison rigoureuse des différentes simulations qui vont être réalisées.

Afin de caractériser la disponibilité en eau, nous allons évaluer la durée pendant laquelle le prek est à sec. Le volume présent dans le prek est également stocké pour chaque simulation, ce qui permet d'évaluer quotidiennement la quantité d'eau disponible pour l'irrigation. Pour caractériser l'inondation, il sera calculé la surface inondée par le prek ainsi que la hauteur d'eau présente dans la plaine et la durée de débordement. Bien que pris indépendamment des simulations, les indicateurs généraux concernant les coûts de pompage en entrée et les coûts de maintenance de preks réhabilités seront également calculés.

3. DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE

Dans la zone amont du delta du Mékong, entre la capitale cambodgienne et la frontière vietnamienne, se trouvent les deux secteurs agricoles sur lesquels nous allons nous focaliser pour l'étude. Tous deux situés en rive droite du Bassac, ils présentent un intérêt d'étude de par leur réseau de preks, source d'irrigation caractéristique de cette région, dont certains ont bénéficié de programmes de réhabilitation. De plus, il s'avère que ces périmètres sont peu connectés avec l'extérieur ce qui permettra par la suite de les étudier de manière unique.

3.1. Zone Nord

3.1.1. Présentation géographique

C'est dans la commune de Prek Ambel, district de S'ang que se positionne la première zone, que nous nommerons pour la suite « zone Nord ». A une cinquantaine de kilomètres de la naissance du Bassac au niveau de Phnom Penh se trouve la diffluence avec la rivière Prek Ambel vers l'Ouest. Celle-ci borde notre périmètre d'étude au Nord et à l'Ouest. La délimitation Sud se fait avec le Prek Toam, également frontière entre les districts de S'ang et Koh Thom. La partie Est est bien évidemment délimitée par le Bassac comme nous pouvons le voir en Figure 19. Neufs villages sont présents sur la zone dont nous pouvons visualiser les territoires en Annexe J.

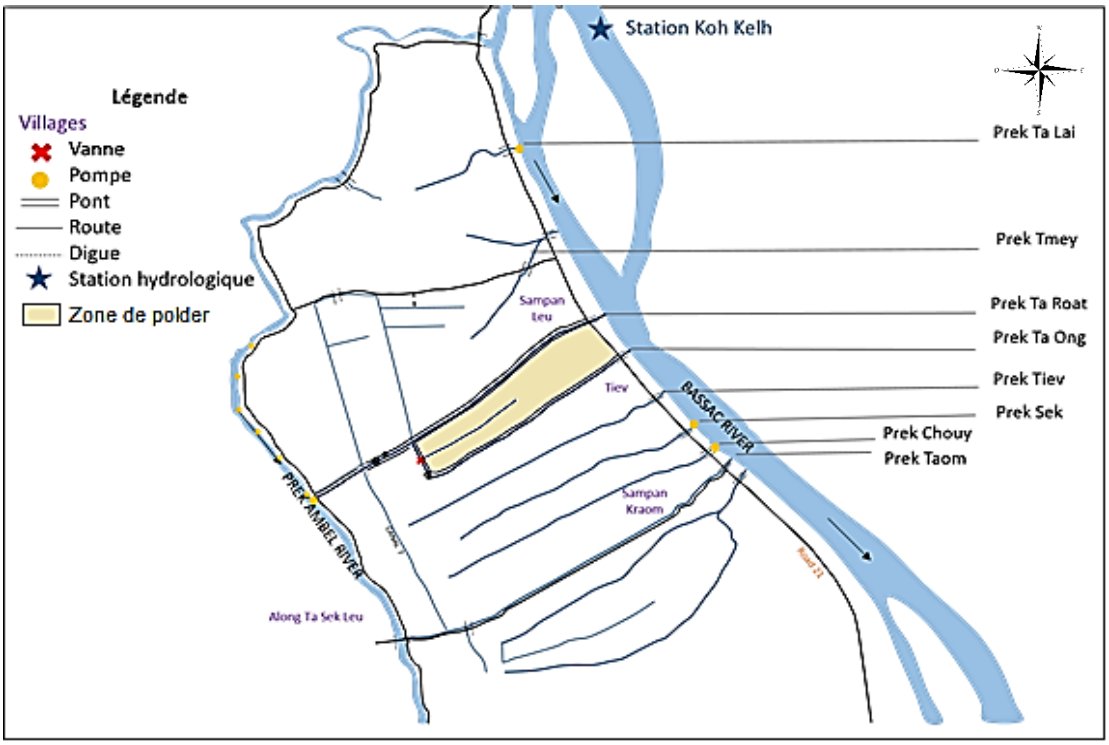


Figure 19 : Schéma de la zone Nord
Source : Auteur

3.1.2. Hydrologie

Ce secteur d'étude se situe entre 0 et 4,4 kilomètres de la station limnimétrique de Koh Kelh. A partir de l'hydrographe du Bassac à la station Koh Kelh (Annexe A) ainsi que la courbe de tarage, il est possible de reconstituer les hauteurs d'eau aux points considérés comme indiqué dans la Partie 2.1.2. Ci-dessous, en Figure 20, sont ainsi représentés les hydrographes du Bassac des limites Nord et Sud du site d'étude.

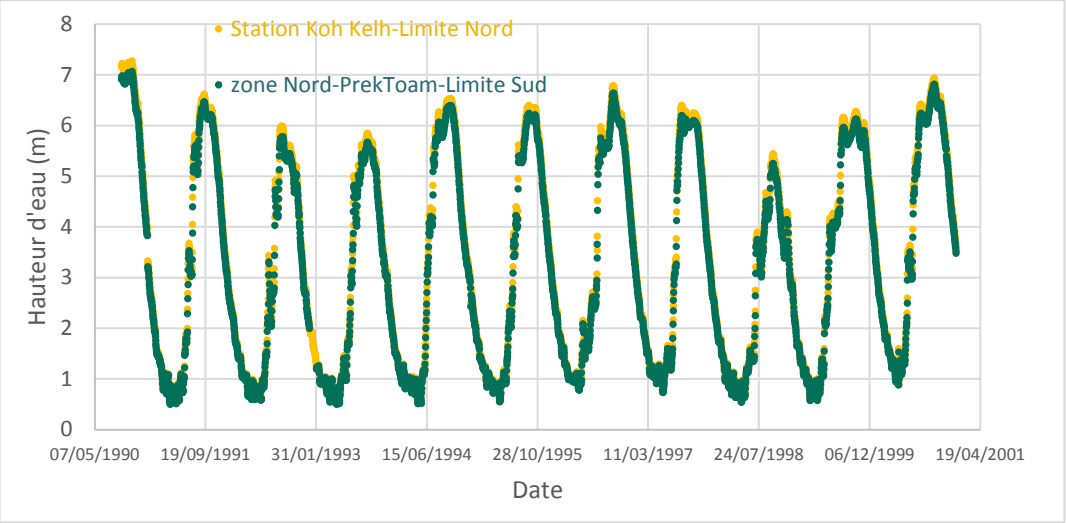


Figure 20 : Graphique des hauteurs d'eau à Koh Kelh et Prek Toam
Source : Données MRC *Crédit : Auteur*

La station étant relativement proche, nous observons une différence de hauteur d'eau maximale de l'ordre de la vingtaine de centimètres aux hautes eaux.

3.1.3. Topographie

A l'image de la topographie d'une zone de delta, l'aire étudiée a une altitude comprise entre zéro et dix mètres. Ne disposant pas de modèle numérique de terrain (MNT) suffisamment précis en surface ou en altitude, il a été nécessaire d'affiner notre connaissance de la topographie. C'est ainsi qu'à la suite des observations terrain et des témoignages des habitants, une estimation des zones inondées couplée à la fréquence et au niveau d'inondation a pu être réalisée (Annexe K).

Cette évaluation, bien qu'approximative permet tout de même de différencier quelques grandes zones topographiques se comportant de la même manière face au stockage des eaux. Un sondage du périmètre à l'aide d'un GPS différentiel permettrait une précision centimétrique et donc une meilleure connaissance de la topographie du terrain. Le long du Bassac, le bourrelet de berge impose un niveau élevé ainsi que le long de Prek Ambel où la route forme une digue. Sur les parties hautes se trouvent les parcelles dites « Chamcar » et en aval des preks, sur les parties basses, ce sont les « boeungs ». Les berges des canaux constituent également des points hauts ce qui donne lieu à une « cuvette » entre chaque prek (Figure 2, Figure 3, Figure 4).

3.1.4. Activités agricoles

Sur les “chamcars”, les cultures maraichères et fruitières sont majoritaires. On retrouve principalement des légumes et haricots, des manguiers et bananiers, ainsi que de la canne à sucre. Sur les parcelles plus basses se cultive principalement le riz (riz flottant en zone inondée, riz de saison sèche, riz de saison humide). Les enquêtes ayant permis de récolter quelques informations agronomiques sur la zone, analysons quelques données concernant les cultures de canne à sucre spécifiques à cette zone.

D’après les données issues des enquêtes concernant la canne à sucre, deux périodes de plantation ressortent : mai-juin et janvier-février. Les durées de cycle s’étendent majoritairement entre 8 et 11 mois. A l’aide du logiciel agro-climatique Cropwat développé par la FAO et des données génériques qui y sont fournies, il est possible de déterminer les besoins en eau d’une culture. Pour une culture de canne à sucre, le cycle de culture est d’un an d’après les données du logiciel. Ainsi, à partir des données de pluie dont nous disposons (CHIRPS année 1997), de données d’évapotranspiration de référence issues du modèle (ville de Kurnool en Inde) proches de celles évaluées pour l’étude (ET0 moyenne utilisée égale à 5,36 mm contre 5,49 mm évaluée pour l’étude), et d’une date de plantation fixée au 1er mai, nous en déduisons les besoins en irrigation de la culture de canne à sucre (en bleu foncé sur la Figure 21. Comparons ces derniers avec l’apport moyen en irrigation pour cette même culture évalué à partir des enquêtes (en vert sur la Figure 21). On observe une certaine disparité entre les attentes du modèle et la réalité, cela amène alors à préciser les données climatiques utilisées. Pour cela, la base de données Climwat dispose de pluies et d’évapotranspirations moyennes mesurées à Phnom Penh. La simulation réitérée avec ces données climatiques donne les résultats en bleu clair sur la Figure 21. Malgré une plus grande précision des données, les résultats du modèle ne se rapprochent pas de ceux attendus par les enquêtes. Cela indique donc la grande variabilité que peuvent amener les divers paramètres de culture (type de sol, données climatiques, date de plantation, variété, validité des données des enquêtes, évaluation quantitative de l’apport en irrigation) ainsi que la variabilité climatique rencontrée dans cette région tropicale.

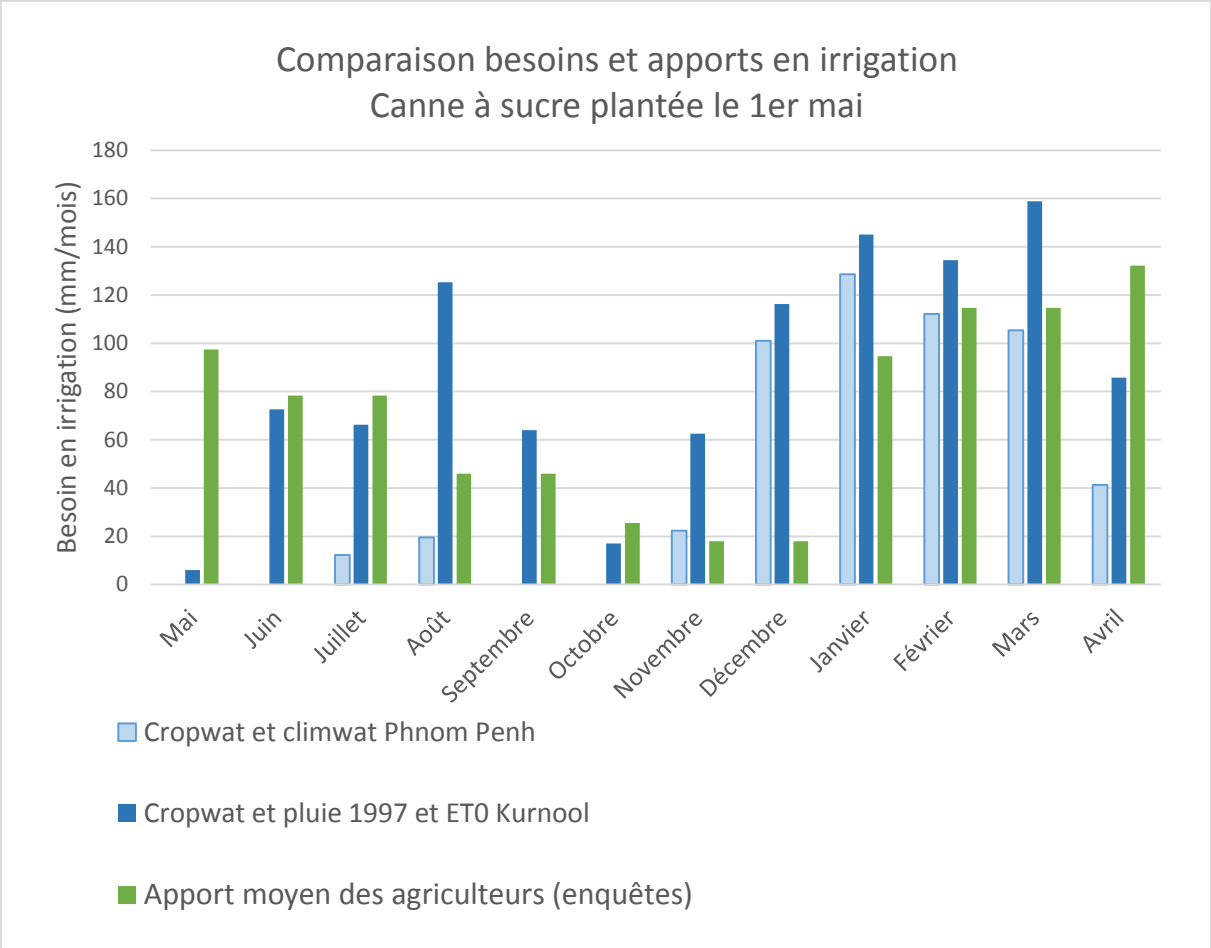


Figure 21 : Besoins en irrigation mensuels selon cropwat VS apports moyens mensuels en irrigation selon les agriculteurs Cas de la canne à sucre plantée le 1er mai Source : Cropwat & Auteur Crédit : Auteur

On observe tout de même un apport de la part des agriculteurs supérieurs aux besoins estimés par le modèle en début de saison humide (avril à juillet) et au contraire une irrigation plus faible que les besoins estimés par le modèle en début de saison sèche (novembre à janvier).

Réhabilitation des preks

Les preks Ta Roat et Ta Ong ont fait l'objet d'un programme de réhabilitation de l'AFD mené par KOSAN Engineering et Agri-Cam à partir de 2007. Cette réhabilitation a consisté en la création d'un polder entre ces deux preks en surélevant leurs berges et en installant une digue entre les deux terminaisons de canaux afin de supprimer tout risque d'inondation pour les parcelles à l'intérieur du polder. Une vanne au milieu de la digue de sortie a également été installée dans la continuité du canal de drainage du polder. Un allongement du Prek Ta Roat jusqu'à la route de Prek Ambel a également été fait (KOSAN Engineering, 2011).

Plus au Nord, le Prek Ta Lai a fait l'objet d'une réhabilitation récente dans le cadre du projet WASP (2013, lot 1, 13 preks). Le canal a été recalibré et creusé. Une vanne de sortie a été installée ainsi

qu'une prise bétonnée au niveau du Bassac. La réhabilitation étant récente, et le choix de conception étant celui d'une « shallow calibration », le Prek devrait accueillir prochainement une pompe flottante d'approvisionnement ainsi que des vannes en entrée.

Pompage

Tous les preks, excepté Prek Toam, possèdent un service de pompage en entrée assuré par un petit entrepreneur local et permettant l'approvisionnement en eau du prek depuis le Bassac lorsque le niveau d'eau en saison sèche ne permet pas une alimentation gravitaire. Les capacités de pompage de l'ordre de 300 m^3/h sont déterminées à partir de données terrain préalablement récoltées (hauteur de relèvement, puissance du moteur, taille des tuyaux). Le calcul de ces débits de pompage est détaillé en Annexe G. D'après les enquêtes, nous pouvons également établir un calendrier de pompage représentatif d'une activité moyenne pour le fournisseur d'eau (Figure 14). Les pompes sont actives uniquement en saison sèche, généralement de décembre à mars.

Le long des preks, les agriculteurs irriguent leur parcelle à l'aide de pompes individuelles. Généralement toutes de la même taille, on estime à 18 m^3/h leur débit de pompage. La méthode géométrique de détermination de ce débit est présentée en Annexe H.

Les parcelles ne pouvant pas bénéficier de l'eau du prek utilisent un puits individuel profond d'une trentaine de mètres. D'après les agriculteurs il est difficile d'évaluer le niveau de l'eau souterraine mais il semble être relativement proche (inférieure à 10m).

3.2. Zone Sud

3.2.1. Présentation géographique

Plus au sud de la première zone d'étude, à environ 8 kilomètres avant la frontière vietnamienne se trouve notre deuxième zone d'étude. D'une étendue de 9,5 kilomètres carrés, elle se trouve sur la rive droite du Bassac, bordée au Nord par le cours d'eau Prek Tiev et au Sud par le Prek Rous et sa digue qui se poursuit jusque sur la partie ouest de la zone (Figure 22). Cette zone irriguée est traversée par quatre villages, tous appartenant au district de Koh Thom, province de Kandal (Annexe J).

