



**ELABORATION D'UN OUTIL D'EVALUATION ET DE
PLANIFICATION DES RESSOURCES EN EAU DES
RETENUES HYDRO-AGRIQUES : APPLICATION DU
MODELE WEAP A LA RETENUE DE KIERMA**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : EAU (COLLECTIVITE LOCALE)

Présenté et soutenu publiquement le 26 Juin 2013 par

Christine Lovasoa RAZANAMAHANDRY

Travaux dirigés par :

Dr. Eric HALLOT

Chercheur au Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale de l'Université de Liège

M. Francis GUYON

Assistant technique APEFE du projet, basé à la DGADI au Ministère de l'Agriculture et de la
sécurité alimentaire du Burkina Faso

Dr Bruno BARBIER

Enseignant Chercheur au 2iE/ CIRAD, Centre Commun de Recherche Eau & Climat (CCREC)

M. Sévère FOSSI

Ingénieur de recherche au 2iE, Centre Commun de Recherche Eau & Climat (CCREC)

Jury d'évaluation du stage :

Président : M. Bruno BARBIER

Membres et correcteurs : M. Sévère FOSSI
M. Dial NIANG
M. Sewa DA SILVEIRA

Promotion [2012/2013]

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui nous ont aidés à achever ce travail. Notre profonde gratitude s'adresse particulièrement à :

- Docteur Eric HALLOT, Maître de Conférence au Département de Géographie, et Chercheur au Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale de l'Université de Liège en Belgique, qui nous a aidé à chaque étape du traitement des données malgré la distance qui nous sépare.
- Monsieur Francis GUYON, Assistant Technique APEFE au sein de DGADI qui nous a encadré étroitement en donnant tout son temps malgré ses multiples occupations.
- Monsieur Bruno BARBIER, Enseignant chercheur au 2iE et au Cirad, notre co-encadreur au sein de 2iE, d'avoir apporté ses critiques positives.
- Monsieur Sévère FOSSI, Ingénieur de recherche au 2iE, notre deuxième co-encadreur au sein de 2iE, d'avoir apporté ses remarques enrichissantes.
- Docteurs Dial NIANG, Jean Emmanuel PATUREL et Corentin SOME, pour leurs précieuses aides et leurs remarques pertinentes dans l'élaboration de ce document.
- Monsieur Ousmane ZOUNDI et Madame KABORE pour son accueil chaleureux lors des travaux de terrain.
- Monsieur Valentin NIKIEMA, pour sa participation dans différentes activités du terrain;
- La DGADI et tout son personnel et ses partenaires pour leur appui financier et technique, qui ont grandement participé à la réalisation de cette étude. Nous leur adressons notre reconnaissance.
- Tous les producteurs de Kierma d'avoir collaboré à notre travail.

Nous ne saurions terminer sans exprimer notre grand remerciement à nos parents, notre frère et sœur, et à nos proches pour leurs encouragements incessants et pour l'amour qu'ils n'ont cessé de me témoigner.

Christine

RESUME

Les petits barrages des pays du Sahel sont de plus en plus menacés par la sédimentation et par l'augmentation des prélèvements. Or ces phénomènes sont relativement peu quantifiés dans la région. La retenue de Kierma située au Burkina Faso connaît un problème de sédimentation qui a déjà diminué de près de 3% sa capacité de stockage initiale qui était de 760 000 m³. De plus les prélèvements du maraichage et de l'élevage ne cessent d'accroître et l'évaporation a probablement augmenté à cause du changement climatique. La demande en légume va probablement s'élever dans les années futures ce qui va nécessiter l'augmentation de la surface irriguée et l'augmentation des prélèvements d'eau.

Pour suivre l'évolution de ce système au fil des années et afin de prendre de meilleures décisions, nous avons proposé de réaliser une étude prospective de la situation en prolongeant les tendances de la sédimentation et des prélèvements. Nous avons intégré ces données dans un outil d'aide à l'évaluation et à la gestion des barrages à partir du modèle WEAP « Water Evaluation Planning System ».

Nos résultats montrent que le maraichage pourrait bien tripler jusqu'à 2040 et la sédimentation va combler près de 50% du barrage. La contribution de l'élevage reste modérée et devrait pouvoir se poursuivre. Vers 2022 le barrage ne pourra plus satisfaire les besoins. Il faudra alors réduire les consommations et changer de pratiques.

Mots clés :

1. Modélisation

2. WEAP

3. Burkina Faso

4. Retenue de Kierma

5. Irrigation

ABSTRACT

The small reservoirs of Sahelian countries are increasingly threatened by sedimentation and increased uptake. However, these scarcely quantified in the region. The dam of Kierma located in Burkina Faso has a problem of sedimentation which has decreased by almost 15 percent its initial storage capacity of was 760 000 cubic meter. In addition, demands of vegetables and livestock product are still increasing and the evaporation has probably increased because of climate change. As the demand for vegetables will probably rise in the coming years, the irrigated area and water withdrawals will increase.

To follow the evolution of this system for the coming decades years and make better decisions, we propose a prospective study of the situation by extending the trends of sedimentation and water withdrawals. We incorporated these data into a tool for the evaluation and management of dams called WEAP «Water Evaluation Planning System» model.

Our results show that gardening could double to 2040 and sedimentation will fill up to 50% of the reservoir. By 2022, the dam will no longer cover the various demand. So, the consumption must be reduced and practices changed. The contribution of livestock remains moderate and is expected to continue.

Key Words :

1. Modeling

2. WEAP

3. Burkina Faso

4. Kierma's reservoir

5. Irrigation

LISTE DES ABREVIATIONS

2IE	Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
APEFE	Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger
BUNASOLS	Bureau National des Sols
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
DGADI	Direction Générale des Aménagements et du Développement de l'Irrigation
DRAH	Direction Régionale de l'Aménagement Hydraulique
ESSA	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
GPS	Global Position System
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
MEE	Ministère de l'Environnement et de l'Eau
MES	Matière En Suspension
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PADI	Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation
PLAE	Programme de Lutte Anti-Erosive
UNFPA	United nations Fund for Population Activities
WBI	Wallonie Bruxelles International
WCD	World Council Development

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
RESUME.....	ii
ABSTRACT	iii
LISTE DES ABREVIATIONS	iv
SOMMAIRE	1
LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES FIGURES.....	3
LISTE DES CARTES	4
LISTE DES PHOTOS.....	4
I. INTRODUCTION.....	5
1. Contexte	5
2. Problématique.....	6
II. CADRE CONCEPTUEL DE L'ETUDE	7
1. Zone d'étude.....	7
1.1. Localisation.....	7
1.2. Climat.....	8
1.3. Etat de surface.....	8
1.4. Milieu humain.....	9
2. Objectifs	9
2.1. Objectif global.....	9
2.2. Objectifs spécifiques	9
3. Hypothèses de travail	10
III. MATERIELS ET METHODES.....	11
1. Outil WEAP	11
1.1. Présentation.....	11
1.2. Variables utiles pour la modélisation d'une retenue.....	11
1.3. Etape de traitement.....	12
1.4. Données de sorties	13
2. Données collectées	13
2.1. Variables du côté offre en eau.....	13
2.2. Variables du côté prélèvement en eau.....	20
3. Schéma récapitulatif de l'utilisation des données dans WEAP.....	24
4. Application du modèle WEAP a la retenue de Kierma sur la base des données collectées ou simulées	25

4.1.	Caractéristiques de la retenue de Kierma	25
4.2.	Modélisation sur WEAP	26
IV.	RESULTATS	35
1.	Evaluation des ressources en eau	35
1.1.	Quantité d'eau disponible au niveau de la retenue à l'horizon 2040	35
1.2.	Evolution future de besoin en eau de chaque site de demande	36
1.3.	Adéquation entre l'offre et la demande.....	38
2.	Planification des ressources en eau	38
1.1.	Besoin en eau théorique des cultures	39
1.2.	Irrigation goutte à goutte.....	40
1.3.	Rehaussement du barrage.....	42
1.4.	Moyens antiérosifs	42
V.	DISCUSSIONS ET ANALYSES	44
1.	Par rapport aux données disponibles	44
2.	Par rapport aux méthodes de traitement	44
3.	Par rapport aux résultats	45
VI.	RECOMMANDATIONS	46
VII.	CONCLUSION	47
VIII.	Bibliographie	49
IX.	Annexes	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Hauteur, surface et volume de la retenue	18
Tableau 2 : Précipitation mensuelle à Kierma pour l'année 2012	20
Tableau 3 : Evaporation directe de l'eau du bac	22
Tableau 4 : Taux d'accroissement moyen annuel de chaque type de bétails.....	29
Tableau 5 : Volume d'eau observé mensuellement au niveau de la retenue (Année 2012).....	30
Tableau 6 : Volume de sédiment.....	30
Tableau 7 : Capacité de stockage de la retenue pour quelques années futures	31
Tableau 8 : Evaporation nette mensuelle de la retenue pour l'année 2012.....	31
Tableau 9 : Caractéristiques du site de demande « Irrigation » (scénario référence)	32
Tableau 10 : Caractéristiques du site de demande « Bétails » pour le scénario référence.....	33
Tableau 11 : Bilan hydrique de la retenue de Kierma en 2012	34
Tableau 12 : Variables d'entrées pour la situation actuelle.....	56
Tableau 13 : Variables d'entrées pour les années futures	57
Tableau 14: Résultat de dépouillement des jaugeages à la station de KIER 1.....	80

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Différente zone de la retenue utile pour la modélisation avec WEAP	26
Figure 2 : Les couches de la zone d'étude, la source et les sites de demande.....	27
Figure 3 : Arbre des scénarios.....	30
Figure 4 : Evolution de la capacité de stockage de la retenue.....	35
Figure 5 : Evolution du besoin en eau d'irrigation jusqu'en 2040.....	36
Figure 6 : Evolution du besoin en eau pour les bétails jusqu'en 2040.....	37
Figure 7 : Evolution de l'offre et la demande en eau au niveau de la retenue de Kierma	38
Figure 8 : Evolution de besoin en eau théorique des cultures par rapport aux autres scénarios	40
Figure 9 : Evolution de besoin en eau par le choix d'irrigation goutte à goutte par rapport aux autres scénarios	41
Figure 10 : Comparaison de la surface actuelle avec la surface rehaussée.	42
Figure 11 : Evolution de la capacité de stockage en diminuant le taux de dépôt à 50%	43

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Localisation de la retenue de Kierma	7
Carte 2 : Suivi mensuel de la surface en eau de la retenue de Kierma.....	16
Carte 3 : Superposition des données de la bathymétrie avec la surface en eau de la retenue de Kierma du 9 Octobre 2012	17
Carte 4 : carte bathymétrique de la retenue de Kierma du mois d'Octobre 2012	17
Carte 5 : carte topographique du bassin versant de Kierma	25

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Fosse pédologique.....	14
Photo 2 : Echelle limnimétrique au niveau de la retenue de Kierma	15
Photo 3 : Tube deux pouces dans lequel sera logé le limnigraphe OTT Orpheus Mini.....	15
Photo 4 : Pluviographe dans le bassin versant de Kierma.....	20
Photo 5 : Abri météo clôturé avec le bac évaporateur.....	21

I. INTRODUCTION

1. Contexte

La sédimentation des barrages est un phénomène naturel très complexe qui a des conséquences importante en amont et en aval des barrages, mais aussi au niveau du réservoir (REMINI & REMINI, 2003). On estime qu'environ 1% de la capacité de stockage des réservoirs existants est perdue chaque année par la sédimentation (WCD, 2000).