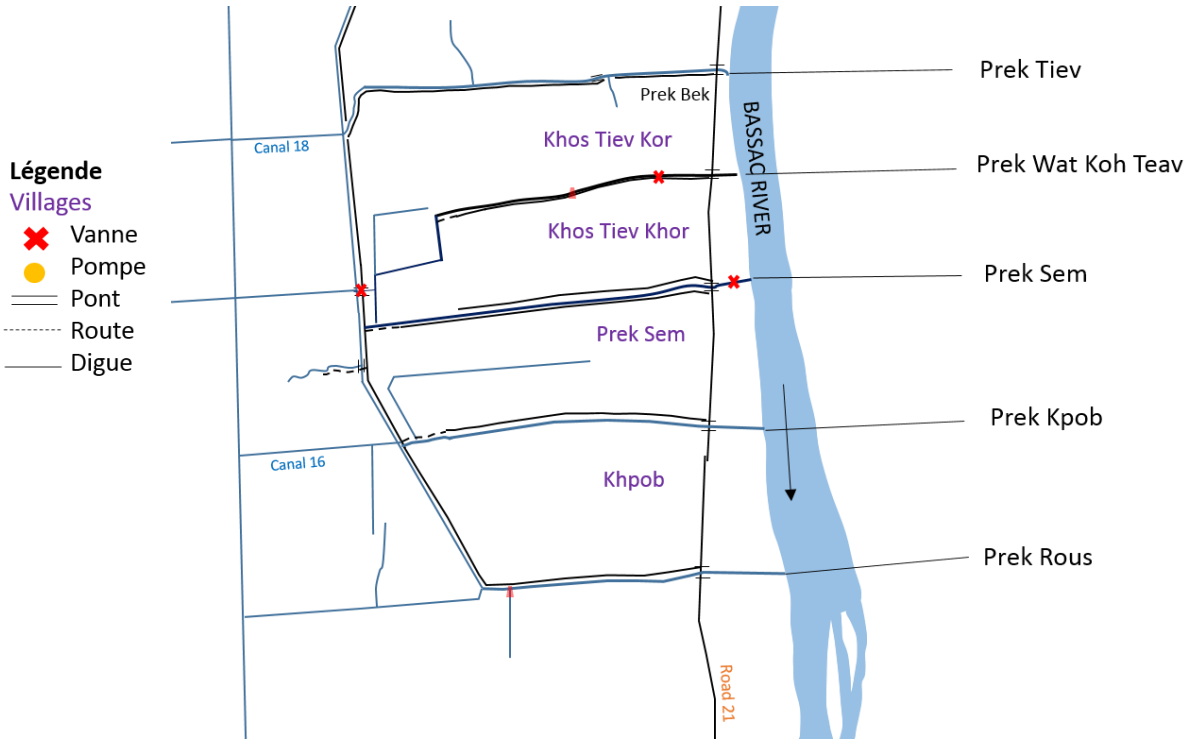


Figure 22 : Schéma de la zone Sud
Source : Auteur

3.2.2. Hydrologie

Située plus proche de la mer, la rivière Bassac à ce niveau ressent plus fortement l'influence de la marée. On voit apparaitre de fortes oscillations, principalement aux basses eaux.

De plus, comme expliqué en Partie 2.1.1, on observe un phénomène d'hystérésis ce qui signifie que selon la phase de crue ou décrue, pour un même débit, la hauteur d'eau sera différente.

La hauteur d'eau du Bassac au niveau de ce deuxième périmètre doit être reconstituée car les stations limnimétriques les plus proches sont situées à 26 kilomètres au nord (station amont Koh Kelh) et 47 kilomètres en aval (Station Aval Chau Doc). Comme effectué pour la zone Nord selon la méthode explicitée en Partie 2.1.2, nous reconstituons la hauteur d'eau à ce niveau (Figure 23). Bien que cette reconstitution ne prenne pas en compte le phénomène d'hystérésis, les valeurs de hauteurs d'eau sont

tout de même plus représentatives de la réalité que celles issues des stations Koh Kelh ou Chau Doc. En effet, le dénivelé de hauteurs d'eau entre les deux stations peut atteindre les 56 centimètres tous les 10 kilomètres. Ainsi, à une distance d'environ 25 km en aval de Koh Kelh et 45 km en amont de Chaud Doc, on s'attend à trouver un niveau d'eau moyen pouvant aller jusqu'à 6 mètres asl (soit 1,5 mètres en-dessous du niveau à Koh Kelh et 2,5 mètres au-dessus du niveau de Chau Doc.)

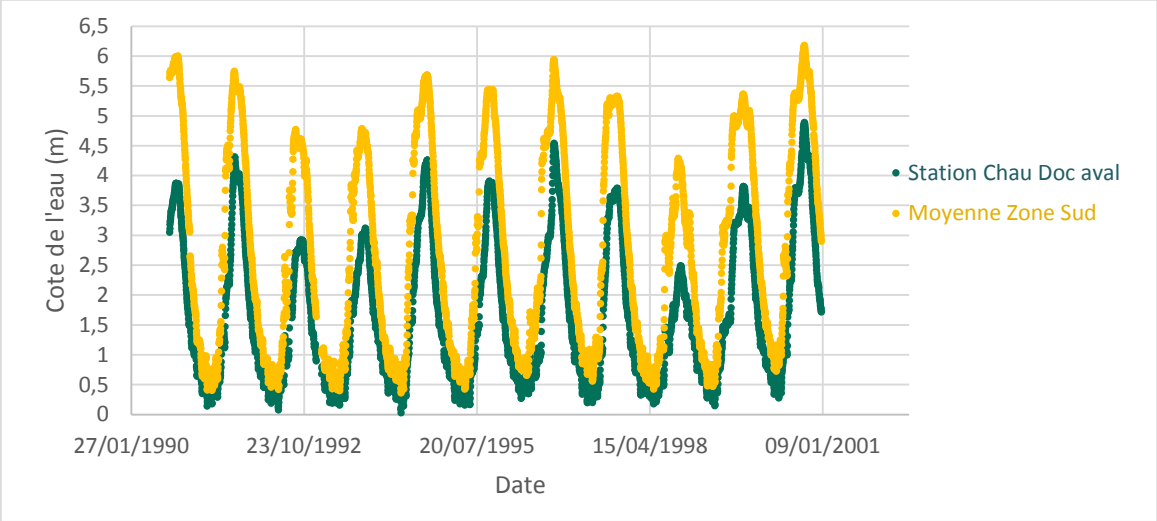


Figure 23 : Niveau d'eau à la station aval (Chau Doc) et niveau d'eau reconstitué au niveau de la zone d'étude Sud

3.2.3. Topographie

D'un point de vue topographique nous disposons de la même précision de données que pour la zone Nord. De plus, on retrouve l'organisation générale des zones de chamcars et boeung. De la même manière, nous avons affiné notre connaissance du terrain selon les dires des habitants et nos observations terrain. Nous pouvons donc estimer la topographie selon le niveau d'eau présent lors des inondations (Annexe K).

Très similaire à la première zone d'étude, nous retrouvons sur ce secteur les cultures maraichères et fruitières sur les chamcars ainsi que le riz sur les parties basses. On note la quasi disparition de la culture de la canne à sucre pour une augmentation des parcelles de maïs.

3.2.4. Irrigation et réhabilitation

Réhabilitation des preks

Au sein de la zone d'étude, les preks Wat Koh Teav et Sem viennent d'être réhabilités dans le cadre du projet WASP. Tous deux ont été recalibrés au niveau zéro asl afin de permettre un approvisionnement gravitaire tout au long de l'année puisqu'à ce niveau la cote de l'eau est toujours supérieure à 0,35m asl (Figure 23). Une vanne d'entrée contrôle l'arrivée d'eau et un système de drainage en aval reliant

les deux preks a été construit. Celui-ci débouche sur une vanne dite de sortie permettant le contrôle des flux d'eau entre les preks et le réseau de canaux situé à l'Ouest de la digue. La fin des travaux datant de 2016, les agriculteurs n'ont pour la plupart pas encore opéré les changements que cette réhabilitation apporte.

Coûts de réhabilitation pour le Prek Wat Koh Teav

Nous allons ici recenser les coûts de réhabilitation pour le Prek Wat Koh Teav utilisé pour le modèle par la suite. Le coût total de la réhabilitation a été évalué par l'étude de SOFRECO (2015,d) à 448 587 US$. A cela s'ajoutent les frais d'opération et maintenance d'un total de 21 986 US$/an. Le détail de ces coûts donnés par SOFRECO figure dans les Table 5 et Table 6.

Table 5 : Coûts des travaux
Source : (SOFRECO, 2015,d)

Description	Prix (US$)
Construction	
General	15 350
Creusement pour calibrage à 0m asl	172 953
Route	50 109
Vanne d'entrée	57 326
Vanne de sortie	15 717
Travaux divers	950
Ingénierie	17 338
Imprévus (10%)	32 973
Supervision des travaux	10 881
Autres	
Pont	75 000
Total	448 587

Table 6 : Coûts d'opération et maintenance
Source : (SOFRECO, 2015,d)

Description	Prix (US$/an)
Maintenance	
Désherbage des berges	6 416
Route d'accès	12 150
Vanne	120
Opération	
Maniement de la vanne	300
Garde	300
Redevance (PUC)	1 250
Administration	1 500
Total	21 986
Total par utilisateur (217 utilisateurs)	101
Total par hectare (280 ha)	79

Pompage

La plupart des agriculteurs n'ont pour le moment pas encore changé leur source d'irrigation. Les preks n'ayant pas bénéficié d'une réhabilitation ne possèdent pas de pompes en entrée comme c'était le cas pour la première zone ce qui oblige les agriculteurs à puiser l'eau souterraine. Ils disposent pour la majorité de puits sur leur parcelle d'une profondeur comprise entre 30 et 40 mètres qui leur assurent une disponibilité de l'eau toute l'année pour cependant un coût de pompage plus élevé. Il n'a pas été réalisé d'étude piézométrique, néanmoins les observations terrains et le retour des irrigants laissent à penser que le niveau d'eau de la nappe est plutôt proche (inférieur à 10m).

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Fonctionnement général du prek

Comme il a été vu précédemment, le remplissage du canal est commandé par le niveau à l'amont, c'est-à-dire la cote de l'eau dans le Bassac. Le niveau d'eau dans le canal va en permanence s'égaliser avec celui de la rivière lorsque que la cote d'entrée le permet. Ainsi, la Figure 24 représente le niveau d'eau dans le Bassac et le prek tout au long de l'année hydrologique 1997 (débutant lors des basses eaux, le 1er mars de l'année) pour un niveau de calibrage du canal à 1m asl. Il apparait que dès que le niveau du Bassac est supérieur au point d'entrée du prek, la cote de l'eau dans les deux sera alors identique. Le niveau d'eau maximal du prek est tout de même conditionné par son point de débordement (c'est-à-dire le niveau le plus bas de la berge au niveau de laquelle le prek débordera en premier) et la capacité que peut accueillir la plaine d'inondation. Ainsi avec un point de débordement établi à 3,5m asl avant réhabilitation, on observe que le niveau d'eau dans le prek monte jusqu'à environ 4,5m asl, soit un remplissage d'un mètre de la plaine.

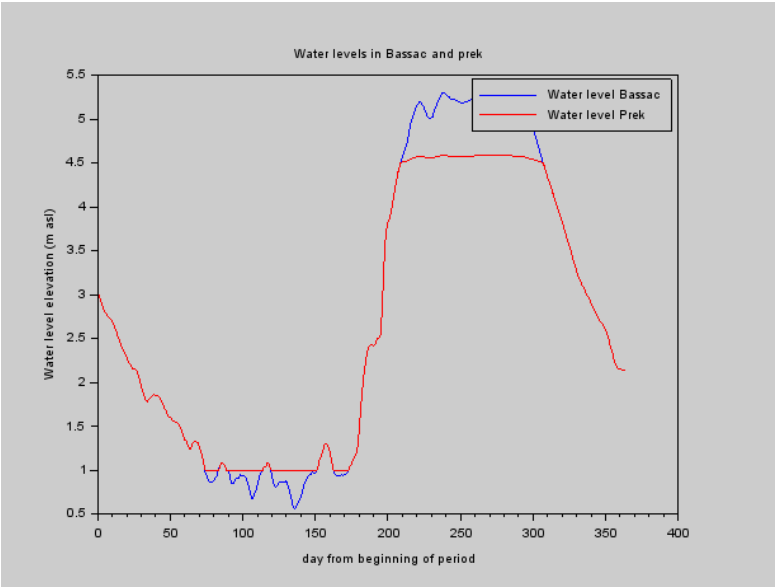


Figure 24 : Niveau d'eau dans le Bassac et le prek calibré à 1m asl
Source : Auteur

4.2. Influence de l'ouverture de la vanne

Suite à la récente réhabilitation des preks Wat Koh Teav et Sem, les usagers affirment que les vannes mises en place en entrée de ces preks et en aval du système de drainage ne peuvent pas être totalement fermées. Il semblerait qu'un défaut de construction bloque leur fermeture complète laissant ainsi une ouverture de 30 ou 50 centimètres selon les vannes. Une simulation du comportement hydraulique permet de visualiser l'impact de cette ouverture sur le niveau d'eau dans le canal. Nous avons choisi un pas de temps de calcul très faible (1 min) pour simuler la dynamique de remplissage du prek afin de se rapprocher le plus possible du comportement réel. Ainsi, pour une hauteur d'eau dans le Bassac choisie à 3m, une largeur de vanne de 4m et différentes tailles d'ouverture de vanne, nous obtenons les temps de remplissage présentés dans la Table 7. Le remplissage se faisant de manière asymptotique, nous considérons les deux niveaux égalisés en deçà d'un centimètre de différence (Figure 25).

Table 7 : Temps de remplissage du prek selon l'ouverture de la vanne pour un niveau d'eau dans la rivière de 3m

Niveau d'eau dans le Bassac égal à 3m asl	
Ouverture de la vanne (cm)	Temps de remplissage du prek (heures)
10	21h36'
20	10h05'
30	6h29'
40	4h34'
50	3h50'

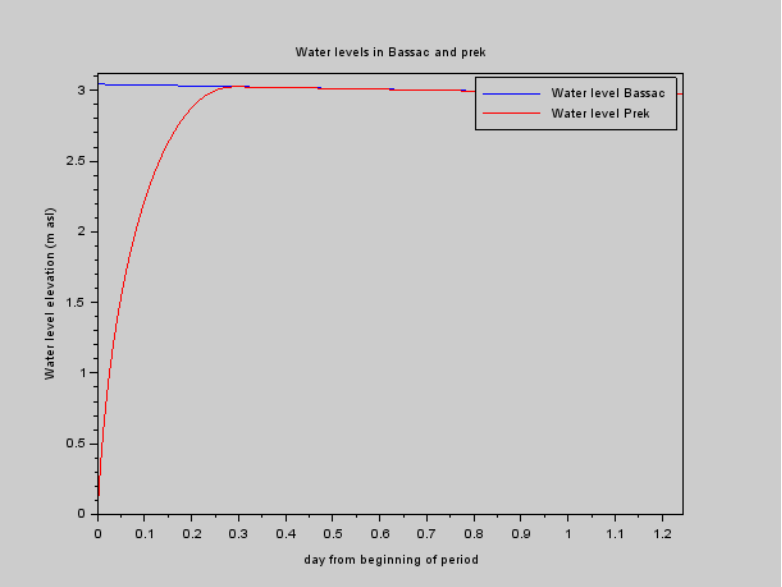


Figure 25 : Remplissage du prek pour une ouverture de vanne de 30 cm et le Bassac à 3m

De la même manière pour un niveau d'eau dans le Bassac de 2 et 1 mètre, les résultats sont présentés dans la Table 8 et Table 9.

Table 8 : Temps de remplissage du prek selon l'ouverture de la vanne pour un niveau d'eau dans la rivière de 2m

Niveau d'eau dans le Bassac égal à 2m	
Ouverture de la vanne (cm)	Temps de remplissage du prek (heures)
10	14h24'
20	6h14'
30	4h19'
40	3h07'
50	2h24'

Table 9: Temps de remplissage du prek selon l'ouverture de la vanne pour un niveau d'eau dans la rivière de 1m

Niveau d'eau dans le Bassac égal à 1m	
Ouverture de la vanne (cm)	Temps de remplissage du prek (heures)
10	8h24'
20	3h36'
30	2h10'
40	1h41'
50	1h15'

Ainsi, bien évidemment il en ressort que le prek se remplit d'autant plus rapidement que la vanne est ouverte et que le niveau de la rivière est bas. En effet, une grande ouverture de vanne permet de laisser passer un débit plus important et un faible niveau dans la rivière nécessite un volume d'eau à apporter plus faible. On voit par ailleurs que la durée de remplissage est toujours inférieure à la journée ce qui est très faible. Si les vannes des Prek Wat Koh Teav et Sem sont effectivement en permanence ouvertes d'une trentaine de centimètres, cela équivaut d'un point de vue protection contre les inondations à une absence de vanne. Il est alors aisé d'imaginer l'incompréhension des habitants face à l'installation d'une telle structure qui ne sera pas à même de répondre à ses objectifs de rétention de crue ou de stockage de l'eau. Les vannes installées dans le cadre des réhabilitations de preks apparaissent donc surdimensionnées face aux besoins de remplissage. Cela représente un coût non justifié qui peut être réduit en optimisant la taille de l'ouvrage.

Regardons alors l'effet d'une réduction de moitié de la largeur de la porte (suppression d'une des deux portes coulissantes, soit 2m de largeur au lieu de 4). Le prek est considéré rempli lorsque que la différence entre les deux niveaux est inférieure à 5 cm. Les temps de remplissage figurent dans la Table 10.

Table 10 : Temps de remplissage du prek pour une vanne large de 2m et un niveau dans le Bassac de 3m

Niveau d'eau dans le Bassac égal à 3m asl et largeur de porte de 2m	
Ouverture de la vanne (cm)	Temps de remplissage du prek
10	60h
20	21h36'
30	14h24'
40	9h50'
50	7h41'

Les temps de remplissage sont alors en moyenne deux fois plus élevés que dans le cas d'une vanne de 4m de large. Une telle ouverture permettrait de répondre aux attentes de la vanne tout en réduisant

sa taille et donc son coût d'investissement. Pour aller plus loin et réduire la structure bétonnée qui accompagne l'ouvrage de vanne, il pourrait être envisagé de réduire la largeur du canal en entrée.

4.3. Influence de la cote de calibrage des preks

Dans le cas d'une *deep calibration,* si le niveau est effectivement à 0m asl, le prek est en eau toute l'année car le niveau de la rivière sera toujours au-dessus. Si maintenant les contraintes ou les choix de conceptions n'ont pas permis ce calibrage, quelles en sont les conséquences en termes de disponibilité en eau ?

Pour cela, évaluons la durée pendant laquelle le prek ne se remplit pas selon plusieurs scénarios de hauteur d'eau du Bassac et deux niveaux d'entrée du prek (1 et 2m).

D'après l'analyse hydrologique réalisée, les années caractéristiques qui seront considérées pour simuler les différents scénarios de hauteur d'eau du Bassac sont 2000 pour représenter une année de hautes eaux, 1993 pour une année de basses eaux et 1997 pour une année normale. Les diverses simulations réalisées permettent de coupler le type d'année avec la durée d'alimentation en eau du prek selon un niveau d'entrée du canal à 1 ou 2m asl (Table 11).

Table 11 : Durée pendant laquelle le prek ne se remplit pas en fonction de l'année considérée

	Année et période de retour	Durée Prek vide (jours) cote prek = 1m asl	Durée Prek vide (jours) cote prek = 2m asl
Année de basses eaux	1993	121	189
Année normale	1997	76	153
Année de hautes eaux	2000	30	118

La période pendant laquelle le prek ne se remplit pas est évidemment d'autant plus importante que le niveau de calibrage est haut et que le niveau de la rivière est bas. Pour une année normale, si le prek est calibré à 1m, il sera à sec pendant environ 75 jours soit plus de 2 mois et demi dans la période la plus sèche entre mars et juin. Si celui-ci est à 2m, cela double sa période de non alimentation passant à environ 150 jours (plus de 4 mois et demi) entre février et début juillet.