Ce phénomène est présent au Burkina Faso. En 2012, le gouvernement Burkinabè a décidé de la réalisation de huit nouveaux barrages et de la réhabilitation de vingt huit autres barrages suite à l'accumulation de sédiments qui affecte la quantité d'eau du réservoir (AGENCE D'INFORMATION DU BURKINA, 2012). De plus, avec les effets du changement climatique l'avenir des réservoirs de la sous-région apparait doublement menacé et inquiète populations et décideurs.

La retenue de Kierma située au Burkina Faso n'échappe pas à ces problèmes. Il s'agit d'une retenue hydro-agricole qui supporte une activité de production maraichère de contre saison très importante. A ceci s'ajoute les prélèvements de l'élevage. De plus, la sédimentation par les apports sédimentaires provenant du bassin versant y entraîne une réduction progressive de sa capacité de stockage.

Devant cette situation complexe et multiforme, il est nécessaire d'utiliser des outils de prospective afin de mettre en évidence et d'évaluer cette pression sur les ressources en eau et afin d'informer les acteurs et les gestionnaires de la retenue sur sa durabilité et sur les moyens de la prolonger. Cette évaluation intègre différents scénarii de gestion de la ressource et/ou d'évolution de facteurs environnementaux tels que le taux de sédimentation. Cela nous a amené à réaliser, par le présent document, un travail de recherche qui s'intitule « *Elaboration d'un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau des retenues hydro-agricoles : Application du modèle WEAP à la retenue de Kierma* ».

Cette recherche entre dans le cadre du Programme de la DGADI intitulé « Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation (PADI) 2011 – 2013 » impliquant l'Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger (APEFE) de la coopération Wallonne. Ce programme est composé de quatre objectifs dont l'un vise à mettre à la disposition de la DGADI, de l'Agence de l'Eau du Nakanbé (AEN) et des DRAH du Centre, du Centre Sud et du Plateau Central des outils opérationnels de protection des retenues d'eau d'irrigation. Ce résultat de programme s'appuie sur une approche de type recherche /

développement impliquant également deux partenaires wallons : le Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale de l'Université de Liège (ULg) et la Direction des Cours d'Eau non Navigables (DCENN) du Service Public de Wallonie. Signalons également l'implication de Wallonie Bruxelles International (WBI) dans le co-financement du PADI et notamment l'octroi de bourses de stage pour des étudiants locaux, dont j'ai pu bénéficier.

2. Problématique

La retenue de Kierma a été construite en 1998. Son volume initial était de 760 000 m³ (DADI, 2011). Depuis Novembre 2011, le volume en eau de cette retenue a diminué pendant que la demande continue à croître, notamment celle de l'irrigation qui est un secteur le plus consommateur d'eau au niveau mondial (FAO, AQUASTAT- Système d'information de la FAO sur l'eau et l'agriculture, 2013). A part ces différents prélèvements, la retenue de Kierma se remplit de sédiment. C'est dans ce cadre que se pose la question de recherche suivante: *quels seraient les impacts de la sédimentation sur la quantité d'eau de la retenue de Kierma ainsi que sur les différents usages de cette retenue?*

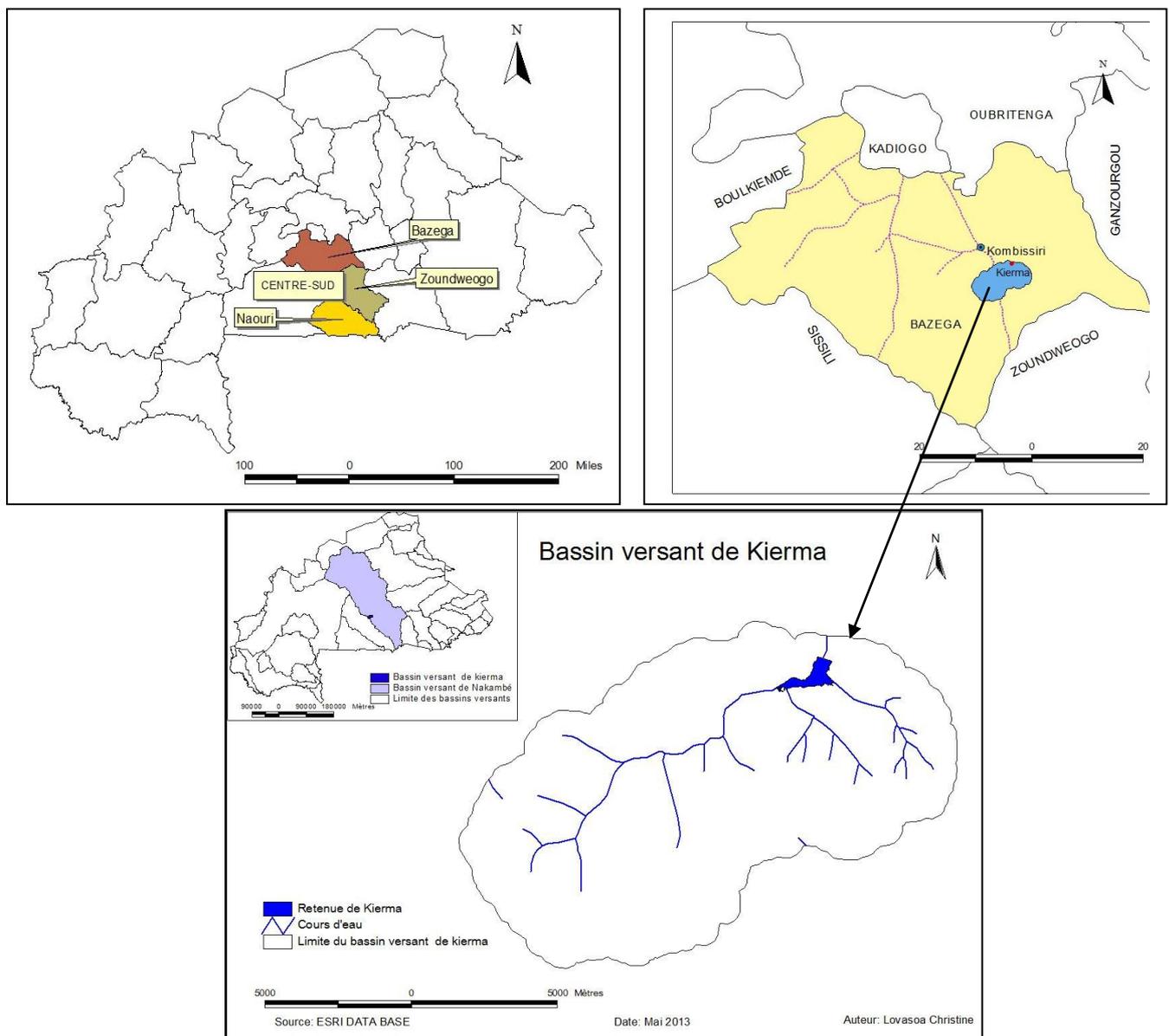
Pour bien comprendre la problématique évoquée, les grandes lignes suivantes vont être explicitées: le cadre conceptuel de l'étude, les matériels et méthodes de travail, les résultats suivis de discussions et analyses, la conclusion et enfin quelques recommandations et perspectives.

II. CADRE CONCEPTUEL DE L'ETUDE

1. Zone d'étude

1.1. Localisation

La retenue de Kierma se situe dans le bassin versant du Nakanbé (Carte 1). Elle est localisée par les coordonnées géographiques (UTM WGS 84) de longitude W -1,24431 et latitude N 12,01878. L'altitude moyenne de la zone est de 290m (MEE, 2006 in (BERE, 2012)) et la surface du bassin versant amont est de 99,3 km² (PADI, 2012). La retenue se trouve à une dizaine de km de Kombissiri le chef-lieu de de la province du Bazega, dans la région du Centre Sud, à environ 45 Km de Ouagadougou.



Carte 1 : Localisation de la retenue de Kierma

1.2. Climat

La province du Bazega a un type de climat nord-soudanien (BERE, 2012). La zone est caractérisée par une saison sèche de 7 mois sur 12, allant de Novembre à Mai. Deux types de vent sont rencontrés : l'Harmattan et la Mousson qui soufflent respectivement pendant la période sèche et humide. La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 950 mm (BERE, 2012).

1.3. Etat de surface

Lelong et Roose (1993) désignent comme « états de surface », l'ensemble des caractéristiques du sol, de son occupation et des techniques culturales, ainsi que les propriétés hydrodynamiques de l'horizon superficiel (densité apparente, porosité, perméabilité...) qui en résultent.

Sol

Le bassin versant de Kierma a une pédologie à dominance des sols ferrugineux tropicaux lessivé à tâche et à concrétion avec quelques inclusions de sols peu évolués d'apports alluviaux hydromorphes et de sols tropicaux lessivé (à tâche et à concrétions et modaux) (*cf Annexe I*). On note également la présence de sols ferrugineux tropicaux lessivé hydromorphe, sols hydromorphes peu humifère à pseudo-gley d'ensemble (BUNASOLS, 1997 in (BERE, 2012)).

Géologie

La géologie de ce bassin est formée par un glacis en bas de pente avec des roches constituées de migmatite et de granite, et un ensemble fluvio-alluvial (valons des cours d'eau secondaire).

Réseau hydrographique

Le village de Kierma est traversé par la rivière de Kierma d'où son appellation « retenue de Kierma ».

Végétation

La végétation est essentiellement composée d'une savane parc dominée par des espèces arborées à arbustives : *Combretum sp.*, *Guiera senegalensis* ; *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa*, *Tamarindus indica*, *Lannea acida*, *Lannea microcarpa*, *Sclerocarya birrea*, *Pilliosigma sp.*, *Acacia sp.*, *Mitragyna inermis*, *Anogeissus leiocarpus*, *Khaya*

senegalensis et *Balanites egyptiaca*. Le tapis herbacé est composé de *Loudetia sp*, *Cymbopogon sp*, *Andropogon gayanus* (BUNASOLS, 1997 in (BERE, 2012)).

Utilisation de la retenue et pressions

La retenue de Kierma est utilisée pour développer la culture maraîchère en saison sèche surtout afin d'assurer la demande en légume (oignon, choux, aubergine, oseille, poivron,...) des villes de Kombissiri et de Ouagadougou. Ce réservoir assure la majorité des besoins en eau de la culture. Actuellement, le nombre d'exploitant autour de la retenue est environ de cent et presque toutes les zones environnantes ont exploitées. La majorité de ces exploitants utilise la motopompe comme moyen de prélèvement. Cette retenue est aussi destinée à fournir de l'eau pour le bétail. Ce réservoir est soumis à la sédimentation. La retenue de Kierma est alimentée par deux affluents principaux au sud et à l'est. Les affluents transportent des sédiments qui se déposent ensuite au fond du réservoir majoritairement en période de crue. Pour les années à venir, ce phénomène de sédimentation pourrait être la source d'une baisse des rendements agricoles suite à la pénurie d'eau due à la diminution des volumes d'eau stockée. (cf annexe 2).

1.4. Milieu humain

La population résidente au village de Kierma est composée essentiellement de Mossé et de Peuls. L'agriculture et l'élevage constituent les principales activités économiques de ces populations. La production des légumes et des fruits domine dans ce village. Le petit commerce et la pêche occupent une bonne partie de la population jeune.

2. Objectifs

2.1. Objectif global

Cette recherche vise globalement à développer un outil d'aide à la décision sur base du modèle WEAP (Water Evaluation And Planning System) développé par le Stockholm Environment Institute afin d'évaluer les pressions exercées sur les ressources en eau de la retenue de Kierma.