Pour l'année 1997, pendant les 76 jours de non alimentation du canal, les agriculteurs demandent un volume de 7 920 m^3/j (Figure 15). Le prek pouvant être utilisés comme réservoir de stockage en installant un porte en entrée, regardons s'il est possible de stocker le volume nécessaire aux agriculteurs pendant cette période. Au volume demandé il faut ajouter l'évaporation et soustraire l'apport des pluies. Ainsi, sur cette période, il serait nécessaire de stocker près de 576 700 m^3 ce qui correspondrait pour un prek de longueur 2 400 mètres à une hauteur d'eau de 11,4 mètres (cote à

12,4m asl). Cela n'est pas réalisable puisque cela reviendrait à doubler la hauteur des berges (aujourd'hui à 5,7m asl après réhabilitation). La cote de calibrage est donc essentielle à la disponibilité en eau dans le prek lorsque celui-ci ne dispose pas de pompe d'approvisionnement.

4.4. Coût de maintenance de réhabilitation VS coût de pompage

Parmi les preks étudiés, dès lors que le fond du canal n'est pas à zéro mètre asl (*deep calibration*), celui-ci ne peut être alimenté de façon gravitaire toute l'année par le Bassac. Si les irrigants souhaitent contourner cette contrainte, ils doivent alors utiliser une pompe en entrée généralement gérée par un petit entrepreneur local. L'analyse qui suit a pour but de comparer, pour une disponibilité de l'eau suffisante dans les deux cas, le coût de maintenance d'une réhabilitation avec le coût de pompage avant réhabilitation.

Pour cela, reprenons les coûts de maintenance établis dans l'étude de réhabilitation (SOFRECO, 2015,d) (Partie 3.2.4). Le coût d'opération et maintenance du Prek Wat Koh Teav a été évalué à 21 986 US$/an. Si ce tarif doit être payé par les agriculteurs à travers une redevance cela équivaudrait à 101 US$ par usager et par an compte tenu des 217 usagers sur le prek ou **0,8 US$/are/an** étant donné les 280 ha de commande du prek. A cela peuvent s'ajouter les frais de construction d'une valeur de 448 587 US$, qui bien que pris en charge dans le projet constituent une dépense à considérer.

Avant réhabilitation, la maintenance du prek n'était pas soumise à une redevance. Celle-ci se faisait à l'initiative des usagers ou grâce à des programmes menés par le Département Provincial du Ministère de la Ressource en Eau et de la Météorologie du Cambodge (PDWRAM). En plus de leurs coûts de production habituels (irrigation à la parcelle, fertilisants, pesticides, rémunération d'employés, location de la parcelle), les agriculteurs doivent une redevance à l'entrepreneur qui alimente par pompage le prek. Cette redevance est établie selon le type de culture, la taille de la parcelle et dans certains cas le nombre de jours de pompage. Les tarifs renseignés lors des enquêtes de la zone Nord et le nombre moyen de jours de pompage permettent d'établir le coût moyen de la redevance par année et par are selon le type de culture (Table 12). Ce coût apparait très varié selon le type de culture mais il faut prendre en compte le fait que les agriculteurs possèdent généralement plusieurs parcelles de cultures différentes (généralement chamcar et boeung) ce qui va moyenner leur coût de redevance.

Table 12 : Coût de la redevance pour le service d'approvisionnement en eau du prek

	Canne à sucre (Chamcar)	Riz (Boeung)	Légumes (Chamcar)
Tarif	700 r/are/pompage	100 $/an	7000 r/are/an
Jours de pompage/an	25		
Coût moyen	4,4 $/are/an	0,01$/are de boeung/an	1,8 $/are/an

La Table 13 renseigne sur le coût de pompage individuel des agriculteurs selon le type de culture. Cette donnée issue des enquêtes montre une grande disparité mais permet de faire ressortir que généralement le coût de la redevance est négligeable devant le coût de pompage de l'agriculteur dans le prek.

Table 13 : Coût de pompage individuel selon le type de culture

Coût de pompage individuel US$/are/an	Canne à sucre Zone Nord	Riz Zone Nord	Riz Zone Sud	Légumes Zone Nord
Min	0,3	0,5	0,34	3,7
Max	20,1	1,4	2,3	19,4
Moyen	4,2	0,8	1,2	11,6

Ne connaissant pas la part de chaque culture sur la zone, il est difficile d'évaluer le coût de la redevance selon les prélèvements de chaque agriculteur. Néanmoins, le coût de redevance de pompage apparait en général plus élevé que le coût de maintenance.

Néanmoins, les résultats obtenus en Table 12 doivent être considérés avec précaution car nous obtenons un autre coût de pompage par une autre méthode de calcul. Dans cette autre méthode, l'hypothèse est faite que le coût de pompage d'un service d'approvisionnement « type » dont le calendrier de pompage a été évalué (Figure 14) est partagé équitablement entre tous les agriculteurs et que l'entrepreneur en charge de l'opération de la pompe ne fait pas de bénéfices (ce qu'ils ont affirmé lors des enquêtes). Le temps de pompage annuel est évalué à 3 013 heures. La pompe a une capacité moyenne de 300 m^3/h et une consommation de l'ordre de 2,5L de carburant par heure pour un tarif de 2 500 riels (0,63$) le litre. Cela équivaut donc à un coût de pompage annuel de 4 710 US$, soit une redevance de chaque agriculteur de l'ordre de **20 US$/an** ou **0,17US$/are/an**. Selon cette méthode, le coût de la redevance apparait presque cinq fois moins élevé que le coût de maintenance après réhabilitation.

Il est évident que l'apport en eau par *deep calibration* est plus important que par pompage. Néanmoins, à aucun moment lors des enquêtes, les agriculteurs bénéficiant d'un service d'approvisionnement du prek par pompage ne se sont plaint d'un manque d'eau. Ainsi, pour une disponibilité en eau suffisante, la variabilité des coûts obtenus invitent à poursuivre cette étude afin d'améliorer la qualité de ces résultats et pouvoir en tirer une conclusion en terme de choix de conception le plus économiquement avantageux pour l'agriculteur.

4.5. Vanne de régulation pour contrôler les inondations

Un des principaux avantages des réhabilitations de preks est la réduction du risque d'inondation par l'installation d'une vanne. En fermant celle-ci dès que le niveau dans le prek atteint le niveau de débordement dans les boeungs, cela permet de protéger les cultures et ainsi de pouvoir augmenter la production. L'étude concernant le Prek Wat Koh Teav (SOFRECO, 2015,c) indique un niveau de débordement aux environs de 3,5 mètres asl avant réhabilitation et 5,7 mètres asl après réhabilitation. Selon les trois types d'années de hauteur d'eau du Bassac, regardons la durée de la période de débordement. La Table 14 indique cette durée dans le cas où le seuil de débordement se situe à 3,5 mètres asl.

Table 14 : Nombre de jours de débordement du prek pour un seuil de débordement à 3,5m asl

Niveau de débordement à 3,5m asl	
Type d'année	Nombre de jours de débordement
2000 – Hautes eaux	178
1997 – Année normale	128
1993 – Basses eaux	112,5

Pour protéger des débordements, il peut être envisagé de fermer les vannes en amont. Cependant, le canal n'étant alors plus alimenté, les pompages des agriculteurs peuvent vider totalement le prek. C'est le cas avec le scénario de pompage établi (Figure 26). Si les vannes sont fermées dès lors que le niveau du Bassac est supérieur au point de débordement à 3,5 m asl alors le canal calibré à 0m asl se viderait en 53 jours environ et resterait vide pendant 18 jours (Figure 27) dans le cas d'une année normale (1997).

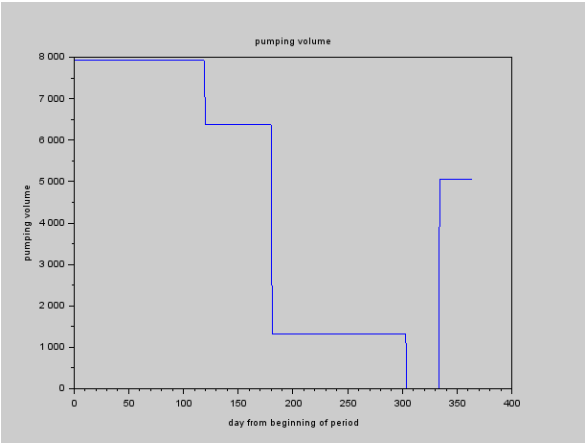


Figure 26: Scénario de pompage journalier des agriculteurs en m3

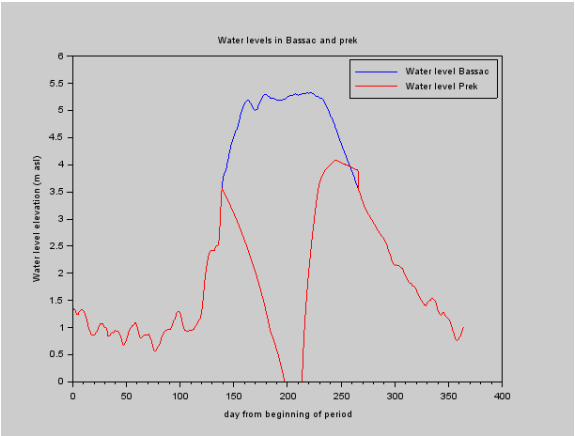


Figure 27 : Niveau d'eau dans le Bassac et le Prek lorsque la vanne est fermée au-delà de Zbassac=3,5m

Il est possible que le calendrier de pompage ait été surévalué par manque d'information et qu'il n'y ait en réalité pas ou peu de pompage lors de la période de fermeture de la vanne. Tout de même, pour pallier ce manque, une ouverture de la vanne quelques heures permettrait de remplir le prek puisque nous avons vu en Partie 4.2 qu'une ouverture de l'ordre de quelques dizaines de centimètre suffisait à remplir le prek jusqu'à un niveau de 3m en moins d'une journée. Si le calibrage du prek a été fait plus haut, le canal mettra moins de temps à se vider car le volume de stockage est plus faible.

Il s'avère qu'au point d'entrée du Prek Wat Koh Teav, le niveau d'eau dans le Bassac ne dépasse jamais dans l'année 5,7 m asl. Le niveau des berges prévu par la réhabilitation permet donc de palier aux problèmes d'inondation. On peut alors se demander pourquoi avoir installé des vannes étant donné que l'étude prévoit également une surélévation des berges. L'absence de campagne topographique lors de ce stage ne permet pas de connaitre la véritable hauteur des berges en aval du Prek Wat Koh Teav suite aux travaux de réhabilitation.

5. LIMITES ET PERSPECTIVES

Cette ultime partie vient poser les limites de l'étude et de son interprétation. Elle émettra également quelques conseils en termes de perspectives et améliorations de ce travail.

5.1. Enquêter pour comprendre et analyser

Qui connait mieux ce territoire, son comportement et les activités qui l'animent que les habitants et les personnes qui y travaillent ? Il me paraît essentiel que toute étude s'appuie sur la connaissance et la réflexion de ceux qui vivent jour après jour l'évolution de cet environnement qui est le leur. La phase d'enquêtes réalisée a été très riche d'enseignements sur la zone ainsi que sur le mode de vie et les besoins de la population locale. Cette première phase constitue un sondage général des zones et de leur fonctionnement afin de poser les premiers résultats et avancer vers les prochaines étapes de compréhension d'un tel système pour répondre aux besoins de développement agricole des populations locales. Il apparaît dans ce travail que beaucoup de données sont issues d'estimations faites à partir d'observations et discussions. Le but n'étant pas d'en faire des analyses statistiques, elles suffisent à rendre compte des phénomènes mis en avant. Tous les résultats sont tout de même à prendre en considérant l'ensemble des approximations qui ont été faites. Les limites des résultats émis dans la partie précédente seront détaillées dans la suite.

5.2. Limites et améliorations du modèle

Les hypothèses de fonctionnement

Le modèle se base sur plusieurs estimations faites à partir des observations et des retours des agriculteurs. Nous allons en détailler les limites qu'elles imposent.

L'absence de données complètes concernant les précipitations dans la zone d'étude n'a pas permis d'étudier la fiabilité des données de pluies (CHIRPS) qui ont été utilisées pour l'étude. De même pour les données d'évapotranspiration dont on a accepté la provenance sans vérifier la fiabilité de l'information.

Il n'a pas été réalisé d'étude hydrogéologique afin d'évaluer les apports de la nappe phréatique. Les observations terrain laissent à penser qu'elle se situe suffisamment proche pour pouvoir interagir avec un prek profond qui serait par exemple en *deep calibration*. Des apports de la nappe impliquent un potentiel remplissage d'un prek où l'eau du Bassac ne peut pas rentrer (niveau de calibrage ou vanne fermée), ce qui peut augmenter la disponibilité en eau et donc avoir son importance.

La topographie variant très peu sur une telle zone de delta, le manque de précision amène rapidement à de grandes erreurs d'estimation de surfaces inondées. C'est pourquoi, dans l'objectif de représenter

la dynamique hydraulique à l'échelle de la sous-zone, il est nécessaire de procéder à une campagne de mesure topographique à l'aide d'un GPS différentiel pour obtenir une précision centimétrique.

Les débits de pompage mesurés à partir de la méthode géométrique ou utilisant la puissance nominale du moteur sont à ajuster. La méthode géométrique obtient ses approximations du fait que l'analyse se fait sur une photo à l'aide de tracés géométriques. De plus, le débit mesuré correspond au débit pris à l'instant de la photo et non au débit nominal de la pompe. La méthode se basant sur la puissance du moteur de la pompe fait également de nombreuses approximations. La première est d'estimer le rendement de la pompe qui va directement déterminer une première estimation du débit. Ce dernier est ajusté en calculant la perte de charge linéaire de l'installation qui dépend de ce même débit. Les résultats obtenus étant en accord avec ceux attendus, nous avons considéré la méthode d'évaluation suffisante mais toutefois perfectible pour une poursuite de l'étude.

Les scénarios de pompage, évalués en généralisant les pratiques mises en avant lors des enquêtes mériteraient également d'être approfondis. Pour les pompages des agriculteurs, il faudrait faire un inventaire précis du nombre de pompes par canal ainsi que de leurs habitudes de pompage. Il serait également utile de connaitre le nombre de parcelles utilisant le prek, leur taille et les pratiques culturales qu'on y trouve. L'évaluation des cultures ainsi que leur taille peut être envisagée par enquêtes ou bien par analyse d'images satellites. Le pompage individuel doit être en adéquation avec un éventuel pompage en entrée. Pour le moment le calendrier de pompage d'approvisionnement du prek n'est pas relié au niveau d'eau dans le Bassac et aux données climatiques. Or l'entrepreneur surveille quotidiennement le niveau dans le prek ainsi que l'évolution du niveau du Bassac.

La construction du modèle

Le modèle hydraulique établi sous SciLab adopte un schéma de calcul de type explicite, c'est-à-dire que la durée du calcul est décomposée en pas de temps où pour chacun d'eux, le calcul se fait à partir du résultat obtenu au pas de temps précèdent. Cette méthode impose d'opter pour un pas de temps de calcul assez fin pour pouvoir représenter le phénomène réel. C'est ainsi que pour le remplissage du prek, si le pas de temps de calcul est trop élevé, on observe des oscillations systématiques autour de la valeur d'équilibre à atteindre. L'évolution du modèle doit se tourner vers une méthode de calcul de type implicite afin de réduire les biais liés au calcul.

L'étape suivante en termes de modélisation hydraulique serait de modéliser le comportement hydraulique à l'échelle de la zone d'étude en sachant que chaque prek en débordant vient alimenter une même plaine d'inondation capable de se vider dans les canaux lors de la décrue.

5.3. Limites des résultats et perspectives d'évolution

Influence de l'ouverture de la vanne

Les simulations ont permis d'affirmer que les vannes récemment installées sont surdimensionnées. C'est-à-dire que, bien qu'elles puissent stopper l'arrivée d'eau, leur taille n'est pas justifiée face aux besoins de remplissage du prek. Une vanne deux fois plus étroite permettrait de réduire le coût d'investissement sans pour autant poser problème au remplissage du prek.

Il serait intéressant d'évaluer des solutions permettant de réduire toute l'infrastructure liée à une telle vanne telle qu'une réduction de la largeur du canal en entrée.

Influence de la cote de calibrage

Nous avons vu que la cote de calibrage du prek influence grandement la disponibilité en eau du prek car il n'y a plus d'approvisionnement gravitaire du prek. Pour poursuivre cette réflexion, il serait intéressant de regarder dans quelle mesure un stockage de l'eau peut permettre de disposer de suffisamment d'eau pour répondre aux besoins des agriculteurs pendant la période où le prek n'est plus alimenté.

Coût de maintenance de réhabilitation VS coût de pompage

Un calibrage profond implique un coût de travaux élevé mais une disponibilité en eau maximale. Un niveau de calibrage plus haut permet une réduction des coûts d'investissement mais une disponibilité en eau limitée. Quel est donc le choix optimal ? Pour une meilleure production, il est nécessaire de pouvoir disposer d'eau chaque fois que les cultures en ont besoin. Cela est possible par une *deep calibration* mais également en utilisant une pompe venant alimenter le canal. Il a été mis en évidence que, pour une disponibilité en eau suffisante, il y a une grande variabilité dans les coûts redevance de pompage pour pouvoir conclure quant au coût le plus élevé pour l'agriculteur. Cela incite donc à poursuivre l'analyse afin d'obtenir des résultats plus fiables en affinant l'étude auprès des agriculteurs et entrepreneurs qui répertorient les redevances payées. Pour aller plus loin, il faudrait regarder le coût de diverses options notamment celle couplant une *shallow calibration* avec une pompe en entrée.

Vanne pour protéger des inondations

Les vannes, lorsqu'elles ferment totalement, sont capables de stopper la montée des eaux dans le prek et ainsi le débordement vers les boeungs. Cela permet alors de cultiver plus longtemps et de réduire les pertes habituellement dues aux inondations. C'est également l'utilité de la surélévation des berges du prek qui permet donc de limiter les débordements vers la plaine. Néanmoins, un problème vient contredire l'utilité de ces installations. La plaine étant reliée à de nombreuses arrivées d'eau, pour

pouvoir réellement s'affranchir du risque d'inondation, il faudrait pouvoir contrôler toutes les entrées venant approvisionner la plaine. Ce qui, en plus d'un coût probablement très élevé face à l'ampleur des aménagements à faire (vannes ou surélévation de berges), reviendrait à empêcher l'amortissement de la crue et engendrerait une arrivée d'eau encore plus importante à l'aval. Il apparait que la création du polder dans la zone Nord a permis également de s'affranchir du risque d'inondation qui n'existe désormais que lors des événements extrêmes. A l'inverse de la vanne, en endiguant les parcelles, elles sont protégées de tous les débordements pouvant survenir des preks alentours. Néanmoins, l'absence d'apport de nutriments apportés par l'inondation reste un manque pour enrichir les sols ce qui favorise l'utilisation de fertilisants.

CONCLUSION

Depuis leur création au 19e siècle, les canaux d'irrigations le long de la rivière Bassac ont évolué face aux besoins des agriculteurs. Initialement conçus pour apporter des sédiments de la rivière et colmater les zones basses, ils sont désormais majoritairement utilisés pour l'irrigation des parcelles alentours. Ces « preks » bénéficient depuis une dizaine d'années de programmes de réhabilitation dans l'objectif d'améliorer leur efficacité et par la même occasion d'augmenter la productivité de ces zones agricoles. Quelques soient les choix de conception, ils visent tous à améliorer la disponibilité de l'eau afin d'optimiser le rendement des productions et augmenter les surfaces cultivées. De plus, un autre enjeu important de ces réfections, est de protéger les cultures face au risque d'inondation qui très souvent endommage tout ou une partie de la production. En dehors de ces réhabilitations, peu d'études ont été menées sur le fonctionnement de ces preks et de tels systèmes hydro-agricoles. C'est ainsi que la présente étude constitue une première étape dans la compréhension de ce type d'irrigation. Elle a permis dans un premier temps de prendre connaissance, au contact des usagers locaux, des pratiques agricoles et d'irrigation, des conséquences des réhabilitations, des attentes des agriculteurs ainsi que d'évaluer l'ampleur des inondations dans une zone où la topographie varie peu. Une fois le fonctionnement global cerné, il a été possible de construire un modèle hydraulique venant représenter de manière simplifiée le fonctionnement du prek. Plusieurs paramètres de celui-ci ont alors pu être analysés. Il en ressort que le niveau de calibrage est déterminant pour la disponibilité en eau. Si l'on compare le coût pour l'agriculteur d'une maintenance de prek réhabilité face à une redevance de pompage permettant dans les deux cas un apport d'eau suffisant, le coût est dans les deux cas faible face au coût de pompage individuel. Il serait nécessaire d'évaluer plus finement les coûts de production des agriculteurs selon les réhabilitations mises en place. L'analyse montre également que la vanne est surdimensionnée face aux besoins, ce qui laisse la possibilité de réduire les coûts de réhabilitation. Elle permet néanmoins de stopper le débordement du prek vers la zone inondable permettant ainsi une potentielle augmentation des surfaces cultivées. Une réflexion se pose face à cette limitation de l'inondation qui diminue l'apport en nutriments et appauvrit les sols obligeant alors à l'utilisation de fertilisants. Cette technique a été remarquée sur l'ensemble des zones sondées. Or, face aux enjeux écologiques actuels, il serait probablement préférable de maintenir un apport naturel de sédiments d'autant plus dans une zone de delta connue pour sa fertilité. Les techniques d'agro-écologie pourraient permettre de réduire les coûts en intrants, visiblement trop présents selon les agriculteurs. De plus, il semblerait d'après les cultivateurs que le frein à la hausse des revenus agricoles soit plutôt lié au manque de marché qui entraine la perte de récoltes invendues.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADB. (2016). *Asian Development Bank and Cambodia.* Plaquette. Récupéré sur https://www.adb.org/sites/default/files/publication/27757/cam-2016.pdf

AFD. (2013). *L'AFD et le Cambodge.* Plaquette. Récupéré sur http://www.afd.fr/jahia/webdav/site/afd/shared/PORTAILS/PUBLICATIONS/PLAQUETTES/AFD-Cambodge-VF.pdf

Allen, P. (1991). *Irrigation and Drainage Paper Number 24 - Reference evapotranspiration factors.* The United Nations Food and Agriculture Organization.

Baume, J.-P., Belaud, G., & Vion, P.-Y. (2013). *Hydraulique pour le génie rural.*

Belaud, G., Cassan, L., & Baume, J.-P. (2009). Calculation of contraction coefficient under sluice gates and application to discharge measuremment. *Journal oh Hydraulic Engineering, 135*(12), 1086-1091.

BRLi. (2004). *Réhabilitation de preks dans la province de Kandal-Projet sectoriel irrigation.* Etude de faisabilité.

Cohen, D., & Crabtree, B. (2006, Juillet). *Qualitative Research Guidelines Project.* Récupéré sur http://www.qualres.org/HomeStru-3628.html

Degoutte, G. (s.d.). *Aide mémoire pour l'hydraulique à surface libre - Chapitre 1.*

DFAT. (2008). *Cambodia Agricultural Value Chain Program.* Program design document.

Dy, S. S. (2004). Strategies and policies for basic education in Cambodia:Historical perspectives. *International Education Journal, 5*(1), 90-97.

Eliste, P., & Zorya, S. (2015). *Cambodian agriculture in transition: opportunities and risks.* World Bank Group, Economic and Sector Work, Washington D.C. Récupéré sur http://documents.worldbank.org/curated/en/805091467993504209/Cambodian-agriculture-in-transition-opportunities-and-risks

FAO. (2009). *National medium-term priority framework 2011-2015 Cambodia.* Récupéré sur http://www.fao.org/3/a-at648e.pdf

Funk, C. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*. Récupéré sur https://www.nature.com/articles/sdata201566

GFA Consulting Group. (2006). *Tonle Sap lowland stabilization project.* Report on water availability. Récupéré sur http://www.mekonginfo.org/assets/midocs/0001771-inland-waters-report-on-water-availabilitytonle-sap-lowland-stabilization-project-cambodia-ta-4756-cam.pdf

KOSAN Engineering. (2011). *Agro-development component. Northwest Irrigation Sector Project : "Preks rehabilitation in Kandal Province".* Final report.

Laforest, J. (2009). *Safety diagnosis tool kit for local communities : Guide to organizing semi-structured interviews with key informant.*

Marczak, M., & Sewell, M. (2007). *Using focus groups for evaluation.* Récupéré sur The University of Arizona: http://ag.arizona.edu/fcs/cyfernet/cyfar/focus.htm

MRC. (2010). *State of the basin report.* Ventiane. Récupéré sur http://www.mrcmekong.org/assets/Publications/basin-reports/MRC-SOB-report-2010full-report.pdf

MRC. (2015). *20 years of cooperation.* Récupéré sur http://www.mrcmekong.org/assets/Publications/20th-year-MRC-2016-.pdf

Palsky, G. (2010). Cartes participatives, cartes collaboratives. La cartographie comme maïeutique. *Le Comité Français de la Cartographie*(205). Récupéré sur http://www.lecfc.fr/new/articles/205-article-5.pdf

Saint-Venant, B. d. (1871). Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences. *73*, 237-240.

Sanyu Consultants. (1998). *The agricultural development study of the Mekong flooded area in Cambodia.* Final report.

Savenije, H. H. (2009). The art of hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences, 13*, 157-161. Récupéré sur https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/157/2009/hess-13-157-2009.pdf

SOFRECO. (2015). *Water and Agriculture Sector Project, Inception report.*

SOFRECO. (2015,a). *Water and Agricultre Sector Project, Batch 1, Detail design report.*

SOFRECO. (2015,b). *Water and Agriculture Sector Project, Batch 1, Topographic study report.*

SOFRECO. (2015,c). *Water and Agriculture Sector Project, Tender Package 1, Section IV Drawing.*

SOFRECO. (2015,d). *Water and Agriculture Sector Project, Batch 1, Feasibility report.*

SOFRECO. (2017). *Water and Agriculture Sector Project, Package 2, Capitalization report.*

Zanobetti, D., & Lorgeré, H. (1968). *Le modèle mathématique du delta du Mekong - 1ère partie.*

ANNEXES

Liste des annexes

Annexe A : Station hydrologique de Koh Kelh 3
Annexe B : Station hydrologique Chau Doc 5
Annexe C : Table des variables centrées réduites de gauss 9
Annexe D : Guides d'interview 10
Annexe E : Emplacement des parcelles interrogées 19
Annexe F : Cartes utilisées lors des groupes de discussions 21
Annexe G : Détermination de la capacité de pompage de la pompe en entrée de PREK 23
Annexe H : Détermination du débit d'une pompe à partir de la géométrie du jet de sortie 25
Annexe I : Script du modèle sous SciLab 26
Annexe J : Emprise des villages des zones Nord et Sud 34
Annexe K : Cartes inondation/topographie 35
Annexe L : Résultats issus de la simulation Cropwat 37

Listes des figures des annexes

Fig. 1 : Courbe de tarage à partir de la hauteur d'eau lue à Koh Kelh 3
Fig. 2: Hauteur d'eau dans le Bassac à la station Koh Kelh entre 1990 et 2001 4
Fig. 3 : Hauteur d'eau dans le Bassac à la station Koh Kelh entre 2013 et 2017..... 4
Fig. 4 : Hauteur d'eau dans le Bassac à la station Chau Doc entre 1990 et 2001 5
Fig. 5 : Hauteur d'eau dans le Bassac à la station Chau Doc entre 2013 et 2017 6
Fig. 6 : Visualisation du phénomène d'hystérésis à la station Chau Doc 7
Fig. 7: Carte de la zone Nord représentant l'emplacement des parcelles interrogées..... 19
Fig. 8 : Carte de la zone Sud représentant l'emplacement des parcelles interrogées..... 20
Fig. 9 : Carte zone Nord 21
Fig. 10 : Carte zone Sud 22
Fig. 11 : Pompe en entrée du Prek Tiev..... 23
Fig. 12 : Jet de sortie d'une pompe individuelle à Prek Ta Roat..... 25
Fig. 13 : Emprise des villages de la zone Nord..... 34
Fig. 14 : Emprise des villages de la zone Sud..... 34
Fig. 15 : Carte inondation/topographie de la zone Nord 35
Fig. 16 : Carte inondation/topographie de la zone Sud 36
Fig. 17 : Calendrier de culture de la canne à sucre plantée en mai 37
Fig. 18 : Besoins en eau de la culture de canne à sucre 38

Listes des tables des annexes

Tab. 1 : Disponibilités des données pour la station Koh Kelh 3
Tab. 2 : Disponibilité des données pour la station Chau Doc..... 5
Tab. 3 : Table des variables centrées réduites de Gauss..... 9
Tab. 4 : Date et heure des interviews de la zone Nord 19
Tab. 5 : Date et heure des interviews de la zone Sud 20
Tab. 6 : Données à relever sur le terrain 23

ANNEXE A : STATION HYDROLOGIQUE DE KOH KELH

La station 33402-Koh Kelh se situe sur la rivière Bassac à environ 50 km de la diffluence et 35 km avant la frontière vietnamienne. Dans cette page sont présentées les caractéristiques de la station ainsi que l'analyse hydrologique faite sur les données de celle-ci.

Caractéristiques générales

ID station: 33402
Nom station: Koh Kelh
Nom rivière: Bassac
Pays: Cambodge
Longitude: 105,0399
Latitude: 11,23958
Niveau zéro de l'échelle limnimétrique: -1m
Distance depuis la diffluence (Phnom Penh): 50 km
Distance à la frontière vietnamienne: 35 km
Distance à la mer: 260 km

Disponibilité des données

Les données brutes récupérées sont disponibles sur les périodes présentées dans la Tab. 1 ci-dessous:

Tab. 1 : Disponibilités des données pour la station Koh Kelh

	Date Début	Date Fin
Hauteur d'eau	05/09/1990	31/12/2001
	01/06/2008 Seulement saison humide (du 01/06 au 31/10)	31/10/2012
	01/06/2013	27/02/2017
Débit	01/01/1991	31/12/2000

Courbe de tarage

A partir de la période de Janvier 1991 à décembre 2000, il est possible de construire la courbe de tarage Q=f(H) (Fig. 1) ci-dessous permettant la reconstitution des débits pour chaque valeur de hauteur d'eau disponible. On pensera également à ajuster le niveau d'eau puisque l'échelle limnimétrique se situe un mètre en dessous du niveau de référence de la surface de la mer.

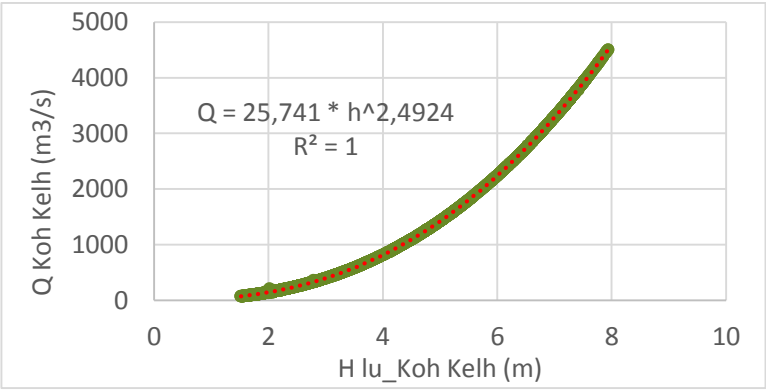


Fig. 1 : Courbe de tarage à partir de la hauteur d'eau lue à Koh Kelh

Dans les Fig. 2 et Fig. 3 ci-dessous sont présentées les hauteurs d'eau réelles à la station Koh Kelh pour les périodes 1991-2000 et 2013-2017.

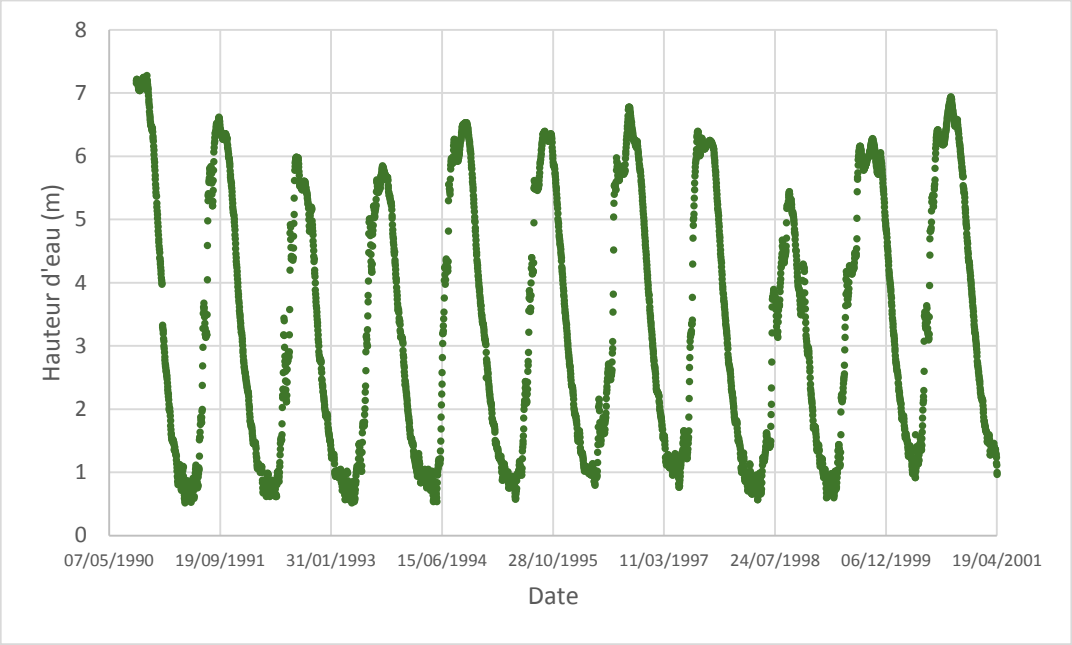


Fig. 2: Hauteur d'eau dans le Bassac à la station Koh Kelh entre 1990 et 2001

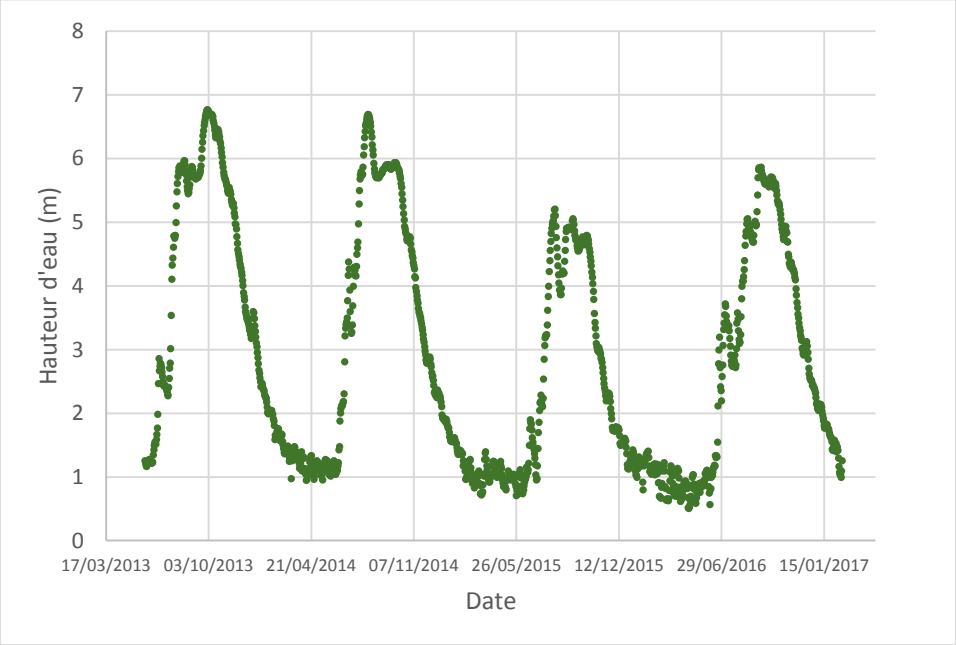


Fig. 3 : Hauteur d'eau dans le Bassac à la station Koh Kelh entre 2013 et 2017

ANNEXE B : STATION HYDROLOGIQUE CHAU DOC

La station 39801_Chau Doc se situe sur la rivière Bassac à environ 123 km de la diffluence et 38 km après la frontière vietnamienne. Dans cette page sont présentées les caractéristiques de la station ainsi que l'analyse hydrologique faite sur les données de celle-ci.

Caractéristiques générales

ID station: 39801
Nom station: Chau Doc
Nom rivière: Bassac
Pays: Vietnam
Longitude: 105.117
Latitude: 10.7
Niveau zéro de l'échelle limnimétrique: 0 m
Distance depuis la diffluence (Phnom Penh): 123 km
Distance depuis la frontière vietnamienne: 38 km
Distance à la mer: 187 km
Distance depuis la station Koh kelh: 73 km

Disponibilité des données

Les données brutes récupérées sont disponibles sur les périodes présentées dans la Tab. 2.

Tab. 2 : Disponibilité des données pour la station Chau Doc

	Date Début	Date Fin
Hauteur d'eau	01/04/1979	31/12/2000
	01/06/2008	31/10/2012
	Seulement saison humide (du 01/06 au 31/10)	
	01/06/2013	31/05/2017
Débit	01/01/2001	31/12/2007

Hauteur d'eau

Dans les figures ci-dessous sont présentées les hauteurs d'eau à la station Chau Doc pour les périodes 1991-2000 et 2013-2017.