2.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques à atteindre, qui découlent de cet objectif général, sont:

-Les conditions d'application de l'outil WEAP à la retenue de Kierma sont clairement identifiées et analysées en termes de données d'entrées nécessaires et de leur adéquation avec celles données collectées par le projet PADI ;

-Le modèle WEAP est développé sur base des données collectées ou simulées (si non accessible durant la période du mémoire) ;

-Différents scénarii d'évolution des ressources en eau sont proposés et analysés par l'outil WEAP (et notamment un scénario visant à simuler l'évolution de la capacité de stockage de la retenue en fonction de son taux de sédimentation calculé par le PADI et la répercussion de cette évolution sur les usages de l'eau)

3. Hypothèses de travail

Considérant la question de recherche assignée, les hypothèses avancées suivantes sont à vérifier :

Hypothèse 1 : « Dans 20 ans la retenue aura perdu la moitié de son volume »

Hypothèse 2 : « Dans les dix années à venir, l'eau disponible dans la retenue de Kierma ne couvrira plus la demande en eau des différents usages »

III. MATERIELS ET METHODES

1. Outil WEAP

1.1. Présentation

Le Water Evaluation And Planning system ou WEAP est un logiciel développé par l'institut SEI (*Stockholm Environnement Institue*). WEAP est un outil pratique pour la planification des ressources en eau. Il vise globalement à établir un bilan hydrique en tenant compte des paramètres à la fois du côté de la demande (modulations de l'utilisation de l'eau, efficacités des équipements,...) et de l'offre (débit de rivière, eau souterraine, retenues et transferts d'eau) (SEI, 2008)

1.2. Variables utiles pour la modélisation d'une retenue

Les variables utiles pour la modélisation d'une retenue dépendent souvent de l'utilité de cette retenue (barrage hydraulique, barrage hydro-agricole,...), du problème rencontré au niveau du réservoir et surtout de l'outil du modèle (QdF, WEAP...). Dans le cadre de notre étude, notre retenue est à vocation hydro-agricole. Elle a un problème de sédimentation. Nous avons choisi d'utiliser l'outil WEAP pour prédire l'eau disponible dans ce réservoir à plusieurs échéances. Dans cet outil, des variables sont déjà définies automatiquement dans le logiciel au niveau de sites de demande (l'irrigation et l'abreuvement) et d'approvisionnement (la retenue). Ces variables forment les données nécessaires pour la modélisation.

Au niveau de la retenue, nous avons besoin de connaître : sa capacité de stockage, son stockage initial, sa courbe élévation-volume, l'évaporation nette, la perte vers la nappe, le volume observé, le débit entrant et les différentes zones d'une retenue définies par défaut dans WEAP. Au niveau des sites de demandes, les variables suivantes sont exigées : le niveau d'activité annuelle, la consommation d'eau annuelle et mensuelle, le volume d'eau réellement consommée appelé consommation dans WEAP. Le taux d'évolution annuel de chaque variable est aussi nécessaire. Ces variables sont classifiées en deux catégories que sont les données d'entrées pour l'état actuel (voir tableau 1 dans l'annexe 3) et les données d'entrées pour l'évolution future (voir tableau 2 dans l'annexe 3).

1.3. Etape de traitement

WEAP opère avec les principes de base du bilan d'eau. Les applications de WEAP incluent plusieurs étapes à savoir:

- **la spécification de la zone d'étude** : il s'agit soit d'identifier la zone d'étude dans WEAP soit importer de couche d'image de cette zone.
- **la mise en place des objets** : ce sont des objets déjà définis dans WEAP. Ils regroupent les sites de demande, le site de captation ou la source, et les liaisons de transmission entre ces deux sites.
- **le réglage des paramètres généraux**. Ces paramètres sont constitués par : la période de la simulation (Intervalle de temps de simulation définis par l'utilisateur), le pas de temps, les hypothèses clés, et les scénarios.

Les hypothèses clés sont des variables qui permettent de différencier les scénarii proprement dits (climat variable selon la situation réelle) des scénarii de référence (situation imaginaire sans aucune variation interannuelle). Ces variables influent sur l'état de la demande ou bien celui de la source.

Les scénarios sont des variables construites à partir des hypothèses clés sur la base de l'état actuel. Ils se présentent sous trois formes. Dans WEAP, deux formes des scénarios existent déjà par défaut. Il s'agit de la situation actuelle ou « **current Accounts** » et de la situation future nommée « **scénario de référence** ». Le compte actuel révèle l'état actuel de chaque site considéré. Le « Scénario de référence » projette les données de l'état actuel sur toute la période de simulation c'est-à-dire les scénarii créés dans une période de référence choisie correspondent au climat constant (SEI, 2008) . Le troisième format de scénario reflète les changements possibles du système pour les années futures, après l'année de l'état actuel. Ces changements pourraient être en rapport avec le mode de prélèvement suite à l'évolution de la technologie ou bien avec l'accroissement de la demande suite à l'augmentation de la population, etc. Les résultats de ce troisième format de scénario doivent toujours être comparés avec ceux du scénario de référence pour bien montrer le changement qui a eu lieu. Ce changement peut être aussi des phénomènes naturels, par exemple la variation de la température qui influe sur l'évaporation de l'eau de la retenue, l'irrégularité des précipitations pour les années à venir. Ainsi, la projection de ces paramètres est effectuée à l'aide de scénarios synthétiques. Ce scénario nécessite de définir un taux de variation annuelle pour

chaque paramètre. Nous ne pouvons pas déterminer à l'avance le régime climatique pour l'année à venir avec cette méthode de scénario synthétique. Nous pouvons seulement agir sur la variation annuelle de chaque paramètre climatique qui influe sur le volume d'eau stocké dans le réservoir pour les prochaines années, c'est-à-dire l'évaporation et la précipitation.

– L'étape finale consiste à *introduire les données* correspondantes à chaque objet créé dans la vue schématique et à chaque hypothèse en utilisant la vue « donnée » et d'*afficher ensuite les résultats* à l'aide de la vue « résultats ». Nous allons voir les différents résultats dans la partie « Résultats et discussions » de ce travail.

1.4. Données de sorties

En utilisant cet outil, deux types de courbes sont attendus, à savoir :

- la courbe évolutive **observée** du déclin du volume d'eau disponible du à la sédimentation et celle de l'augmentation du volume d'eau prélevé.
- les courbes évolutives **simulées** du déclin du volume d'eau disponible du à la sédimentation et celle de l'augmentation du volume d'eau prélevé.

Différents scénarii possibles pour une meilleure gestion de la retenue sont aussi établis.

2. Données collectées

Nous avons bénéficié des données brutes collectées par le PADI/BF103. Ce dernier a déjà obtenu des données sur les paramètres hydrologiques et climatologiques ainsi que sur le prélèvement en eau au sein du réservoir. Néanmoins, des missions sur le terrain ont été réalisées pour reconnaître le site d'étude et pour collecter des éventuels compléments de données nécessaires pour le développement de l'outil WEAP. Les données collectées se répartissent en deux groupes : les variables au niveau de l'approvisionnement en eau et celles de la demande.

2.1. Variables du côté offre en eau

Des études se sont déroulées au niveau de la retenue de Kierma pour avoir des informations sur les paramètres ci-après.

Epaisseur et volume des sédiments

Les sédiments qui se déposent au fond de la retenue ont été mesurés par le procédé de carottage qui consiste à récupérer un volume (souvent un cylindre) de sédiment en place, c'est-à-dire en conservant l'intégrité et la position des différentes couches qui le composent. Les prélèvements ont été faits en février 2012 et février 2013. Ils ont été effectués à l'aide

d'un carottier de type « Peat Sampler » de chez Eijkelkamp qui permet de prélever des carottes de 50 cm. Sur les deux années de prélèvement, 108 carottes ont été prélevées et localisées au GPS au niveau de la retenue (cf annexe 4). Les carottes ont été analysées afin de déterminer la limite entre l'ancien sol et les sédiments fluviatiles qui se sont déposés et par là estimer l'épaisseur de ces sédiments. Différentes méthodes ont été retenues et combinées pour l'identification de cette limite (Rayons X, susceptibilité magnétique, pertes en matières organiques, granulométrie). Pour valider les mesures faites par ces méthodes de prélèvements, des études pédologiques ont été réalisées au niveau de la retenue pendant la période de tarissement de la retenue. Quatre fosses pédologiques (voir photo 1) ont été creusées sur une profondeur de 1,2m. Un échantillon de terre a été prélevé sur toute la hauteur de la fosse pour l'analyse. L'observation a montré que dans une période de 14 ans (1998 à 2012) 30 cm de sédiment se déposaient au fond de la retenue. Ce qui fait en moyenne 2.14 cm par an. L'analyse d'un grand nombre de carottes avec les différentes méthodes citées précédemment a été faite afin de pouvoir interpoler ces valeurs d'épaisseur de sédiments et de cuber les volumes en place.



Photo 1 : Fosse pédologique

Source : PADI, 2012

Capacité de stockage de la retenue

La capacité de stockage du réservoir a été évaluée à partir de la courbe Hauteur - Volume - Surface qui est obtenue à partir de mesures bathymétriques et la lecture d'échelle limnimétrique (PABIOT, 1999; BRUNEL & BOURON, 1992).

L'équipe du projet PADI/BF103 a notamment effectué une mesure bathymétrique le 22 Novembre 2012. Cette bathymétrie a permis de connaître la variation de la profondeur du lac (HINSCHBREGER, MALOUT, & BURHANUDDINS, 2003) dont la profondeur

maximum est environ de 4m. Un échosondeur de marque Humminbird modèle 798 SI a été utilisé. Le déplacement sur le plan d'eau a été fait par un bateau pneumatique de type Zodiac équipé d'un moteur thermique.

Pour connaître la variation de profondeurs de la retenue, un lecteur de mesure a été recruté par le PADI / BF103 afin d'effectuer des mesures bi-journalières au niveau des échelles limnimétriques installées par un ancien projet (PDFBK) au niveau de la digue du barrage de Kierma (cf photo 2). Cette lecture bi-journalière a commencé en septembre 2011. L'échelle est composée de quatre éléments de 1m qui sont fixés sur un IPN enfoncé dans le fond de la retenue de Kierma. Elle est disposée à quelques mètres de la digue du barrage afin d'éviter les risques de vandalisme, tout en permettant une lecture aisée. Signalons également qu'un limnigraphe de type Orpheus mini de chez OTT (voir photo 3) a été installée en avril 2013 pour un meilleur suivi du remplissage de la retenue.