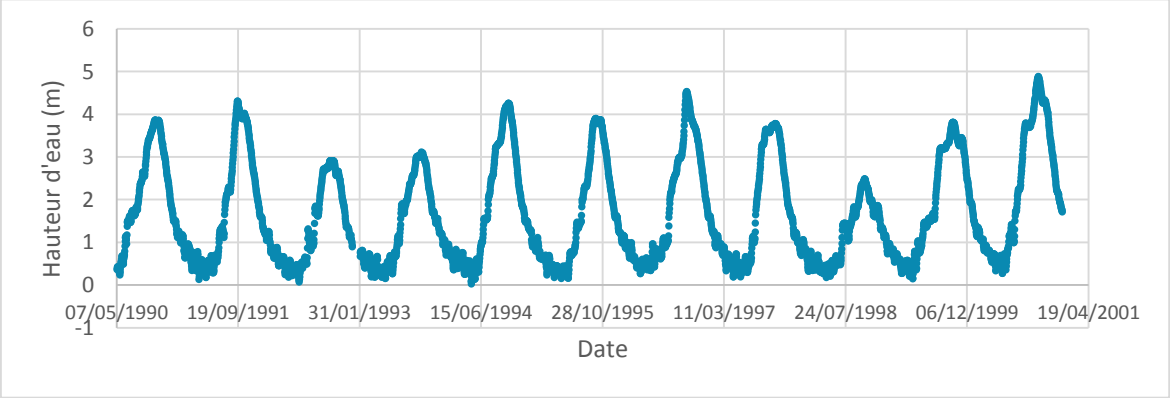


Fig. 4 : Hauteur d'eau dans le Bassac à la station Chau Doc entre 1990 et 2001

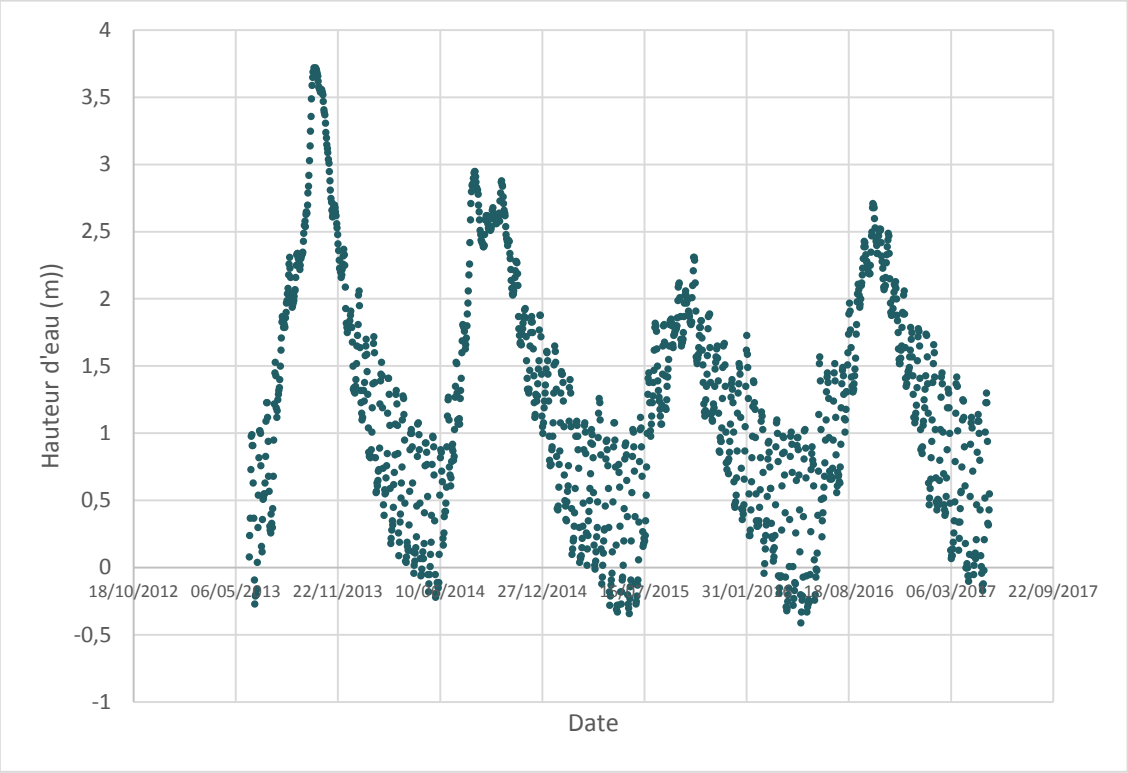


Fig. 5 : Hauteur d'eau dans le Bassac à la station Chau Doc entre 2013 et 2017

Influence de la marée

Il apparait un phénomène d'oscillations quotidiennes du niveau d'eau essentiellement marqué pour les basses eaux et d'autant plus pour cette station que celle de l'amont. Cela s'explique par le phénomène de marée dont les ondes peuvent remonter les bras du delta depuis la mer puisque le régime d'écoulement est fluvial. Néanmoins, l'onde étant amortie au fur et à mesure de sa propagation, c'est pourquoi elle est majoritairement ressentie à la station Chau Doc et très peu à Koh Kelh.

Phénomène d'hystérésis

La correspondance entre le débit et la hauteur n'est pas univoque. Pour un même débit, il peut y avoir deux valeurs de hauteurs d'eau selon que l'on se situe en phase de crue ou décrue. Cela s'explique par le phénomène de propagation des ondes de crues dans un cours d'eau à très faible pente.

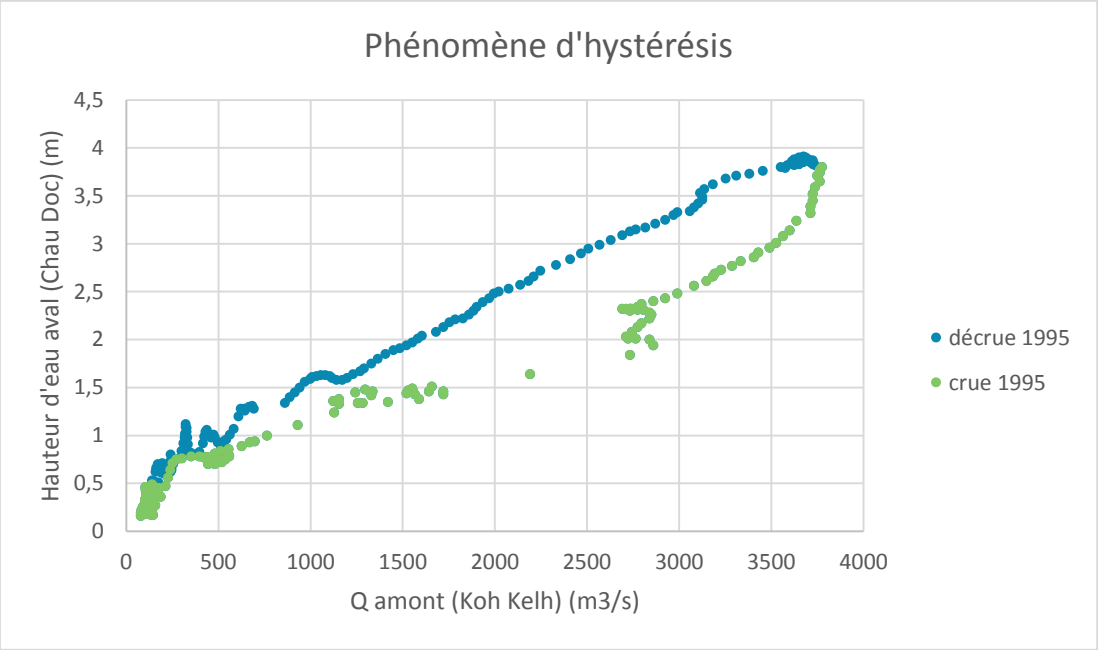


Fig. 6 : Visualisation du phénomène d'hystérésis à la station Chau Doc

La correspondance entre le débit et la hauteur d'eau n'est pas univoque contrairement à la station Koh Kelh : c'est ce que l'on appelle le phénomène d'hystérésis. Celui-ci, propre aux régimes fluviaux à très faible pente implique des hauteurs d'eau différentes pour un débit fixé. En effet, pour un débit donné, la hauteur d'eau observée en phase de crue (généralement de mai à septembre) est plus faible qu'en phase de décrue (septembre à mai). Cela s'explique par la propagation de l'onde de crue qui, en régime fluviale, a une célérité (c) supérieure à la vitesse de l'eau (V). La démonstration de la relation non univoque entre le débit (Q) et la hauteur d'eau (h) est présentée ci-dessous.

Partons des équations de Barré de Saint-Venant (1871) (réduction en 1D des équations de Navier-Stokes) : $\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} = -g\frac{\partial h}{\partial x} + g(i - j)$

Le terme de gauche représentant le terme d'inertie de l'équation de quantité de mouvement est négligeable en régime fluvial ($F = \frac{V}{\sqrt{g*h}} = \frac{V}{c} < 1$). On obtient alors $\frac{\partial h}{\partial x} = i - j$ avec i la pente considérée comme constante et j la perte de charge linéique.

Considérons l'équation de Manning-Strickler $j = \frac{Q^2}{S^2K^2R^{4/3}}$

Avec Q le débit, S la section dépendant de la hauteur d'eau h, K le coefficient de Strickler et R le rayon hydraulique dépendant de h.

D'où $\frac{\partial h}{\partial x} - i + \frac{Q^2}{S^2K^2R^{\frac{4}{3}}} = 0$

Soit $Q(x,t) = S(h)KR(h)^{2/3}\sqrt{i - \frac{\partial h}{\partial x}}$

Ne connaissant pas le terme $\frac{\partial h}{\partial x}$, nous allons plutôt faire intervenir $\frac{\partial h}{\partial t}$. Pour cela, il faut utiliser l'équation de l'onde cinématique $\frac{\partial Q}{\partial t} + c_c \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$

Le débit dépendant de la hauteur d'eau, il est possible d'écrire $\frac{\partial Q}{\partial h} * \frac{\partial h}{\partial t} + c_c \frac{\partial Q}{\partial h} * \frac{\partial h}{\partial x} = 0$

D'où $\frac{\partial h}{\partial t} + c_c \frac{\partial h}{\partial x} = 0$

Donc $\boxed{Q(x,t) = S(h)KR(h)^{2/3}\sqrt{i + \frac{1}{c_c}\frac{\partial h}{\partial t}}}$

Cela montre que pour un débit donné, lors de la phase de montée d'eau ($\frac{\partial h}{\partial t} > 0$), la hauteur sera plus faible que lors de la phase de décrue ($\frac{\partial h}{\partial x} < 0$).

(Baume, Belaud, & Vion, 2013) ; (Degoutte)

ANNEXE C : TABLE DES VARIABLES CENTREES REDUITES DE GAUSS

Tab. 3 : Table des variables centrées réduites de Gauss

Fréquence	Variable centrée réduite U
0,05	-1,645
0,1	-1,282
0,15	-1,036
0,2	-0,842
0,25	-0,674
0,3	-0,524
0,35	-0,385
0,4	-0,253
0,45	-0,126
0,5	0
0,55	0,126
0,6	0,253
0,65	0,385
0,7	0,524
0,75	0,674
0,8	0,842
0,85	1,036
0,9	1,282
0,95	1,645

ANNEXE D : GUIDES D'INTERVIEW

Focus Group Discussion – Northern Area

Focus Group Discussion Participant List Area : Date :		
Name	Occupation	Phone number

Flood When is the flood season (which months)?

- Are there big differences between years or is it always the same?
    - In a very dry year, where was the flooding (minimum flooded area) (show on the map)
    - In a very wet year, where was the flooding (maximum flooded area) (show on the map)
- Has it changed since the rehabilitation of the preks? How?
- Is there surplus of water during the dry season (lack of drainage)? Where?

- Is there important information to understand water flows in the area missing on the map?

Crops

- **In each sub-area identified in the maps**, what are the main crops?
    - When is the planting time?
    - When is the harvest time?

About the prek

- What is the purpose of a Prek: increasing water availability or sedimentation & "raising lands"?
- Have floods/drainage problems increased or decreased since the rehabilitation in the area?
- For you, what are the benefits of the rehabilitation (what do you think will improve)?
- What have been the main changes regarding agriculture since rehabilitation?

- Is there some collective activity to maintain the prek/Canal (weeding, cleaning/dredging)
- Are farmers doing things on their own to clean or maintain the canal?

Pumping at the entrance

- Are there pumping sets at the entrance of the preks?

    - If yes, for which preks?
- Who is in charge of the pumping sets at the entrance? Who is managing them
    - When is the pumping set working (which months)?
    - Is there a schedule discussed with farmers or not?
    - If not, how does the SP decide when to pump?
    - How does s/he know farmers need water?
- Are there pumping sets bringing water in the area elsewhere than at the entrance of the preks?
    - When are they used? Is there a schedule discussed with farmers or not?
    - If not, how does the person managing the pump knows when to pump?
- Do farmers contribute to pumping costs?
    - How much per farmer or per hectare?
    - How much depending on the crop?
    - Who decided of the rates and when?
    - Have the rate changes since the rehabilitation of the Preks? Why?
    - How is the money used? For what purpose?

Pumping/management in the prek

- How do the farmers bring water from the prek to their crops?
- If they use pumps, to whom do the pumps belong? (farmers or water community PUC)
- Has the number of individual pumps increased after the rehabilitation?
- Are some farmers sharing/using the same pumping set?
- How much does a farmer pay if s/he uses a pump? Who has decided of the rate? When?
- Have the rates changed since the rehabilitation? Why?
- Are farmers paying or is it difficult to make sure they pay?
- Are there any collective maintenance activities (cleaning or dredging the canals, etc.)?
- What about individual maintenance activities? Which one?

For the northern area, pumps can also be used to drain water from the polder:

- Who is in charge of operating the pump?
- When is the pump used? Who decides about it?
- Do farmers contribute to pumping costs (how much per farmer or per hectare)?

General discussion

- What are the main issues faced by farmers?
- What would be needed to solve them?

Focus Group Discussion – Southern Area

Flood

- When is the flood season (which months)?
- Are there big differences between years or is it always the same?
    - In a very dry year, where was the flooding (minimum flooded area) (show on the map)
    - In a very wet year, where was the flooding (maximum flooded area) (show on the map)
- Has it changed since the rehabilitation of the preks? How?
- Is there surplus of water during the dry season (lack of drainage)? Where?

- Is there important information to understand water flows in the area missing on the map?

Crops

- **In each sub-area identified in the maps**, what are the main crops?
    - When is the planting time?
    - When is the harvest time?

About the prek

- What is the purpose of a Prek: increasing water availability or sedimentation & "raising lands"?
- Have floods/drainage problems increased or decreased since the rehabilitation in the area?
- For you, what are the benefits of the rehabilitation (what do you think will improve)?
- What have been the main changes regarding agriculture since rehabilitation?
- Is there some collective activity to maintain the prek/Canal (weeding, cleaning/dredging)
- Are farmers doing things on their own to clean or maintain the canal?

Pumping at the entrance

- Are there pumping sets at the entrance of the preks?
    - If yes, for which preks?
- Who is in charge of the pumping sets at the entrance? Who is managing them
    - When is the pumping set working (which months)?
    - Is there a schedule discussed with farmers or not?
    - If not, how does the SP decide when to pump?
    - How does s/he know farmers need water?
- Are there pumping sets bringing water in the area elsewhere than at the entrance of the preks?
    - When are they used? Is there a schedule discussed with farmers or not?
    - If not, how does the person managing the pump knows when to pump?
- Do farmers contribute to pumping costs?
    - How much per farmer or per hectare?
    - How much depending on the crop?
    - Who decided of the rates and when?

    - Have the rate changes since the rehabilitation of the Preks? Why?
    - How is the money used? For what purpose?

Pumping/management in the prek

- How do the farmers bring water from the prek to their crops?
- If they use pumps, to whom do the pumps belong? (farmers or water community PUC)
- Has the number of individual pumps increased after the rehabilitation?
- Are some farmers sharing/using the same pumping set?
- How much does a farmer pay if s/he uses a pump? Who has decided of the rate? When?
- Have the rates changed since the rehabilitation? Why?
- Are farmers paying or is it difficult to make sure they pay?
- Are there any collective maintenance activities (cleaning or dredging the canals, etc.)?
- What about individual maintenance activities? Which one?

For the southern area: For the preks rehabilitated, there are gates:

- Who is in charge of operating the gates?
- What is the purpose of the gates (bring water in the Prek, protect from floods…)?
- Is having a gate something good or bad? Why?
- When are the gates opened or closed? Why?
- Who is in charge of the maintenance?
    - If there is broken gate
    - Dredging the canal
    - Weeding the canal
- Are there level gauges?
    - Is someone in charge to report the level?
- Before the rehabilitation, was a service provider operating a pump at the entrance of The Prek?
- What happened to him after the installation of the gate?

General discussion

- What are the main issues faced by farmers?
- What would be needed to solve them?

Service provider interview guide

History/Context

- Since when is the service provider providing water for farmers?
- Why did s/he decide to start this business?
- Can s/he identify years where things have changed significantly (purchase of new pumps, pumps breaking, government providing pumps, etc.)
- Has the demand for water (e.g. number of individual pumps) increased/decreased over the last few years? Why is it the case?

Schedule and Quantity of pumping

- When is the pumping set used? From which month to which month?
- Is there a schedule discussed with farmers or not?
    - If not, how does the SP decide when to pump?
    - How does s/he know farmers need water?
- When the pumping set is on, how many times a week is the pumping set working?
- Each day the pumping set is on, how many hours is the pumping set working

Month of the year	Number of time of using the pumps per weeks (i.e. days/week)	Number of hours of pumping per day when the pumping set is one	Quantity of petrol used per day of pumping (Liters/day)

- Do you know the flow of your pump (liters/hour) – If not, check on the machine
- What is the price of one liter of petrol?

Payment

- Do farmers contribute to pumping costs? What are the rules:
    - How much per farmer or per hectare or per time of using their pumps?
    - How much depending on the crop?
    - Who has decided of the rates?
    - When were the rates set up/decided? Have they changed over time?

    - What are the difficulties faced to make farmers pay?
    - How is the money used? For what purpose?
- Is the service provider monitoring payments or not?
    - Does the SP have any tools/methods?
    - Did s/he develop them by him/herself or with support from an organization or the government? Since when does s/h have these tools?

    - For instance, is there a list of farmers who should pay – and the amount they should pay?
    - What is the proportion of farmers who pay?
    - Why are some farmers not paying?

    - Is it possible to have this register? (We will do some analysis and provide the person some feedback on possible ways to improve the situation).

Farmers interview guide

Context

- Are you mostly a farmer or do you also have other activities (small shop, business, etc.)?
- What about the other members of the family?
- Regarding agricultural activities: is the work mostly done by the family or do you hire workers?

About the prek

- What is the purpose of a Prek: increasing water availability or sedimentation & "raising lands"?
- Have floods/drainage problems increased or decreased since the rehabilitation in the area?
- For you, what are the benefits of the rehabilitation (what do you think will improve)?
- What have been the main changes regarding agriculture since rehabilitation?
- Are you planning to change anything in the way you cultivate?
- Is there some collective activity to maintain the prek/Canal (weeding, cleaning/dredging)
- Do you do something individually to clean the canals? What? How often?

About plots and crops

- How many plots do you have?
- Where are your plots (show them on the map)?

About floods

- Are some of your plots affected by floods?
    - Which one? Show them on the map.
    - When?
    - Is this a problem? Does this stop you of cultivating some crops?
    - If you can't cultivate, what do you do?
- Are some of your plots affected by waterlogging (lack of drainage)?
    - Which one? Show them on the map.
    - When?
    - Is this a problem?
- Are there some plots that you know can be flooded but you still decide to grow something?
    - What do you grow and when?
    - Why do you decide this?
    - Have you sometimes lost the crops/had low yields because of floods? How often (every two years, every four years, etc.)
- Are there fields you could not cultivate before that you can cultivate now? (since rehabilitation)
- Are there fields that you cannot cultivate anymore but could cultivate before rehabilitation?
- Is lack of water a problem? When and why?
- Has it improved since the rehabilitation or is it the same?

For each plot

- What is the size of your plots?
- What is the crop on your plot?
- When do you plant?
- When do you harvest?
- Has it changed over the last five years? Why?
- Has it changed since the prek rehabilitation?
- Average Yield
- Average market price
- Average input cost(fertilizer/pesticides/seeds cost)
- Average labour cost (for hired labour): soil preparation and harvest notably

PLOT No.	Plot size (acre or ha)	Crop	Planting date	Harvest date	Yield‡	Market price/yield unit	Input cost (per acre or ha)	Labour cost	Irrigation (Yes/No)	Petrol cost (per year)

‡ Yield can be in Tons, in kilograms or in bags. If in bags (or other unit), ask the average weight of the yield unit. For rice indicate the type or rice (floating rice, receding rice, early wet season, late wet season, dry season and the variety cultivated)

- Are there some plots that you cultivate some years and do not cultivate other years? Why?
- Do you irrigate the crop?
    - Which crop?
    - When?
    - Where does the water come from?
- What are the main difficulties you have regarding agriculture?
- How can these difficulties be solved?

Pumping and irrigation

- Do you own a pump? Since when?
- Do you share it with other farmers?
- Is it a 'fixed pump' to irrigate always the same plot(s) or can you change where the pump is?

- When do you use your pump (which months)?
- The months when you use the pumps, how many times per week?
- The days when you use the pumps, how many hours per day?

Month of the year	Number of time of using the pumps per weeks (i.e. days/week)	Number of hours of pumping per day when the pumping set is one	Quantity of petrol used per day of pumping (Liters/day)

- Do you know the flow of your pump (liters/hour) – If not, check on the machine
- What is the price of one liter of petrol?

- Is there always water when you need it in the canals?
- If not, who do you ask to get water?
- What are the main difficulties you have regarding water management/irrigation?

- Do you pay something when you use your pump?
    - What is the rate (per acre/ha, per time, depending on the crops)?
    - Who decided of the rate and when? Has it changed over time?
    - To whom do you pay?
    - When (each time you use the pump, at the start of the season or at harvest time)
    - Do you know how the money is used?
    - Is it a fair/good price or not?
    - Do you pay something else (for instance a flat rate for the community pump)

ANNEXE E : EMPLACEMENT DES PARCELLES INTERROGEES

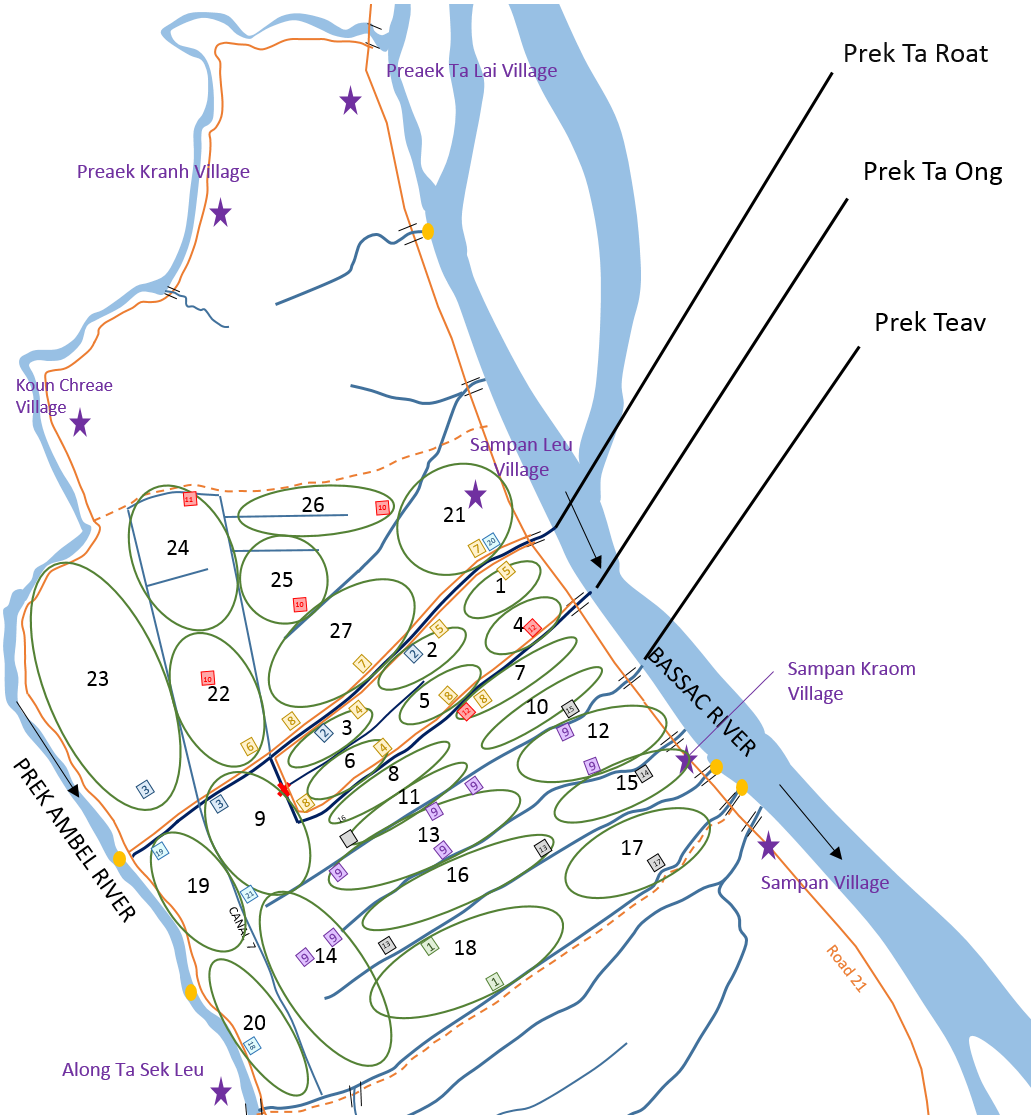


Fig. 7: Carte de la zone Nord représentant l'emplacement des parcelles interrogées

Tab. 4 : Date et heure des interviews de la zone Nord

Numéro	Date	Heure
1	17/05/2017	5:15 PM
2	18/05/2017	8:00 AM
3	18/05/2017	2:00 PM
4	19/05/2017	8:00 AM
5	19/05/2017	9:00 AM
6	19/05/2017	1:40 PM
7	19/05/2017	3:00 PM
8	19/05/2017	3:40 PM
9	20/05/2017	8:00 AM

Numéro	Date	Heure
10	21/05/2017	10:30 AM
11	21/05/2017	1:30 PM
12	21/05/2017	5:00 PM
13	22/05/2017	8:30 AM
14	22/05/2017	9:45 AM
15	22/05/2017	2:00 PM
16	22/05/2017	3:00 PM
17	22/05/2017	4:00 PM
18	23/05/2017	1:00 PM
19	23/05/2017	2:00 PM
20	23/05/2017	3:30 PM
21	23/05/2017	4:15 PM

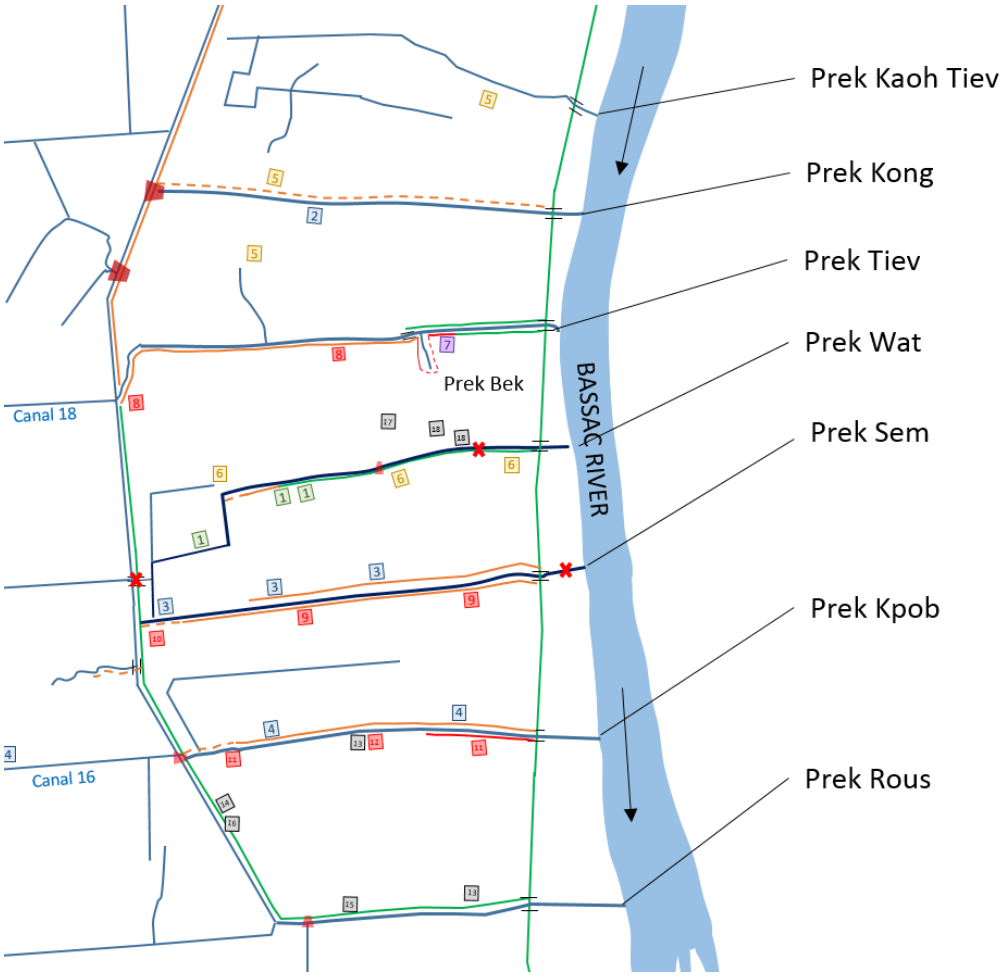


Fig. 8 : Carte de la zone Sud représentant l'emplacement des parcelles interrogées

Tab. 5 : Date et heure des interviews de la zone Sud

Numéro	Date	Heure
1	09/06/2017	4:15 PM
2	10/06/2017	8:30 AM
3	10/06/2017	9:30 AM
4	10/06/2017	2:40 PM
5	11/06/2017	9:00 AM
6	11/06/2017	2:15 PM
7	27/06/2017	3:00 PM

Numéro	Date	Heure
8	28/06/2017	9:40 AM
9	28/06/2017	1:15 PM
10	28/06/2017	2:30 PM
11	28/06/2017	4:00 PM
12	28/06/2017	4:30 PM
13	29/06/2017	7:50 AM
14	29/06/2017	8:30 AM
15	29/06/2017	9:20 AM
16	29/06/2017	10:00 AM
17	29/06/2017	1:40 PM
18	29/06/2017	2:30 PM

ANNEXE F : CARTES UTILISEES LORS DES GROUPES DE DISCUSSIONS

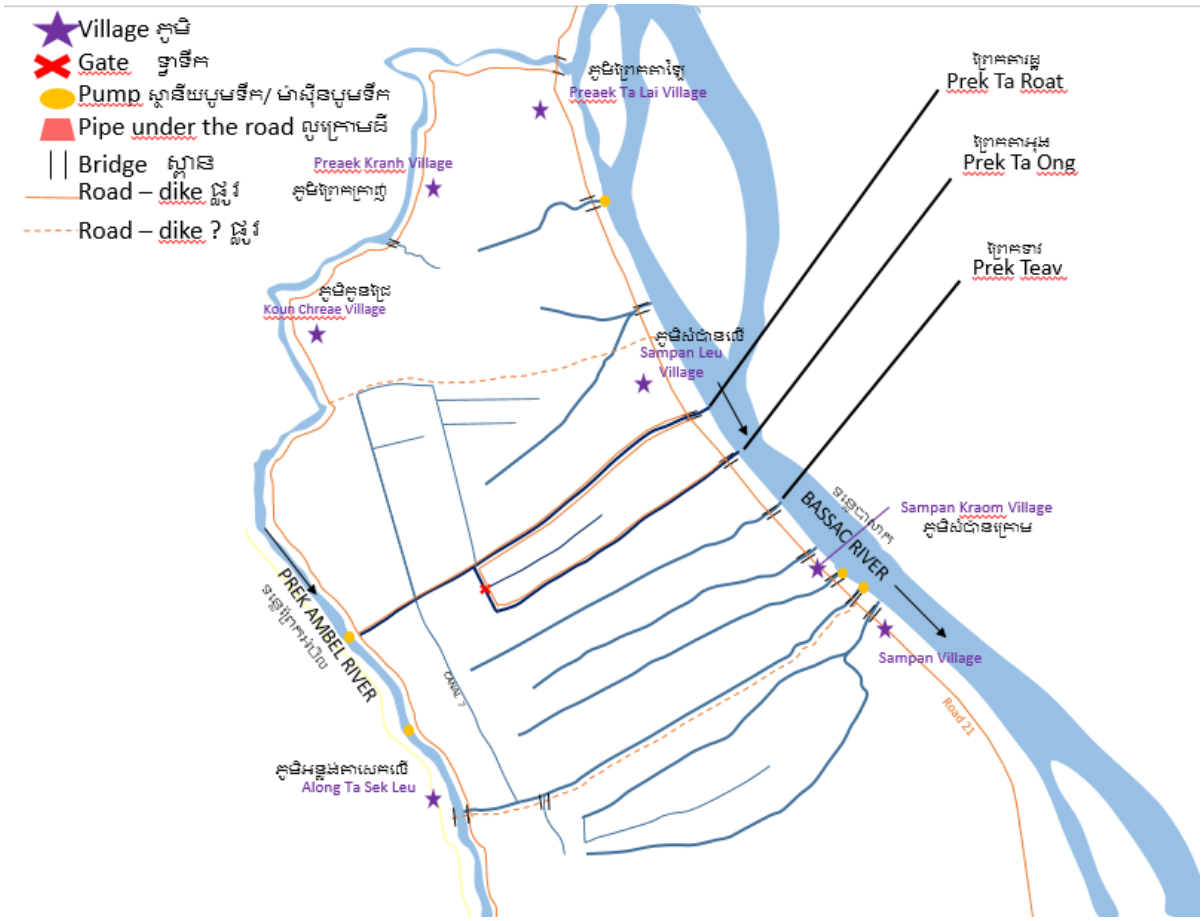


Fig. 9: Carte zone Nord

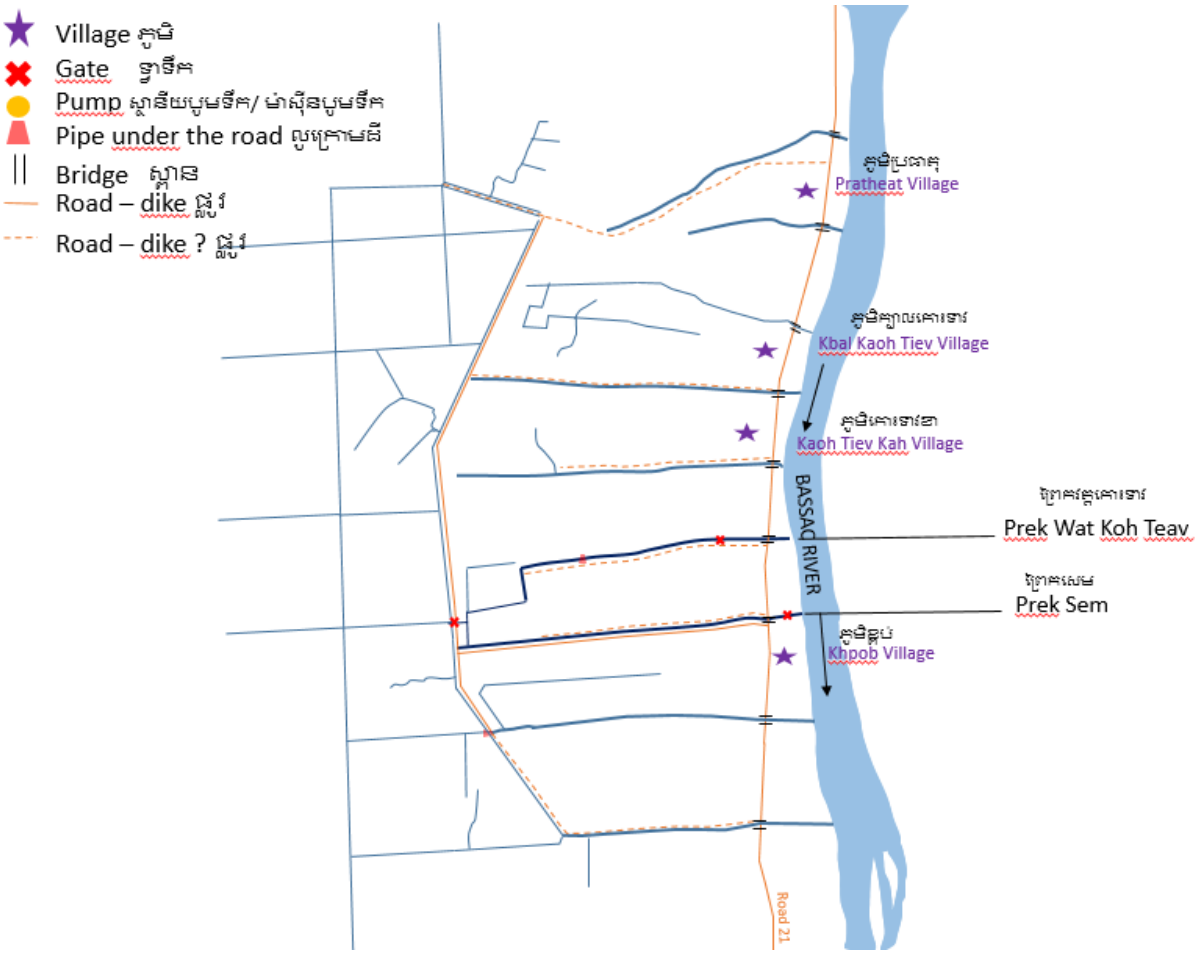


Fig. 10 : Carte zone Sud

ANNEXE G : DETERMINATION DE LA CAPACITE DE POMPAGE DE LA POMPE EN ENTREE DE PREK

Dans cette partie est détaillé le calcul du débit de pompage de la pompe venant alimenter le Prek Tiev de la Zone Nord. Celle-ci se base sur les caractéristiques du moteur ainsi que les données géométriques de l'installation.

Fig. 11 : Pompe en entrée du Prek Tiev
Source : Auteur

Sur la pompe est indiquée la puissance du moteur de 22 Horsepower soit 16 412 Watts avec le taux de conversion (1HP=746 W). Il est nécessaire de relever le diamètre intérieur des conduites ainsi que leur longueur et la différence de hauteur entre le point d'aspiration et le point de refoulement (hauteur de relèvement).

Tab. 6 : Données à relever sur le terrain

Puissance du moteur P_m (HP)	22
Diamètre intérieur DI (m)	0,195
Hauteur de relèvement H (m)	1,8
Longueur totale des conduites L (m)	11,5

On émet une hypothèse sur la valeur du rendement de la pompe pour ensuite faire une première évaluation du débit $Q_{estimé} = \frac{P_h}{\rho * g * H}$ à partir de la puissance hydraulique $P_h = \eta * P_m$.