Photo 2 : Echelle limnimétrique au niveau de la retenue de Kierma

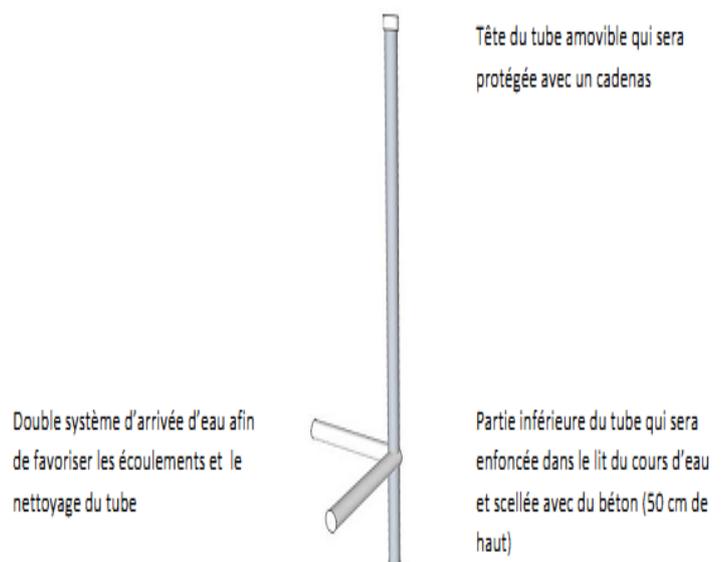
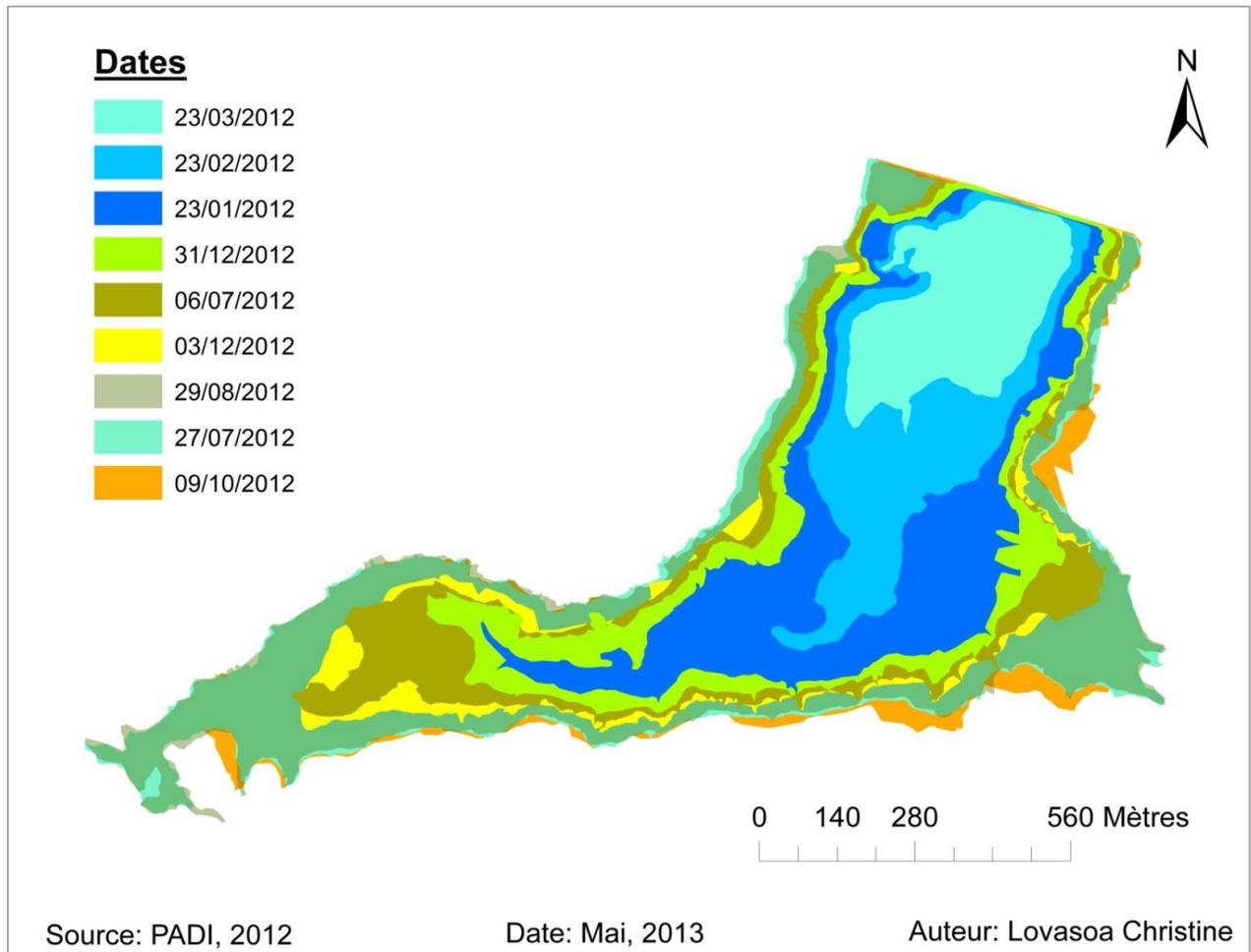


Photo 3 : Tube deux pouces dans lequel sera logé le limnigraphe OTT Orpheus Mini
Source : PADI, 2012

Les données de ces échelles nous ont permis de changer la profondeur de chaque point de la bathymétrie mesurée en Novembre en tenant compte la hauteur d'eau du mois considéré. Cette méthode nous a permis d'avoir la bathymétrie mensuelle du fond de la retenue. En plus, les agents ont fait de suivis mensuels surface en eau de la retenue à l'aide du GPS (cf carte2) depuis novembre 2011. Ces deux données (les points de la bathymétrie et la surface en eau

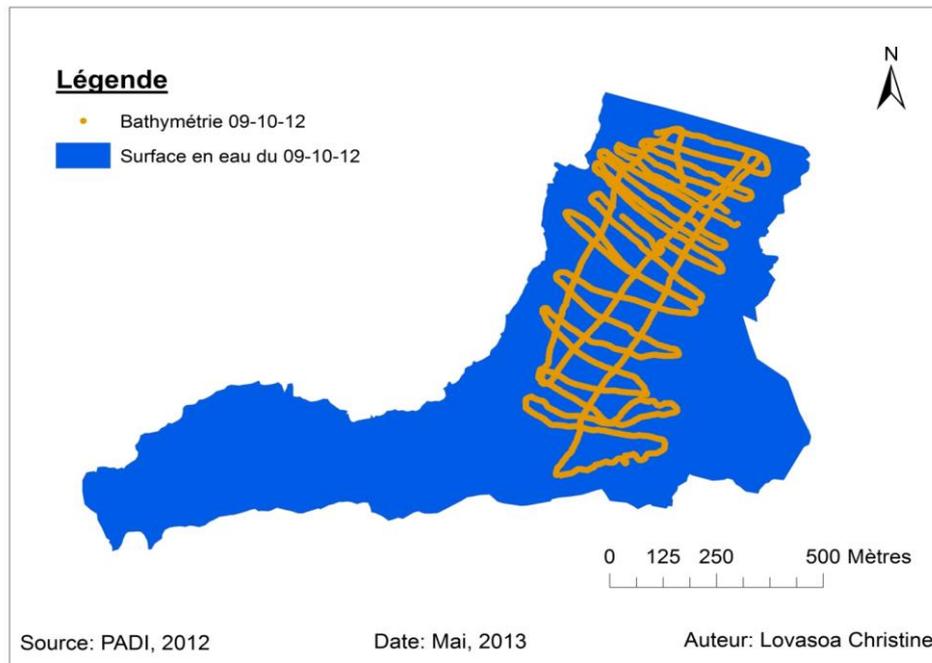
mensuelle) ont été introduites dans le logiciel ArcGis. Après avoir utilisé la fonction d'interpolation TIN dans ce logiciel, nous avons pu établir la carte bathymétrique mensuelle de la retenue de Kierma. Les paramètres hauteur-volume-surface ont été déduits à partir de cette carte en utilisant la fonction surface volume de l'extension 3D Analyst du logiciel ArcGis.



Carte 2 : Suivi mensuel de la surface en eau de la retenue de Kierma

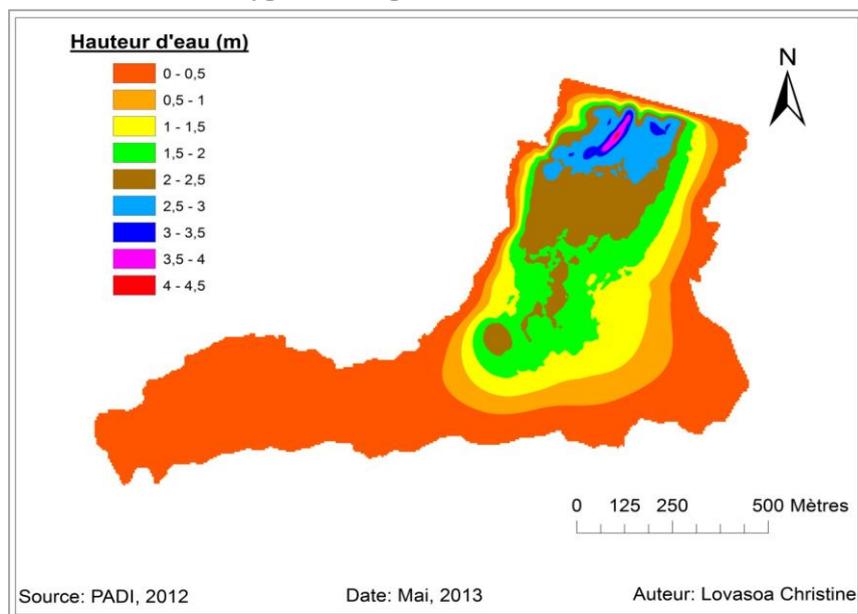
Pour illustrer la procédure du traitement, nous prendrons le cas de suivi du 09 Octobre 2012. L'échelle limnimétrique indique une hauteur d'eau à cette date de 3,52 m contre 3.11 m en date du 22 Novembre. Cela veut dire que la valeur de profondeur de chaque point de la bathymétrie du 09 Octobre 2012 augmente de 0,41m par rapport à la profondeur de chacun des points du 22 Novembre 2012 Ces points ont été combinés avec la surface en eau

de la retenue du 09 Octobre 2012. La carte 3 illustre la combinaison de ces données ainsi que la bathymétrie (cf carte 3) obtenue. Les cas des autres mois sont présentés en annexe 2.



Carte 3 : Superposition des données de la bathymétrie avec la surface en eau de la retenue de Kierma du 9 Octobre 2012

Une interpolation TIN a été faite avec cette carte et nous avons la variation de la profondeur du lac (cf carte 4). Ce type d'interpolation se trouve dans l'extension 3D Analyst.



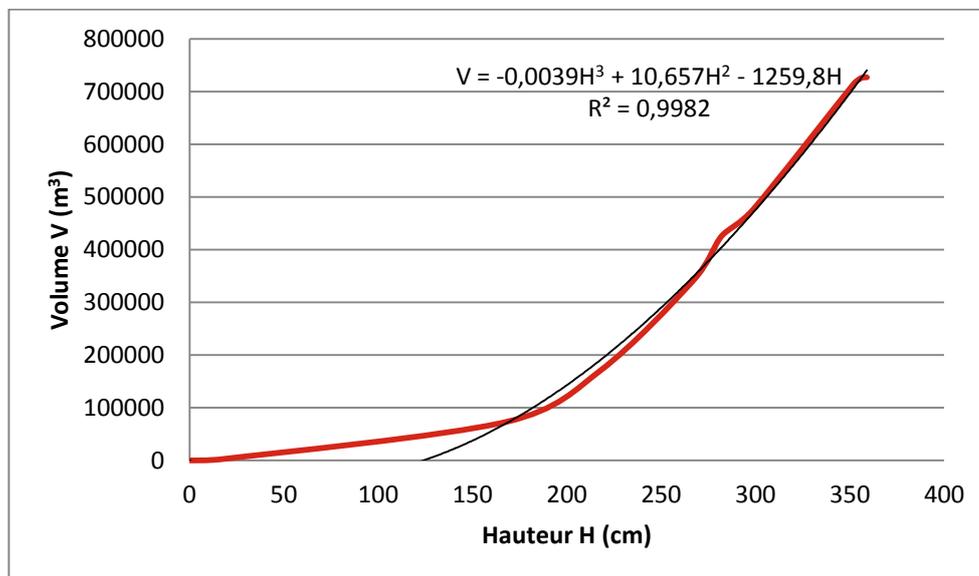
Carte 4 : carte bathymétrique de la retenue de Kierma du mois d'Octobre 2012

Le tableau 1 a été obtenu à partir de la carte des profondeurs en utilisant la fonction « surface –volume » dans l'onglet « fonctional surface » de l'extension « 3D Analyst ». Ce tableau est établi par la moyenne de variation de la hauteur du plan d'eau mensuel. La variation de plan d'eau de chaque mois est présentée dans l'annexe 5. A partir des cartes bathymétriques mensuelles, nous avons pu avoir le tableau 1 qui montre la relation hauteur, volume et surface de la retenue.