Avec ρ : la masse volume de l'eau (1000 kg/m^3)

g : constante de pesanteur (9,81 m/s²)

Rendement de la pompe η	0,4
Puissance hydraulique P_h (W)	6 565
Q estimé (m^3/s)	0,37

Pour affiner ce débit, on détermine la perte de charge à travers la conduite à l'aide de la formule de Lechapt & Calmon $j = L * Q^M * DI^{-N}$

Où j est la perte de charge linéaire en mm/m

L = 1,01 M = 1,84 et N = 4,88 dans le cas d'une conduite en PVC.

En multipliant par la longueur de la conduite, la perte de charge J(m) est obtenue.

En ajoutant cette perte de charge à la hauteur de relèvement H, nous obtenons la Hauteur Manométrique Totale (HMT).

Le débit ajusté est alors déterminé de la sorte $Q_{ajusté} = \frac{P_h}{\rho * g * HMT}$ Soit un débit nominal de l'ordre de 330 m^3/h dans cet exemple.

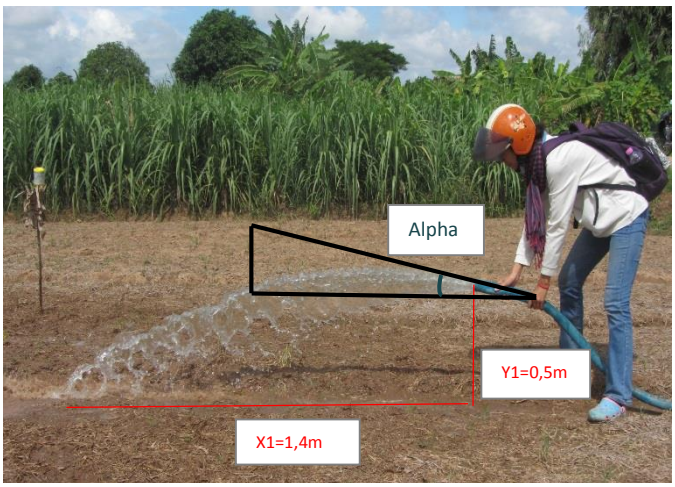
Bien qu'approximatif, ce calcul permet une évaluation du débit de pompage. Cette méthode est applicable à tout type de pompe dont la puissance du moteur est connue et dont on relève les caractéristiques présentes dans la Tab. 6.

ANNEXE H : DETERMINATION DU DEBIT D'UNE POMPE A PARTIR DE LA GEOMETRIE DU JET DE SORTIE

A partir de relevés terrain, il a été possible d'évaluer le débit de pompes en fonctionnement. Dans cette page est présentée la méthode utilisant la forme parabolique du jet de sortie. Cette méthode est appliquée au cas d'une pompe individuelle.

Cette méthode se base sur la géométrie du jet en sortie d'un tuyau (sans embout) à partir de laquelle on peut évaluer la vitesse du jet et donc le débit délivré.

A partir de la Fig. 12 représentant le jet de sortie d'une pompe individuelle située sur le Prek Ta Roat, déterminons son débit de pompage.



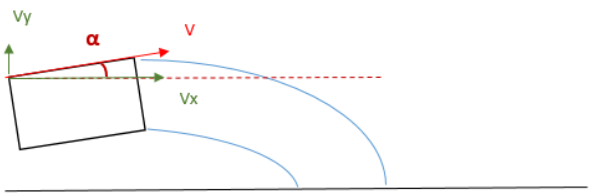


Fig. 12 : Jet de sortie d'une pompe individuelle à Prek Ta Roat
Source : Auteur

Relevons la hauteur (Y1=0,5m) et longueur (X1=1,4 m) du jet ainsi que l'angle d'inclinaison (α=-13°=-0,22 radians) en sortie du tuyau. Relevons également le diamètre intérieur du tuyau (DI=43mm).

A partir de l'équation de la parabole, $x = V_x * t$

$$y = 0{,}5 * g * t^2 + V_y * t$$

Or $V_y = V_x * \tan(\alpha)$

D'où $t = \frac{x}{V_x}$

$$y = 0{,}5 * g * \left(\frac{x}{V_x}\right)^2 + V_x * \tan(\alpha) * \frac{x}{V_x}$$

Donc $V_x^2 = \frac{0{,}5*g*x^2}{y-\tan(\alpha)*x}$

Numériquement cela vaut $V_x = \sqrt{\frac{0{,}5*9{,}81*1{,}4^2}{0{,}5-\tan(-0{,}22)*1{,}4}} = 3{,}4\ m/s$

Avec DI = 43 mm, on a A=0,0015 m² d'où $\boxed{Q=18\ m^3/h}$

ANNEXE I : SCRIPT DU MODELE SOUS SCILAB

```
//-------------------------------------------------------------
// Modele Prek
//-------------------------------------------------------------
// Date: 18/6/2017


clear

// --- declare file location
sPathScript = get_file_path('prek_deep_vanne_seuil flood.sce');
// Load external functions
getd(sPathScript);

// Start chronometer for LogPrn
tic()
LogPrn("Start initialisation")

// Load data
data_file='hydro_data_bassac.xls';
data_file = sPathScript + data_file;

// --- load all sheets of the excel file
Sheets = readxls(data_file);

// some basic operations on Sheets
s1=Sheets(1); //get the first sheet
s2=Sheets(2);
sz=size(s1);
NL=sz(1);// number of lines in the sheet

// store data in variables for scilab:
dstation=s1(2:9674,1); // date in standard format
Zstation=s1(2:9674,4); //water level in Bassac
p_out=s1(2:9674,6); //data pumping out of prek (m3/j/m prek)
p_in=s1(2:9674,8); // data pumping, service provider (m3/j)
rainfall=s1(2:9674,9); // rainfall data (mm/day)
evaporation=s1(2:9674,10); // evaporation (mm/day)
```

```
// PLOT water level data
//----------------------------------------
clf(0) // clear figure
//figure(0)
//plot(dstation,Zstation,'b-')  //plot Zstation versus dstation, blue line
//xlabel('date');
//ylabel('Water level elevation (m asl)');
//xtitle('Water level - Bassac river');
//-----------------------------------------

//-----------------------------------------
// day of the studied period : 1 for start, 2 for end
//-----------------------------------------
day1=36220; // 1999 hydrologique
day2=36585; //
dt=1/(24*60); // time step in days
duration=day2-day1;
Nsim=duration/dt+1; // number of simulation instants

//
// declaration of variables that are to be stored for further analysis of plot
zprek=zeros(Nsim,1); // water level in the prek
Qprek=zeros(Nsim,1);
Zus=zeros(Nsim,1); // Water level in the river
zflood=zeros(Nsim,1); // Water level in the flooded area
Qflood=zeros(Nsim,1);//flow from prek to outside
Vflood=zeros(Nsim,1);
t=zeros(Nsim,1);
QS=zeros(Nsim,1); // sediment inflow
A=zeros(Nsim,1);
V=zeros(Nsim,1);//volume into the prek
D=zeros(Nsim,1);
w=zeros(Nsim,1);//opening gate
p=zeros(Nsim,1);//pumping out
sp=zeros(Nsim,1); // pumping in-Service Provider
rain=zeros(Nsim,1); // rainfall data
evap=zeros(Nsim,1); // evaporation data
```

```
//---------------------------
//Prek design
//---------------------------
zb=0; // prek bottom level (m)
Sbk=1.5; // bank slope
bprek=3; // prek width at bottom (m)
L=2400; // length (m)
Zbkmin=3.5; // lowest bank level (m)
zini=zb; // initial water level (m)
l=bprek+2*Sbk*Zbkmin; // prek width at zbkmin (m)

//Weir characteristics
CdGate=0.6; //coefficient de débit, dénoyé
CdWeir=0.4; //coefficient de débit, dénoyé

//Gate characteristics
Bg=4;
Z0gate=zb; //prek bottom level at the gate
Wgate=s1(2:9674,7);//calendar of gate opening

//Flood plain characteristics
zfini=Zbkmin; // initial water level in flood plain
Smax=1112000; // surface flood plain max (m2)
hplain=s1(2:8,11); //courbe hauteur surface
Splain=s1(2:8,12); //courbe hauteur surface
Vplain = CalcVflood(hplain,Splain); // Calcul des volumes pour chaque hauteur
Mflood=[Vplain';hplain'];

Csed=0.400; // sediment concentration in kg/m3


//---------------------------
// initialisation
zprek(1)=zini;  // initial water level
zflood(1)=zfini; // initial level in flood plain
t(1)=day1;
[A0,V0,D0]=GeomPrek(zini,zb,bprek,L,Sbk); // area, volume, depth
```

```
A(1)=A0;
V(1)=V0;

// Period selection
tiPeriod = find(dstation >= day1 & dstation <= day2);
dstation = dstation(tiPeriod)
Zstation = Zstation(tiPeriod)
Wgate = Wgate(tiPeriod)
p_out = p_out(tiPeriod)
p_in = p_in(tiPeriod)
rainfall = rainfall(tiPeriod)
evaporation = evaporation(tiPeriod)

// Input interpolations
LogPrn("Input interpolations");
j=1:Nsim;
t=(j-1).*dt+day1; // time of simulation
Zus=interp1(dstation,Zstation,t);
w=interp1(dstation,Wgate,t);
p=interp1(dstation,p_out,t);
sp=interp1(dstation,p_in,t);
rain=interp1(dstation,rainfall,t);
evap=interp1(dstation,evaporation,t);

LogPrn("Start simulation");
//-------------------------------------------------- loop for all days of the period
```

```
for j=2:Nsim
    
    if modulo(j,2000)==0 then
        LogPrn("Work in progress... " + msprintf("%5.1f",j/Nsim*100) + " %");
    end
//-------------------------
    
    zus=Zus(j); // water level at time t(j) - zus=upstream level, in the river
    W=w(j);// gate opening at time t(j)
    P=p(j); // pumping volume / m prek
    SP=sp(j); // pumping volume by service provider
    Rain=rain(j); // rainfall
    Evap=evap(j); // evaporation

    // evaluate volume with river water level
    [A1,V1,D1]=GeomPrek(zus,zb,bprek,L,Sbk); // area, volume, depth
    
    zds=zprek(j-1); // water level in prek, at previous time step
    Qin=QGATE(zus,zds,Z0gate,Bg,CdGate,W); // discharge to prek
    
    zout=zflood(j-1); // water level outside the prek, at previous time step
    Qout=QWEIR(zds,zout,Zbkmin,l,CdWeir); //discharge by flooding
    //if Qout > 5000 then pause; end
    Qprek(j)=Qin; // store discharge
    Qflood(j)=Qout;//store flow from prek to outside

    //sediment inflow in kg
    QS(j)=max(Qin,0)*Csed; // assumption: all sediment has deposited in prek: if inflow is negative, then QS=0
    // Volume balance into the prek
    dV=(Qin*86400-P*L+SP-Qout*86400+Rain*l*L-Evap*l*L)*dt;//variation of volume during dt
    dV=max(-V0,dV);//the final volume must be greater than 0
    if W>0.001 then
        if zus>zds then
            dV=min(dV,V1-V0);//max de variation
        else
            dV=max(dV,V1-V0);//max de variation
        end
```

```
    //Volume balance in flood plain
    Vflood(j)=max(min(Vflood(j-1)+Qout*86400*dt+Rain*Smax*dt-Evap*Smax*dt,Vplain(6)),0); //volume in flood plain during dt
    zflood(j)=interpln(Mflood,Vflood(j));

    dz=dV/max(A0,1);
    Vini=V0;
    Vfin=V0+dV;
    Qech=(dV/dt+P*L+SP)/86400;
    z=zprek(j-1)+dz; // new water level in the prek
    zprek(j)=z,zds;  // store water level in the prek

    [A0,V0,D0]=GeomPrek(z,zb,bprek,L,Sbk); // update area and volume - these variables could stored
    A(j)=A0;
    V(j)=V0;

end

LogPrn("End of simulation")

LogPrn("Plot pumping volume");
figure(1)
plot(t-day1,p*L,'b-')
xlabel('day from beginning of period');
ylabel('pumping volume');
xtitle('pumping volume');

LogPrn("Plot Water levels in Bassac and prek");
figure(2)
plot(t-day1,Zus,'b-')
plot(t'-day1,zprek,'r-')
xlabel('day from beginning of period');
ylabel('Water level elevation (m asl)');
xtitle('Water levels in Bassac and prek');
legend("Water level Bassac","Water level Prek")
```

```
M=[t',A,V];
csvWrite(M,'volume stored');

LogPrn("Plot Flow in (black) and out(blue)");
figure(3)
plot(t'-day1,Qprek,'k-')
plot(t'-day1,Qflood,'b-')
xlabel('day from beginning of period');
ylabel('Discharge (m3/s)');
xtitle('Flow in (black) and out(blue)');
legend("Flow_prek","Flow_flood")

//figure(4)//gate opening
//plot(t-day1,w,'r-')
//xlabel('day from beginning of period');
//ylabel('gate opening');
//xtitle('gate opening');

LogPrn("Plot Rainfall and evaporation");
figure(5)//Rainfall and evaporation
plot(t-day1,rain,'r-')
plot(t-day1,evap,'b-')
xlabel('day from beginning of period');
ylabel('mm/day');
xtitle('Rainfall and evaporation');
legend("Rainfall","Evaporation")

LogPrn("Plot Flood");
figure(6)//Zflood
plot(t'-day1,zflood,'b-')
xlabel('day from beginning of period');
ylabel('flood level (asl)');
xtitle('Water level in flood plain');

LogPrn("Plot Volume balance");
figure(7) // Termes du bilan
plot(t'-day1,[Qprek'*86400;-p*L;sp;-Qflood'*86400;rain*l*L;evap*l*L]'*dt)
legend("Qprek","p","sp","Qflood","rain","evap")

// Total sediment inflow
Msed=inttrap(t,QS)*86400;
porosity=0.4;
rhosed=2650; // typical value for sand
VolSed=Msed/(rhosed*porosity)
depthsed=VolSed/(bprek*L)
```

Script des fonctions annexes

```
/// Modele Prek: fonctions annexes

function q=QGATE(Z1,Z2,Z0,A,CdGate,CdWeir,W);
//--- Calcul de loi de seuil de cote Z0 et longueur A =
      ZAM=max(Z1,Z2);
      ZAV=min(Z1,Z2);

      if (Z1 >= Z2) then
          sgnQ=1;
      else
          sgnQ=-1;
      end

      R2G=4.4; //! racine(2g)
      HAM=ZAM-Z0;
      HAV=ZAV-Z0;

      if (HAM<W) then
          // Ecoulement à surface libre => déversoir
          q=QWEIR(ZAM,ZAV,Z0,A,CdWeir);
      else
          // Ecoulement en charge => orifice noyé
          hav=min(0.6*W,HAV);
          q=CdGate*R2G*A*W*sqrt(HAM-HAV);
      end

      q=sgnQ*q;

endfunction;
```

```
/// Loi de seuil (weir flow)
function q=QweirGC(Zbkmax,Zbkmin,l,Z);
   //Loi de seuil triangulaire; Zbkmax point haut du seuil, Zbkmin point bas du seuil, l distance entre Zbkmin et Zbkmax, Z hauteur d'eau dans le prek
   Ham=max(Z-Zbkmin,0);
   if Zbkmax>Zbkmin then
   q=1.32*(l/(Zbkmax-Zbkmin))*Ham^2.47;
   else q=QWEIR(Z,Z2,Zbkmin,l,Cd);
   Z2=0;
   end
endfunction
```

```
function q=QWEIR(Z1,Z2,Z0,A,Cd);
//--- Calcul de loi de seuil de cote Z0 et longueur A ; Z1 cote amont, Z2 cote aval
      ZAM=max(Z1,Z2);
      ZAV=min(Z1,Z2);

      if (Z1 >= Z2) then
         sgnQ=1;
      else
         sgnQ=-1;
      end

      R2G=4.4; //! racine(2g)
      HAM=ZAM-Z0;
      HAV=ZAV-Z0;
      CD2=1.5*sqrt(3.)*Cd; //!coeff. de la loi de débit en régime noyé
      R1=Cd*R2G*A;
      R2=CD2*R2G*A;

      if((HAM<=0)|(HAM<=HAV)) then
         q=0;
      elseif(HAM>(1.5*HAV)) then //!---- régime dénoyé
          q=R1*HAM^1.5;
      else
//!---- régime noyé
          q=R2*HAV*sqrt(HAM-HAV);
      end;
      q=sgnQ*q;

endfunction;
```

```
function [A,V,depth]=GeomPrek(z,zb,bw,L,Sbk)
    // Function that gives the area A and the volume V and depth D for a given elevation z
    // zb: bottom elevation
    // bw: bottom width
    // L: length
    // Sbk: side bank slope
  //  z=min(z;zbk);
    depth=z-zb;
    B=bw+2*Sbk*depth;
    A=L*B;//area at the surface of water
    Acs=(bw+B)*depth/2;// area cross section
    V=Acs*L; //volume
endfunction
```

```
// Calcul de la courbe V(h)
// @param hplain [n x 1] Les hauteurs (m)
// @param Splain [n x 1] Les surfaces (m2)
// @return Vplain [n x 1] Les volumes (m3)
function Vplain = CalcVflood(hplain,Splain)
    Vplain = zeros(hplain)
    for i = 2:size(hplain,1)
        Vplain(i) = inttrap(hplain(1:i),Splain(1:i))
    end
endfunction
```

ANNEXE J : EMPRISE DES VILLAGES DES ZONES NORD ET SUD

Ci-dessous est présentée l'emprise des villages des zones Nord et Sud.