Tableau 1 : Hauteur, surface et volume de la retenue

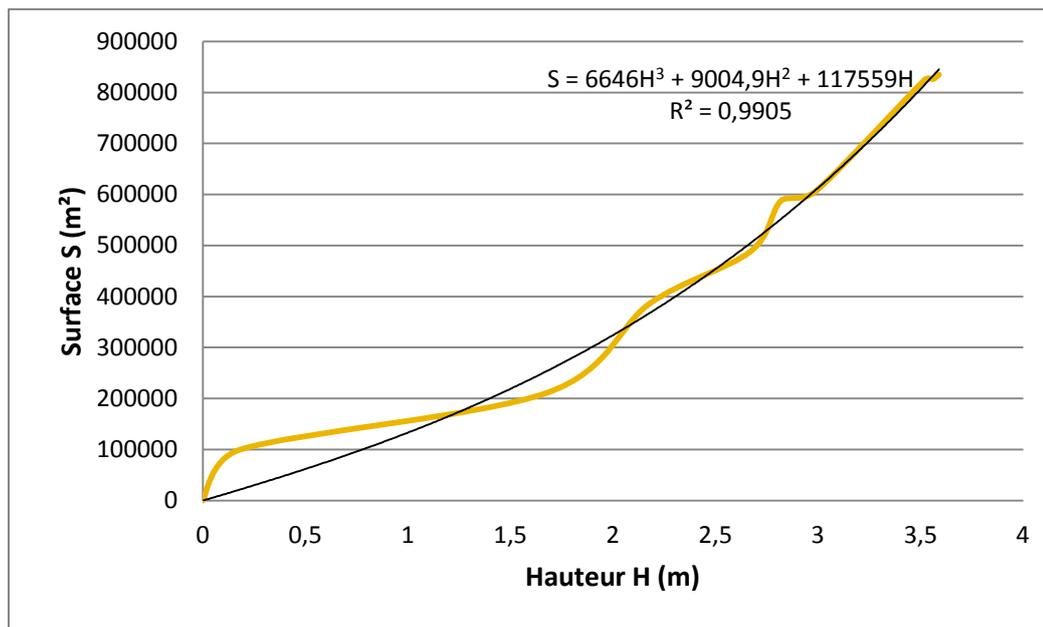
Dates	Hauteur lue (m)	Volume (m3)	Surface (m ²)
15/04/2012	0	0	0
30/05/2012	0	0	0
23/03/2012	0,18	2711	99811
23/02/2012	1,68	73233	211496
23/01/2012	2,18	171226	386450
31/12/2012	2,67	341512	488015
06/07/2012	2,82	425626	587682
03/12/2012	2,99	477154	606710
09/10/2012	3,52	714285	824650
29/08/2012	3,56	725468	825900
27/07/2012	3,59	726824	834693

La courbe hauteur-volume de la retenue de Kierma est présentée par le graphe 1.



Graphe 1 : Courbe Hauteur volume de la retenue de Kierma

La relation hauteur-surface est définie par l'équation et le graphe 2.



Graph 2 : Courbe Hauteur surface de la retenue de Kierma

Débit entrant au niveau du barrage

Le débit entrant dans le barrage a été estimé à l'aide d'un jaugeage. La méthode consiste à déterminer les débits à l'aide d'un moulinet à bord d'un Zodiac. Un seul jaugeage a été fait le jour du 05 Août 2012 suite au manque de moyen de transport pour faire la navette entre les différents sites d'études du PADI lors de la période de hautes eaux.

Précipitation à la surface de la retenue

Les averses journalières ont été mesurées à l'aide d'une série de (pluviomètre, en plastique noir de type Tipping Bucket, configuré à 0.2mm/impulsion, Ref. RG200 de chez Davis Instruments et enregistreur à impulsion, Tinytag TGPR-1201) Trois pluviographes ont été installés dans le bassin versant de Kierma dont un à proximité de la retenue. Ils comprennent un support en bois de 4 cm d'épaisseur fixé sur un pied métallique qui a été ancré dans le sol avec du béton et qui se trouve à 1,50 m du sol (*cf. photos 4*). Cette épaisseur du support en bois est exigée afin d'isoler le système magnétique du pluviographe avec tout objet métallique. Une construction en bois sous le support a été réalisée afin de loger l'enregistreur et éviter ainsi les risques de vol ou de vandalisme. Cette construction en bois possède une petite porte fermée avec un cadenas qui permettra d'accéder à l'enregistreur et de décharger périodiquement les données.

Il est à noter que les pluviographes sont contrôlés mensuellement afin de s'assurer que le pluviomètre n'est pas obstrué par des débris limitant ou empêchant les écoulements vers les auges basculeurs, ou tout autre problème.



Photo 4 : Pluviographe dans le bassin versant de Kierma

Source : PADI, 2012

Les précipitations mensuelles sont calculées en intégrant les différents événements pluvieux sur le mois. Les événements pluvieux ont été étudiés à l'aide du logiciel Hydraccess développé par l'IRD en tenant compte des critères suivants : le seuil d'intensité minimale de 10 mm.h⁻¹, une durée de séparation de 1 heure entre deux averses et un total minimum de pluie de 10 mm (*cf annexe 6*). Ces critères sont proposés par défaut par le logiciel. Le tableau 2 résume la précipitation mensuelle à la surface de la retenue de Kierma.

Tableau 2 : Précipitation mensuelle à Kierma pour l'année 2012

Mois	Janvier	Février	Mars.	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
P(mm)	0	0	0	0	14	82,8	157,4	161,4	251	0	0	0	667
S (m ²)	386450	211496	99811	0	0	825900	824650	824650	606710	488015	530177	428602	
Vp(m ³)	0	0	0	0	0	48778	131047	132970	206987	0	0	0	519781

2.2. Variables du côté prélèvement en eau

Deux types de prélèvement sont observés au niveau de la retenue de Kierma à savoir le prélèvement naturel par le phénomène d'évaporation et le prélèvement par les activités humaines comme l'irrigation et l'abreuvement de bétails.

Evaporation directe de la retenue

L'évaporation de la surface de la retenue est estimée à partir d'un bac d'évaporation (modèle ORSTOM). C'est une version modifiée du bac Colorado qui a été adoptée par le

service hydrologique de l'ORSTOM. La section est de 1 m² dans un carré de 1 mètre de côté. La hauteur totale est de 60 cm, le bac dépassant du sol de 10 cm (hauteur d'eau dans le bac : 50 cm) (PABIOT, 1999). Ce bac a été situé sur un sol nu et clôturé dans un même endroit qu'un abri météo muni d'un capteur (modèle EL_USB-2 de chez Lascar) d'humidité, de la température de l'air et de la précipitation (cf. photo 5). Les mesures au niveau du bac sont volumétriques : une pointe immobile retournée est fixée sur une traverse étroite fixé aux rebords, est calée au niveau normal de l'eau (10 cm sous le rebord). Ce niveau touche la pointe. La mesure de la hauteur d'eau évaporée est réalisée par des observations journalières qui consistent à évaluer le niveau d'eau dans le bac : si ce niveau diminue, on ajoute de l'eau avec une bouteille de 0,5 litre jusqu'à l'affleurement de la pointe. Dans le cas contraire, on enlève jusqu'à l'apparition de la pointe. Un demi-litre d'eau représente 0,5 mm d'évaporation. Deux observations sont effectuées chaque jour, à 06 heures du matin pour l'évaporation de la nuit et 18 h pour celle de la journée (cf. annexe 7). La mesure a été faite par les agents de terrain locaux qui ont reçus des formations en avance sur cette mesure.



Photo 5 : Abri météo clôturé avec le bac évaporateur

Source : PADI, 2012

Les données du bac évaporateur ont été ramenées au niveau du plan d'eau à l'aide de la relation entre l'évaporation de l'eau du bac (E_{bac}) et l'évaporation du lac (E_{lac}) (BRUNEL & BOURON, 1992) :

$$\frac{E_{lac}}{E_{bac}} = k$$

Avec :

k= coefficient de correction. D'après la revue littérature faite, sa valeur varie de 0.68 à 0.9 selon les conditions de mise en place et du type du bac. Pour le cas de ces travaux, la valeur de k choisi est égale à 0,8 (cf. annexe 8 pour les détails)

$$E_{bac} = P + \frac{10V}{S} \text{ (JACQUET, 2007)}$$

Où, E_{bac} : lame d'eau évaporée (en mm) ; P : lame d'eau précipitée (en mm) ; V : volume d'eau prélevé (compté négativement) ou ajouté (compté positivement) (en cm^3) ; S : surface évaporante (en cm^2). Le tableau 3 montre l'évaporation mensuelle ainsi que le volume d'eau perdu au niveau de la retenue de Kierma. Le volume d'eau évaporée (V) est obtenu par le produit de la surface mensuelle de la retenue avec l'évaporation mensuelle.

Tableau 3 : Evaporation directe de l'eau du bac

Mois	Janvier	Février	Mars.	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
E(mm)	205	218	276	267	235	126	128	132	116	169	180	200	2255
S (m^2)	386450	211496	99811	0	0	825900	824650	824650	606710	488015	530177	428602	
$V_E(m^3)$	79222	46106	27548	0	0	74636	106841	109845	95659	139366	109208	97603	886033

L'évaporation directe de cinq premiers provient de la littérature (cf. annexe 9) du fait du manque de données. Les autres données sont obtenues par le bac évaporateur.

Besoin en eau d'irrigation

Actuellement, les producteurs de Kierma exploitent environ 51 ha de la surface de la berge de la retenue. Ils pratiquent la culture maraîchère composée essentiellement de choux (35 %), oignons (29 %), aubergines (22 %), pastèques (11 %) et tomates (3 %). Les producteurs utilisent les motopompes comme moyen de prélèvement d'eau. La majorité de ces motopompes ont un débit maximal de pompage de l'ordre de $60m^3$ /heure selon la première enquête sur les moyens d'exhaure des producteurs. Cette enquête et son complément en Décembre 2011 avait dénombré 102 motopompes à Kierma. La campagne de maraichage se déroule durant la saison sèche. Durant cette saison, le volume d'eau annuel consommé par l'irrigation a été évalué à partir de la somme de volume d'eau mensuel prélevé. Des informations sur les moyens d'exhaures (débit d'eau prélevée par la motopompe) et les pratiques d'irrigation (durée d'irrigation, nombre d'irrigation par semaine) ont été collectées à l'aide des enquêtes (voir annexe10, 11 et 12 pour les fiches d'enquêtes). Selon les suivis décennaires faits, le débit moyen d'eau prélevée par la motopompe est de 7 litre/seconde par décennie avec une durée moyenne d'irrigation de 7h (cf annexe13) au près des producteurs pour

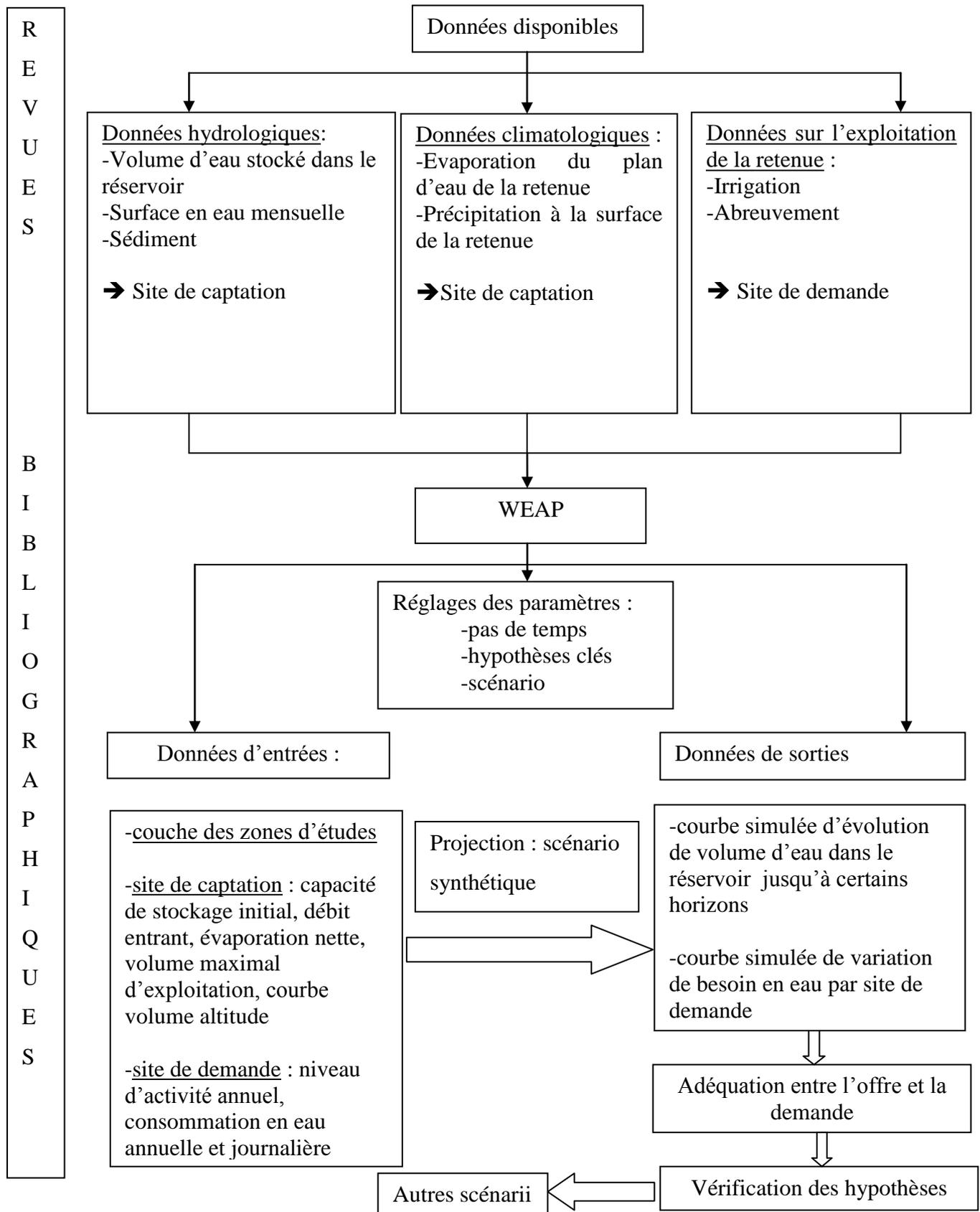
avoir le volume d'eau mensuel prélevé. D'après le calendrier d'irrigation (cf annexe 14), le débit prélevé par les producteurs pour l'année 2012 pendant la saison sèche s'élève jusqu'à 15 m³/s qui correspond à 356715 m³ d'eau.

Besoin en eau pour les bétails

Des suivis de l'abreuvement du bétail ont été commencés en février 2013 au niveau de la retenue de Kierma à l'aide d'enquêtes supervisées par les agents locaux du PADI / BF103 (cf annexe15 pour le fiche d'enquête). Le nombre total du bétail qui utilise la retenue de Kierma est d'environ 55300 têtes. Les types des animaux y rencontrés sont : les ânes, les bœufs, les moutons et les chèvres. Les bœufs sont en plus grands effectifs (73%) suivi des moutons et des chèvres (21%) et d'ânes en dernier lieu avec un taux de 6%. Les besoins en eau annuel de tous les bétails ont été calculés par le produit du nombre de tête de chaque type de bétails avec son besoin en eau théorique en considérant une consommation de 38l/j pour les bœufs, 17 l/j pour les ânes et 7l/j pour les moutons et les chèvres (WARD & MCKAGUE, 2007). Le volume d'eau prélevé par les bétails est très faible 1676 m³.

Toutes ces données ont été introduites dans WEAP selon le schéma ci-après.

3. Schéma récapitulatif de l'utilisation des données dans WEAP

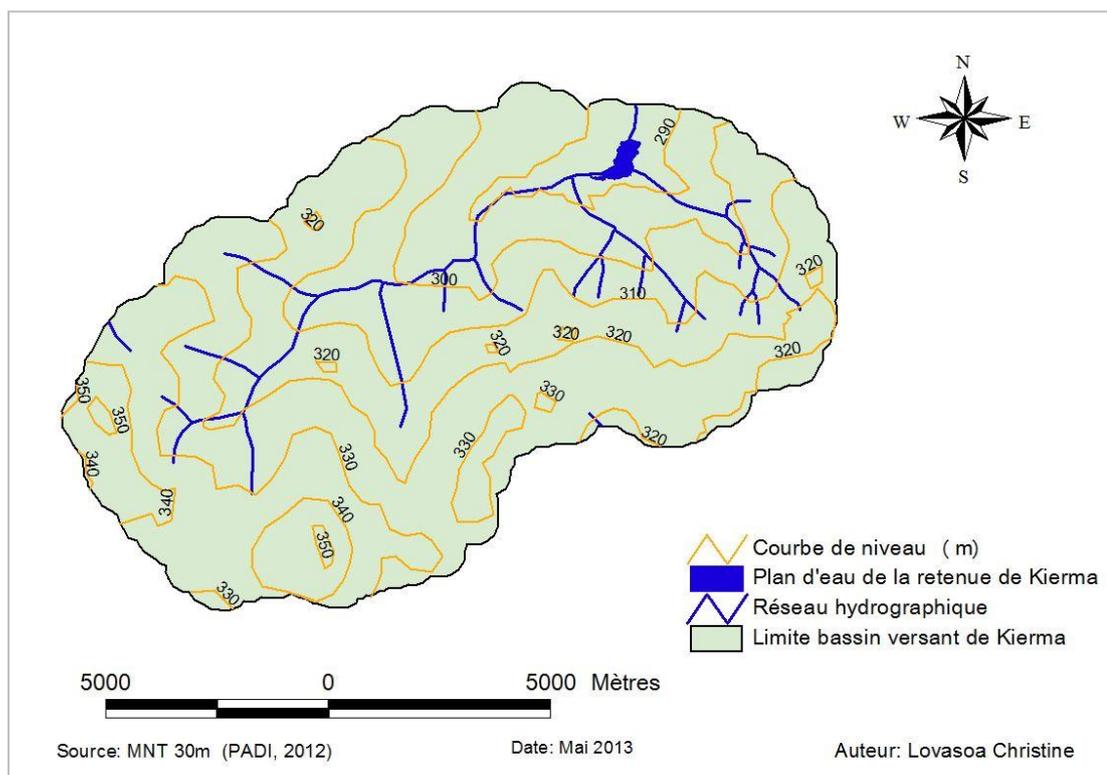


4. Application du modèle WEAP a la retenue de Kierma sur la base des données collectées ou simulées

4.1. Caractéristiques de la retenue de Kierma

Caractéristiques physiques du bassin versant de la retenue de Kierma

Le bassin versant de Kierma a une superficie de 99,28 km² et un périmètre de 48,5 km. Son indice de compacité Kc est égal à 1,36. L'altitude maximale, moyenne et minimale est respectivement 355m, 317 m et 290m (carte 5). Sa pente moyenne est de 1,57%. Sa dénivelée spécifique est 24,21 m. La longueur de rectangle équivalent est de 15,63 km (cf annexe 16 pour la note de calcul). Toutes ses informations sont obtenues à partir de l'analyse de la carte topographique suivante :



Carte 5 : carte topographique du bassin versant de Kierma

Caractéristiques physiques de la retenue de Kierma

Un barrage est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau et destiné à en retenir l'eau. La retenue de Kierma est un barrage poids en terre. Elle avait un volume initial de la retenue au déversement de 760 000 m³ en 1998. Actuellement, ce volume a diminué jusqu'à 744 753 m³ qui correspond au volume d'eau stocké à la cote normale de la retenue 3,6m (cote du déversoir). A ce même niveau, la surface en eau s'élève à 849 992. Le déversoir

est linéaire et de forme rectangulaire. Le niveau inférieur est de 0 m, il n'y a plus d'eau stockée à ce niveau. L'année dernière, ce barrage a eu un volume entrant de 3 132 795 m³ et un volume sortant 652 682 m³ (cf annexe 17 pour la note de calcul). L'hydrogramme de crue observé sur cette même année montre un débit entrant (Qc) maximum de 8 m³/s et de débit déversé (Qe) maximum de 2 m³/s (cf annexe 17 pour les détails):

Dans WEAP, quatre zones devraient être distinguées pour étudier une retenue à savoir : la zone de contrôle des eaux, la zone de conservation, la zone tampon et la zone inactive (cf figure 1). Pour la retenue de Kierma, le sommet de conservation se trouve à 3,6 m de la retenue donc le volume d'eau stocké à ce niveau correspond au celui à la limite du niveau de déversoir. La zone tampon se confond avec la zone inactive car nous avons un cas de petit barrage.

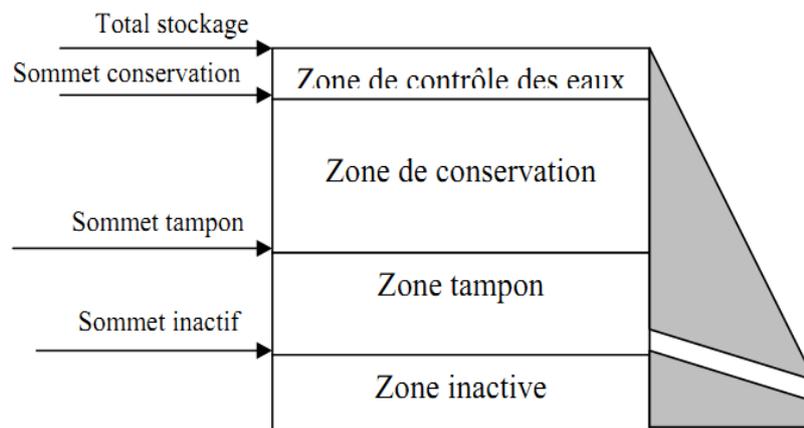


Figure 1 : Différente zone de la retenue utile pour la modélisation avec WEAP

Source : SEI, 2008

4.2. Modélisation sur WEAP

Importation des couches

Pour le cas de Kierma, trois couches sont ajoutées pour former le milieu d'étude. Il s'agit la couche du bassin versant où il y a la retenue, la retenue et les cours d'eau qui l'alimentent. Ces couches sont délimitées à l'aide de logiciel de traitement cartographique ArcGis avant de les importer dans WEAP (cf figure 2)

Mise en place des objets

Nous avons placé deux fois l'objet nommé « site de demande » (rond coloré en rouge) car nous avons deux types de prélèvement au niveau de la retenue à savoir : l'irrigation et

l'abreuvement du bétail. Pour le site de captation, nous avons choisi l'objet « retenue » (triangle coloré en vert) et la « rivière » nommé ici « Kierma River ». Pour connecter ces deux types d'objet, nous relient le site de demande à sa source d'eau avec des objets « flèche » en vert nommés « les liaisons de transmission » (cf figure 2). Cette action permet de mettre en évidence la quantité d'eau prélevée par chaque site de demande au niveau de la retenue. Ainsi, elle donne des informations sur la satisfaction de la demande en eau ou le taux de recouvrement de chaque site.