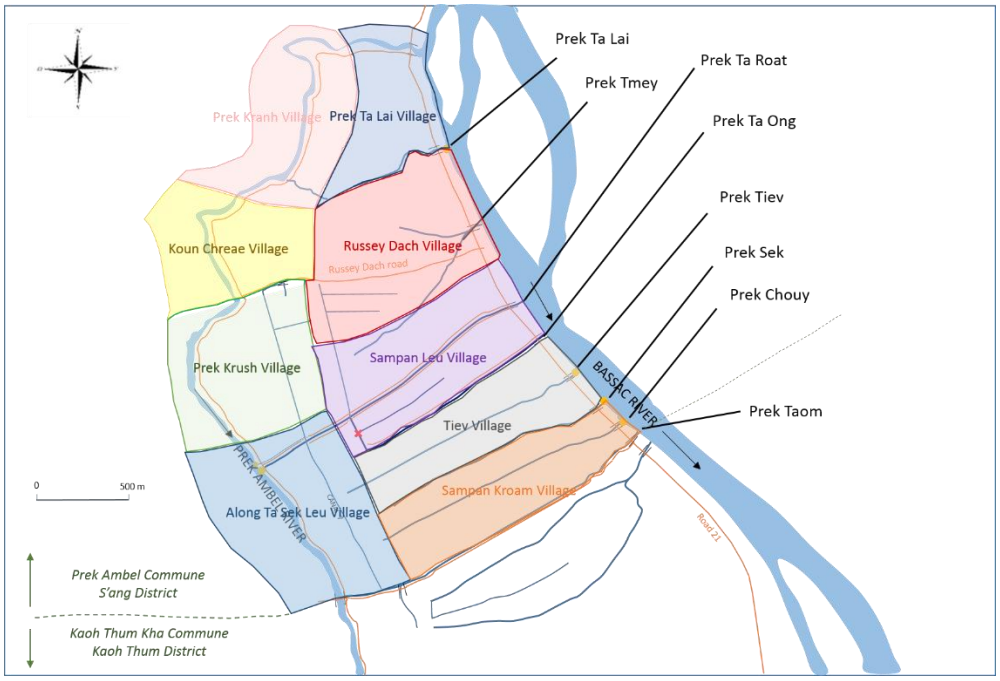


Fig. 13 : Emprise des villages de la zone Nord

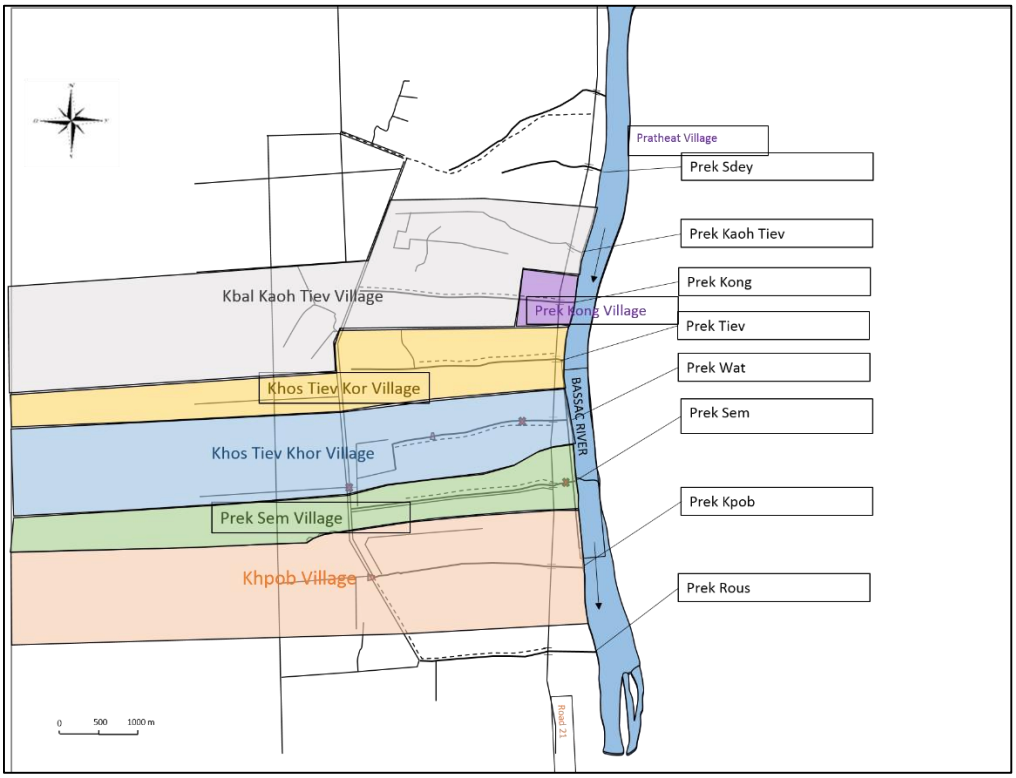


Fig. 14 : Emprise des villages de la zone Sud

ANNEXE K : CARTES INONDATION/TOPOGRAPHIE

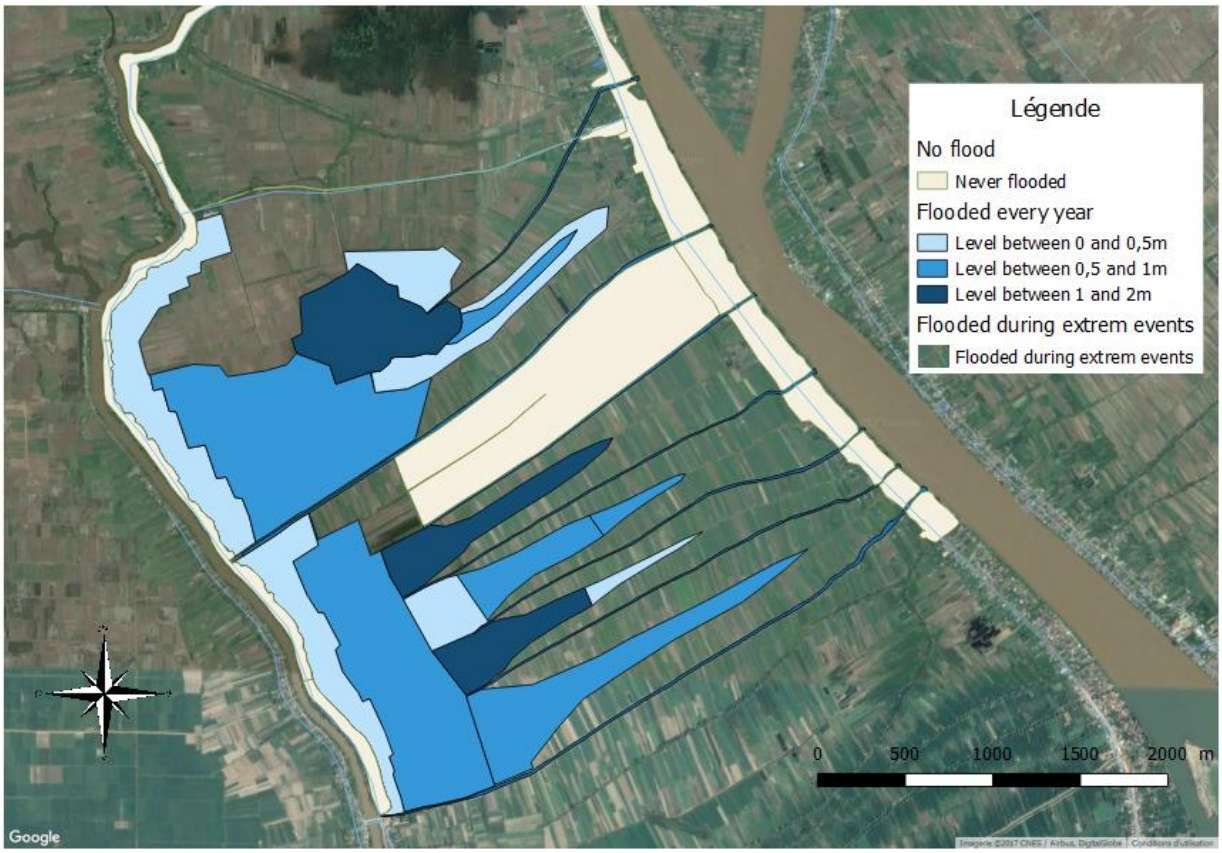


Fig. 15 : Carte inondation/topographie de la zone Nord

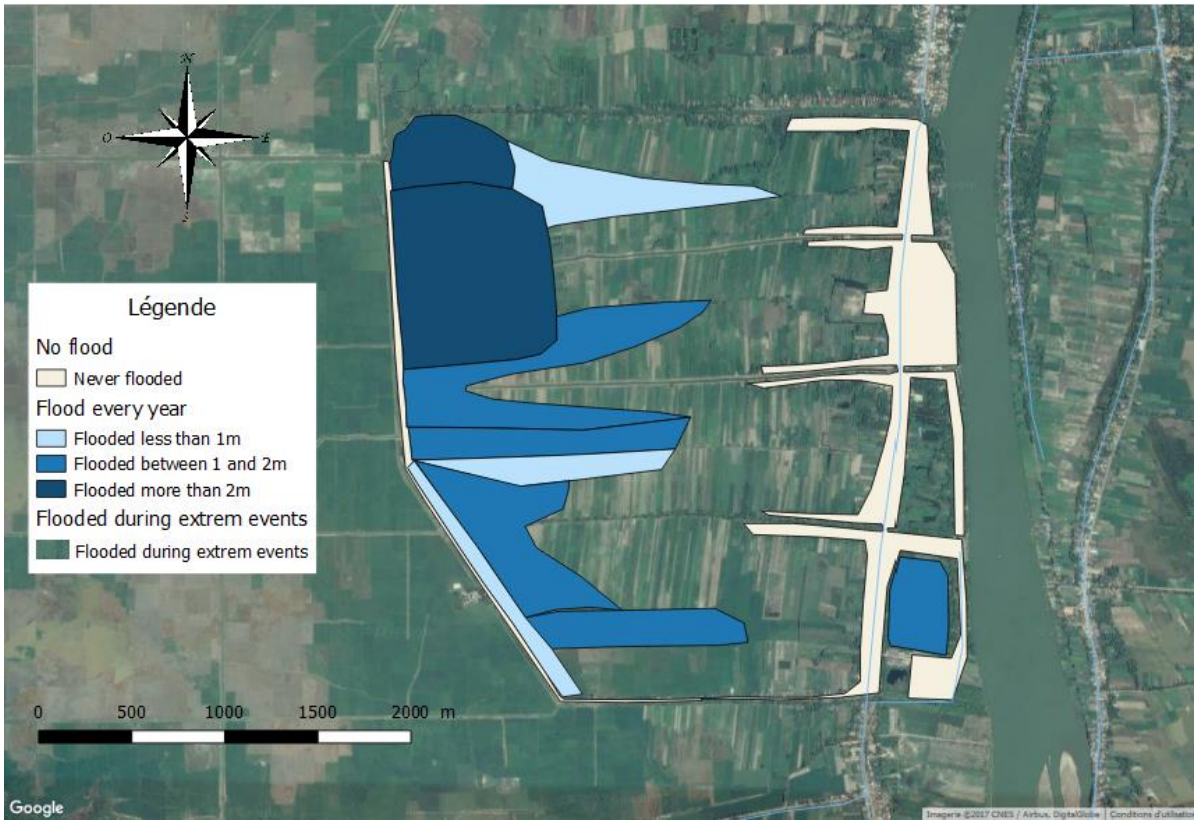


Fig. 16 : Carte inondation/topographie de la zone Sud

ANNEXE L : RESULTATS ISSUS DE LA SIMULATION CROPWAT

Cas de la canne à sucre plantée en mai

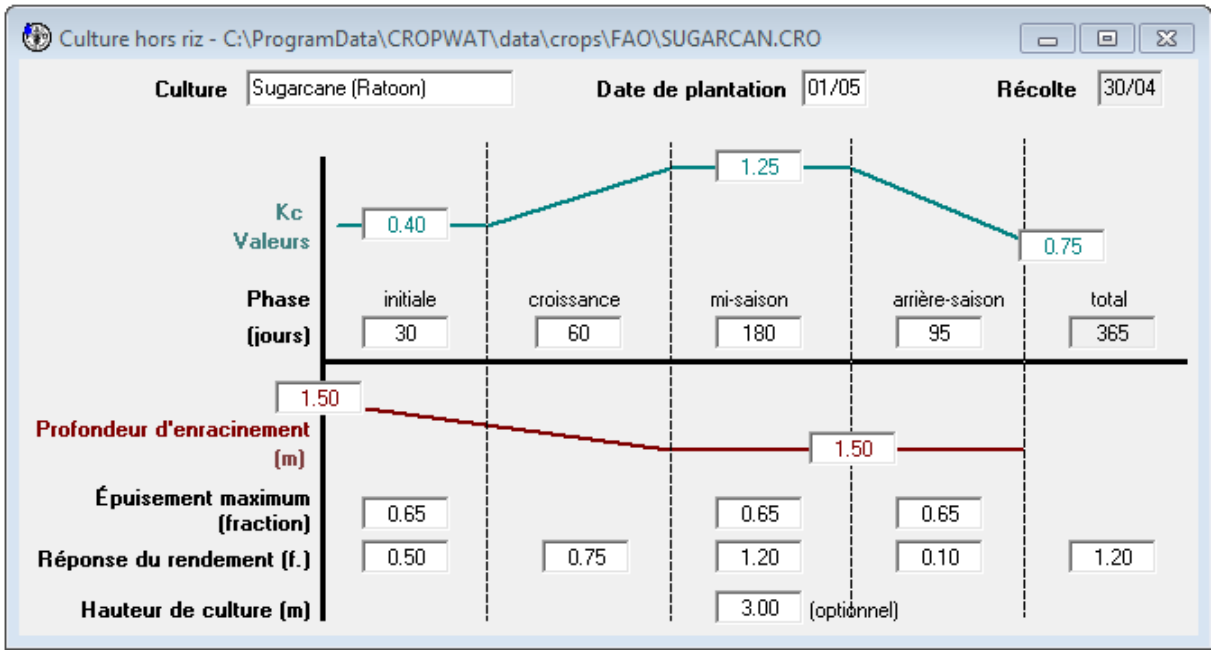


Fig. 17 : Calendrier de culture de la canne à sucre plantée en mai

Simulation utilisant les données de climwat

Besoins en eau des cultures

Station ETo: PHNOM-PENH-POCHEI — Culture: Sugarcane (Ratoon)

Station Pluie: PHNOM-PENH-POCHEI — Date de plantation: 01/05

Mois	Décade	Phase	Kc	ETc	ETc	Pluie eff.	Bes. Irr.
			coeff	mm/jour	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Mai	1	Init	0.40	1.81	18.1	36.8	0.0
Mai	2	Init	0.40	1.74	17.4	44.3	0.0
Mai	3	Crois	0.40	1.72	18.9	41.7	0.0
Jui	1	Crois	0.48	2.01	20.1	37.8	0.0
Jui	2	Crois	0.60	2.47	24.7	36.2	0.0
Jui	3	Crois	0.72	2.88	28.8	35.8	0.0
Jui	1	Crois	0.84	3.27	32.7	34.9	0.0
Jui	2	Crois	0.96	3.62	36.2	34.1	2.1
Jui	3	Mi-sais	1.09	4.17	45.9	35.7	10.1
Aoû	1	Mi-sais	1.13	4.41	44.1	37.1	6.9
Aoû	2	Mi-sais	1.13	4.49	44.9	38.3	6.7
Aoû	3	Mi-sais	1.13	4.34	47.7	41.8	6.0
Sep	1	Mi-sais	1.13	4.19	41.9	46.3	0.0
Sep	2	Mi-sais	1.13	4.03	40.3	49.9	0.0
Sep	3	Mi-sais	1.13	4.11	41.1	50.2	0.0
Oct	1	Mi-sais	1.13	4.18	41.8	51.9	0.0
Oct	2	Mi-sais	1.13	4.26	42.6	53.4	0.0
Oct	3	Mi-sais	1.13	4.21	46.3	46.9	0.0
Nov	1	Mi-sais	1.13	4.17	41.7	40.3	1.4
Nov	2	Mi-sais	1.13	4.12	41.2	35.0	6.2
Nov	3	Mi-sais	1.13	4.12	41.2	26.4	14.8
Déc	1	Mi-sais	1.13	4.12	41.2	15.8	25.4
Déc	2	Mi-sais	1.13	4.12	41.2	6.7	34.5
Déc	3	Mi-sais	1.13	4.22	46.4	5.3	41.1
Jan	1	Mi-sais	1.13	4.32	43.2	4.2	39.0
Jan	2	Mi-sais	1.13	4.42	44.2	1.7	42.5
Jan	3	Arr-sais	1.12	4.47	49.2	2.0	47.1
Fév	1	Arr-sais	1.07	4.36	43.6	2.1	41.5
Fév	2	Arr-sais	1.02	4.24	42.4	1.9	40.5
Fév	3	Arr-sais	0.98	4.28	34.3	4.0	30.2
Mar	1	Arr-sais	0.94	4.30	43.0	5.7	37.3
Mar	2	Arr-sais	0.89	4.28	42.8	7.3	35.6
Mar	3	Arr-sais	0.84	4.05	44.6	12.1	32.5
Avr	1	Arr-sais	0.79	3.82	38.2	16.7	21.5
Avr	2	Arr-sais	0.74	3.60	36.0	20.9	15.0
Avr	3	Arr-sais	0.69	3.24	32.4	27.6	4.8
					1380.4	**989.0**	**542.7**

Fig. 18 : Besoins en eau de la culture de canne à sucre

Pour citer cet ouvrage

Pratx, Ophélie, (2017). Etude du fonctionnement hydro-agricole de canaux d'irrigation : cas des « preks » sur les rives du Bassac au Cambodge. Mémoire de stage M2 et stage de fin d'études ENGEES, Master Eau, parcours Eau et Agriculture, AgroParisTech/Montpellier SupAgro/Univ. Montpellier, ENGEES. 44p + annexes.

ENGEES
1 Quai Koch
67070 Strasbourg
Tel : 03.88.24.82.82

AgroParisTech - centre de Montpellier
Campus d'Agropolis International
648 rue Jean-François Breton
BP 44494
34093 Montpellier cedex 5
Tel : 04.67.04.71.00

RESUME

Quelques kilomètres après la naissance du delta du Mékong au Cambodge, se trouvent des zones d'irrigation particulières formées de canaux en terre appelés « preks » reliant perpendiculairement la rivière Bassac aux plaines d'arrière berge. Dans l'objectif de réduction de la pauvreté s'appuyant sur le développement des zones agricoles, nombreux sont les organismes internationaux à investir dans les programmes de réhabilitation de zones d'irrigation. Premier pas dans la compréhension hydro-agricole de ces preks, l'étude retranscrite dans ce mémoire a pour but d'apporter des connaissances sur le fonctionnement hydraulique d'un tel système d'irrigation ainsi que de discuter les choix techniques de réhabilitation. Pour mener cette étude, une campagne d'enquêtes auprès des usagers et des relevés terrain ont été réalisés sur deux sous-zones afin d'atteindre une meilleure compréhension du système. Par la suite, l'étude amène à une modélisation du fonctionnement hydraulique d'un prek selon les différentes caractéristiques qu'il peut présenter. Parmi les récentes installations, les vannes apparaissent surdimensionnées ; une ouverture de quelques dizaines de centimètres entraine le remplissage du prek en seulement quelques heures. De plus, le niveau de calibrage du prek joue en rôle essentiel dans la disponibilité de l'eau dans le canal puisqu'un calibrage à 1m asl entraine une absence d'eau pendant plus de 2 mois et demi dans la période de mars à mai. Un calibrage haut peut néanmoins être compensé par l'installation d'une pompe d'approvisionnement dont le coût de redevance pour l'agriculteur nécessite encore d'être affiné au vue de la variabilité des résultats. Une réflexion sur la protection contre les inondations discute les avantages et inconvénients d'une vanne en entrée de prek. Elle empêche les débordements du prek mais également l'amortissement de la crue et l'apport de sédiments. De plus, utilisée de manière isolée elle ne permet pas la protection contre les inondations car la plaine est reliée à d'autres preks capables de déborder. Enfin, pour améliorer et poursuivre l'étude, il serait intéressant d'élargir l'exercice de modélisation à une sous-zone afin de se rendre compte du fonctionnement inter-connecté du système de preks.

Mots clés : Irrigation, Canal, Prek, Enquête, Modélisation hydraulique, Cambodge