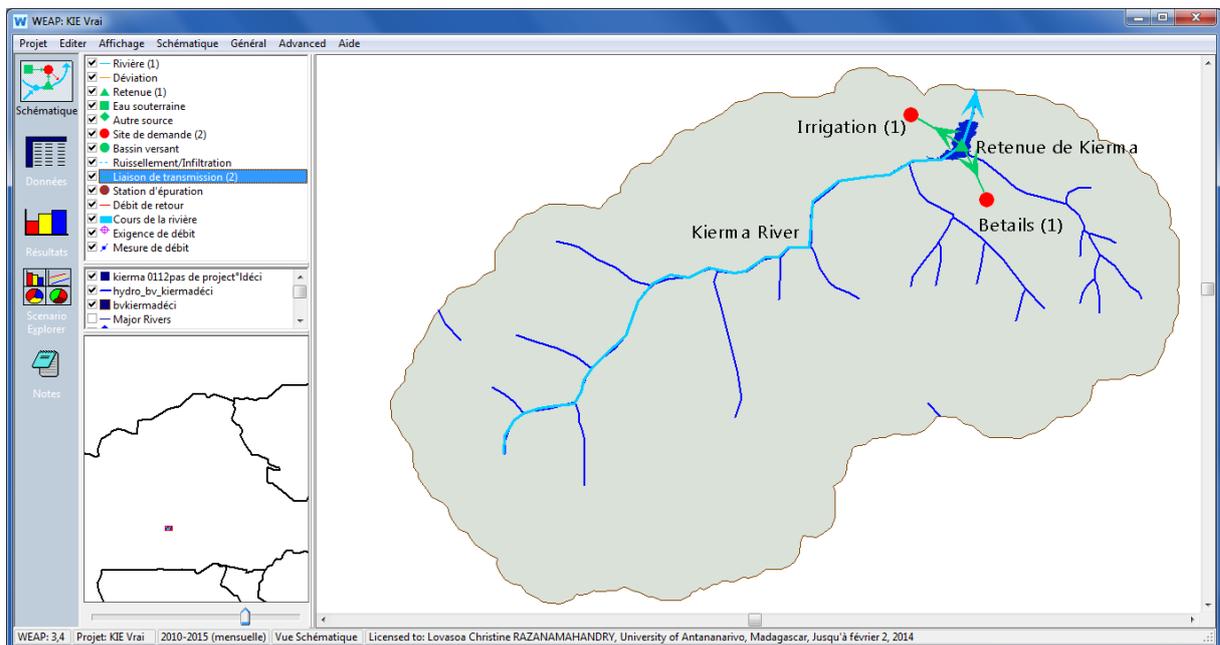


Figure 2 : Les couches de la zone d'étude, la source et les sites de demande

Réglage des paramètres généraux :

- **Période de simulation, pas de temps, unités**

En tenant compte des hypothèses de recherche établies au départ, nous avons choisi l'intervalle de temps de 2012 à 2040 comme période de simulation. Le pas de temps utilisé est mensuel (Janvier 2012 à Décembre 2040). Dans WEAP, la modification pour configurer l'option « mois calendaire » se fait au niveau du menu principal « General » et « Année et pas de temps ». Toujours dans le menu « Général », un onglet « unité » a été utilisé pour entrer les unités de mesure de chaque variable. Nous avons changé les unités de la capacité de stockage en m³ au lieu de million m³ qui est une unité proposé par défaut dans le logiciel. Pour le reste des variables, nous avons gardé les unités par défaut soit au niveau de la retenue ou au niveau de la demande.

- **Hypothèses clés**

La vue « données » a été utilisée pour introduire les hypothèses clés. Nous avons pris les hypothèses clés suivantes :

- Volume annuel de sédiment: 9478 m³
- Besoin en eau d'irrigation: 356715 m³
- Besoin en eau de bétails: 1676 m³

Le volume annuel de sédiment influe sur la capacité de stockage de la retenue. Il correspond au volume d'eau annuel perdu dû au dépôt de sédiment. Le taux annuel de sédiment est égal à 2 cm par an environ. Supposons que ce taux va diminuer de 2% le volume d'eau annuel stocké dans le réservoir.

Les deux autres hypothèses clés influent sur les sites de demande. Pour le besoin unitaire en eau, il est connu à partir du rapport entre le volume d'eau total prélevé et la surface totale irriguée. Pour le bétail, le besoin en eau unitaire est obtenu par la relation entre le volume d'eau total consommé et le nombre total de têtes de bétail.

- **Scénarii**

Notre période de simulation s'étale entre 2012 à 2040. Ainsi, nous avons deux scénarios par défaut nommé « Compte actuel (2012) » et « référence (2013-2014) ». Le scénario « référence (2013-2040) » est hérité du scénario de compte actuel (2012) qui constitue le scénario principal de l'analyse des données. En tenant compte des changements possibles qui vont apparaître jusqu'à l'horizon de 2040, nous avons considéré les scénarios suivants en déduction du scénario référence :

- *Apport de sédiment annuel constant*
- *Augmentation du volume d'eau demandé par l'irrigation* (de 5% à 8% par an)
- *Augmentation du volume d'eau demandé par les bétails*

Le taux actuel d'extension des superficies des terres irriguées est de 5% par an. Le volume d'eau demandé pour l'irrigation dans le scénario référence correspond à ce taux. Maintenant dans le scénario considéré ci-dessus, nous avons ajouté le taux de 3% pour avoir un taux de 8% par an. Le choix de ce taux s'explique par l'extension de la surface irriguée suite à l'accroissement de la population. Le taux moyen d'accroissement démographique au Burkina Faso est de 3,1% (UNFPA, 2012). Nous avons choisi un volume annuel constant pour les sédiments car nous n'avons pas d'information qui pourrait nous dire que ce taux

risque d'augmenter dans l'avenir. Pour le bétail, les demandes en eau augmentent en fonction de leur taux d'accroissement. Le tableau 4 montre le taux d'accroissement moyen annuel de chaque type de bétails :

Tableau 4 : Taux d'accroissement moyen annuel de chaque type de bétails

Bétails	Bovins	Ovins	Caprins	Asiniens
Taux de croissance	4,7%	2,3%	3,3%	6%

(YAMEOGO, 2006)

La variation climatique est aussi un facteur influençant les scénarii pour les années futures. Elle est prise en compte en utilisant la fonction « Step » incluse dans WEAP. Cette fonction permet de répartir le taux de variation des variables climatiques qui influent sur le volume d'eau stocké dans le réservoir pour chaque prochaine année. D'après les revues bibliographiques faites, l'évaporation au Burkina Faso est de 2m /an (BEM 2008) ; la précipitation va diminuer de 7,3% à l'horizon de 2050 par rapport à l'année 2006 (PANA Burkina Faso, 2007).

Du côté de la planification de la ressource, deux scénarii ont été envisagés. Nous avons appelé ces scénarii « scénarii prospectifs ». Le premier est nommé « *Besoin en eau théorique des cultures* » qui nous permet d'étudier l'état du prélèvement d'eau pour l'irrigation en se basant sur les besoins en eau théorique de chaque type de culture, mais non plus sur le volume d'eau réel prélevé actuellement. Le deuxième est nommé « *Irrigation goutte à goutte* » c'est-à-dire, nous avons analysé le système en cherchant un autre moyen d'exhaure plus efficient à la place de la motopompe. D'autres scénarios sont encore envisagés mais nous allons les voir dans la partie recommandation.

Ces deux scénarios découlent tous deux de la référence. Ils ont été introduits dans la vue « Données », menu « Gérer les scénarios ».

La figure 3 suivante montre l'arbre des scénarios établis :

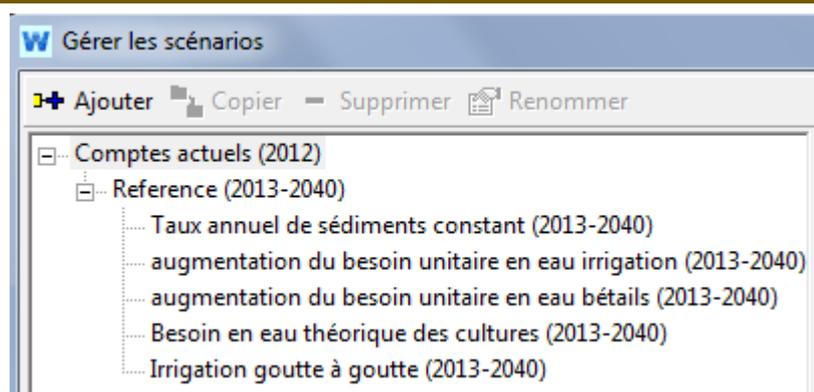


Figure 3 : Arbre des scénarios

Source : Logiciel WEAP

Introduction des données

- **Site de captation**

Dans la vue des données WEAP, la retenue de Kierma se trouve dans le volet distribution et ressources. Chaque paramètre utile cité précédemment au niveau de cette retenue possède sa propre case à compléter une fois qu'on clique sur la retenue de Kierma.

✓ **Capacité de stockage - stockage initial – Volume observé**

La retenue de Kierma a une capacité de stockage actuel de 744 753 m³. Son stockage initial correspond au volume d'eau du mois de Janvier de l'année 2012 qui est égal à 171226 m³. Pour celle des autres mois, elle correspond au volume d'eau observé mensuellement (V) au niveau de la retenue (cf tableau 5). Elles sont obtenues à partir de la carte bathymétrique mensuelle (cf annexe 5).

Tableau 5 : Volume d'eau observé mensuellement au niveau de la retenue (Année 2012)

Mois	Janv.	Fév.	Mar.	Juin.	Juil.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
V (m3)	171226	73233	2711	425626	726824	725468	719877	714285	477154	341512

Toutes ces données ont été introduites dans le scénario de compte actuel. Pour les variations mensuelles comme le volume mensuel, nous avons utilisé « l'assistant série mensuel » pour les introduire dans la case du volume observé. Dans le scénario référence, nous avons mis l'évolution de la capacité de stockage de la retenue (cf tableau 7) en tenant compte du volume de sédiment annuel de 9 478 m³ (cf tableau 6) calculé à partir des données du tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 : Volume de sédiment

(1) épaisseur moyenne des sédiments (1998 - 2012)	(2) Surface en eau moyenne en 2012	(3) Volume de sédiment (14 ans) (3)= (1) * (2)	(4) Volume de sédiment (4)=(3)/14
30	422 310	132 693	9 478

Tableau 7 : Capacité de stockage de la retenue pour quelques années futures

Années	Volume stocké (m3)	Volume des sédiments annuels (m3)
2012	744753	9478
2017	697363	47390
2022	649972	94781
2027	602582	142171
2032	555192	189561
2040	479367	265386

Les données pour les autres scénarios sont présentées dans l'annexe 18

✓ ***Débit sortant maximum dû à des contraintes***

En aval de la retenue de Kierma, il y a aussi des aménagements pour des cultures. L'approvisionnement en eau de ces cultures se fait toujours avec la motopompe. Les producteurs utilisent de longue conduite traversant la digue pour transporter l'eau tirée par la motopompe. Cela signifie que la retenue de Kierma n'a pas de vanne utilisée pour arroser les cultures en aval. Donc, il n'y a pas de valeur de débit sortant maximum.

✓ ***Infiltration***

L'infiltration au niveau de la retenue est très faible car la couche au fond du réservoir est formée par des argiles colloïdales qui ont de perméabilité de 10^{-8} à 10^{-10} cm/s (SCHOELLER, 1962 in (KOÏTA, 2012)). Cette perméabilité est inférieure à 10^{-4} cm/s donc, elle est considérée comme nulle (GUEYE, 2012).

✓ ***Evaporation nette***

Une formule est établie par défaut dans WEAP pour calculer l'évaporation nette d'une retenue. Elle est obtenue par la différence entre l'évaporation directe et la précipitation à la surface du réservoir (Tableau 8). Le volume d'eau évaporé figuré dans le tableau ci-dessous est obtenu par le produit de l'évaporation nette mensuelle avec la surface en eau de la retenue mensuelle.

Tableau 8 : Evaporation nette mensuelle de la retenue pour l'année 2012

Mois	Janvier	Février	Mars.	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
$V_E(m^3)$	79222	46106	27548	0	0	74636	106841	109845	95659	139366	109208	97603	886033
$V_p(m^3)$	0	0	0	0	0	48778	131047	132970	206987	0	0	0	519781
$V_n(m^3)$	79222	46106	27548			25858	-24206	-23125	-111328	139366	109208	97603	366252

Les valeurs négatives signifient qu'il y a un apport en eau et dans le cas contraire, il y a une perte en eau. Le gain en eau s'étale seulement en 3 mois sur 12 malgré la saison pluvieuse de 4 mois.

✓ **Débits entrants**

Nous n'avons pas pu exploiter les données provenant du jaugeage fait par les agents du terrain du PADI car il n'y a qu'une seule valeur obtenue (*cf annexe 19*), en raison des difficultés de déplacement des agents chargés du jaugeage. Ainsi, les débits entrants sont estimés à partir du débit de la crue au niveau du barrage. Pour l'année courant 2012, nous avons utilisé l'hydrogramme de crue de cette même année pour l'estimer (*cf annexe 16* pour la note de calcul) et nous avons obtenu un débit de crue moyen de 1,43 m³/s pendant 25 jours de crue. Pour les années à venir nous avons choisi la méthode d'analyse fréquentielle (*cf annexe 20*) (COMPAORE, 1996) (KARAMBIRI & NIANG, 2010) à partir de données de pluie de la station de Kombissiri depuis l'année 1972 à 2012. L'analyse montre qu'il n'y aura pas de grand changement de débit entrant au niveau de la retenue car les valeurs calculées tournent autour de 1 m³/s (*cf annexe 20*).

- **Site de demande**

- ✓ **Irrigation**

Le niveau d'activité annuel pour l'irrigation est formé par la surface cultivée qui s'élève jusqu'à 51 ha pour l'année 2012 dont 11ha occupée par l'aubergine, 18ha par le chou, 15ha pour l'oignon, 6ha pour la pastèque et 1ha pour les tomates. La consommation d'eau annuelle est de 6994 m³/ha. La projection pour les années futures est présentée par le tableau 9 dont le premier concerne au scénario de référence (taux de 5%) et le second concerne le scénario d'augmentation de besoin en eau d'irrigation (taux de 8%).

Tableau 9 : Caractéristiques du site de demande « Irrigation » (scénario référence)

Années	Volume d'eau prélevée (m3)	surface (ha)
2012	356715	51
2017	445894	64
2022	535073	77
2027	624251	89
2032	713430	102
2040	856116	122

✓ *Abreuvement*

Pour le cas du bétail, le nombre de tête va former le niveau d'activité annuelle. Le volume d'eau consommé est obtenu en considérant le besoin en eau théorique de 38l/j pour les bœufs, 17l/j pour les ânes et 7 l/j pour les moutons et les chèvres (WARD & MCKAGUE, 2007). Ces volumes sont montrés par le tableau 10.

Tableau 10 : Caractéristiques du site de demande « Bétails » pour le scénario référence

Années	Nombre de tête	Volume d'eau consommé (m ³)
2012	55299	1676
2017	67435	2066
2022	79572	2456
2027	91709	2846
2032	103845	3236
2040	123264	3860

Voir *annexe 17* pour les caractéristiques de site de demande pour les autres scénarios.

Ces données sont introduites dans l'outil WEAP en utilisant la fonction « interpolation linéaire » dans la menu déroulant en choisissant l' « assistant série annuel » pour connaître l'évolution annuelle.

- **Liaison de transmission**

La liaison de transmission est marquée par les objets en flèches vertes (*cf. figure 2*). Nous avons deux liaisons. Ces flèches signifient que des prélèvements sont effectués.

Il n'y a pas de débit de retour. Cette liaison est établie à partir du bilan hydrique au niveau de la retenue qui découle de l'application du principe de la conservation des volumes d'eau. Elle s'écrit sous sa forme la plus complète:

$$dV = Vec + Vp - (Vev + Vid + Vif + Vd + Vu)$$

(NORD, 2004)

avec, durant l'intervalle de temps dt :

dV : la variation du stock dans la retenue ;

Vec : les apports en provenance des tributaires ;

Vp : les apports dû aux précipitations tombant directement sur la retenue ;

Vev : le volume d'eau évaporée ;

Vid les pertes par infiltration à hauteur du barrage ;

Vif les pertes par infiltration dans le fond de la retenue;

Vd le volume d'eau sortant de la retenue par déversement ;

Vu le volume d'eau prélevée pour divers usages

Sa forme réduite est : $\text{Apport} - \text{perte} = \text{stock}$

Le tableau 11 résume ce bilan pour le cas de la retenue de Kierma en 2012 :

Tableau 11 : Bilan hydrique de la retenue de Kierma en 2012

	Volume (m ³)
stock	744 753
perte:	
Irrigation	356715
Bétaïls	1676
Evaporation directe	886033
Déversement	652682
total perte	1 877 106
Apport:	
Précipitation	519 781
stock+ perte	2 641 859
total apport	3 161 640

IV. RESULTATS

1. Evaluation des ressources en eau

Dans cette partie, nous allons voir l'état d'évolution de volume d'eau du côté de l'offre et du celui de la demande.

1.1. Quantité d'eau disponible au niveau de la retenue à l'horizon 2040

La figure 4 ci-dessous est l'un des résultats de traitement par WEAP. Elle montre à la fois la courbe simulée et observée du volume d'eau disponible dans la retenue sous l'effet combiné de la sédimentation et d'évaporation nette. La quantité d'eau disponible diminue au fur à mesure que les années avancent. Nous avons constaté que son pas de diminution est très faible car en 2040, elle n'atteint même pas 50% de sa capacité de stockage initiale (en 2012). A l'horizon des années 2022 et 2032, le volume d'eau disponible sera respectivement 627 872 m³ et 533 092 m³. Ces taux très bas sont du à la considération d'un scénario « Taux annuel de sédiments constant ».

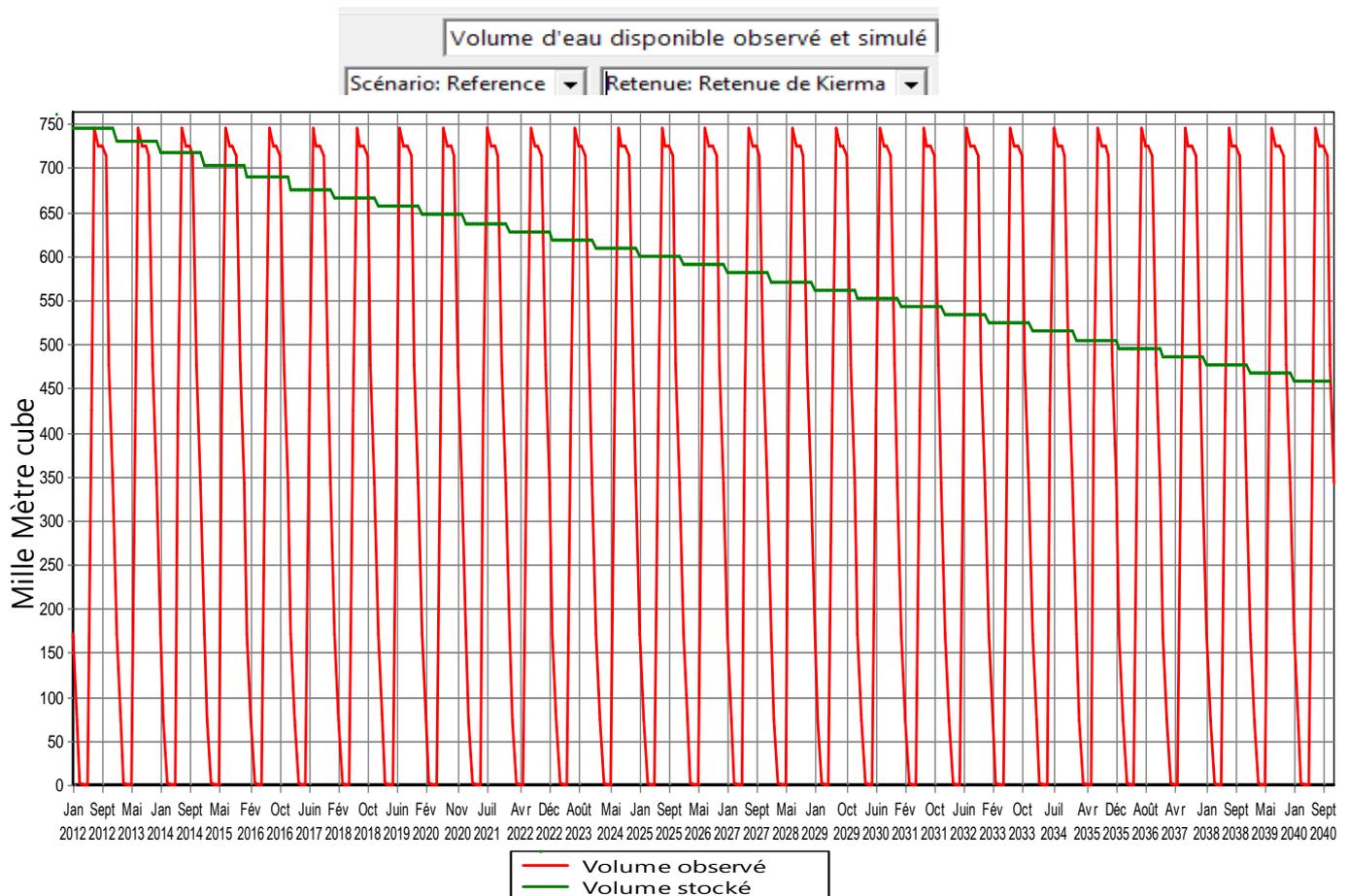


Figure 4 : Evolution de la capacité de stockage de la retenue

1.2. Evolution future de besoin en eau de chaque site de demande

Irrigation

Les deux graphes (*figure 5*) ci-dessous ont pour objectif de montrer la variation entre la courbe d'évolution de volume d'eau prélevé observée avec celle de volume d'eau simulée. D'après ces deux courbes on constate que : dans les dix années à venir la demande en eau de l'irrigation va s'augmenter jusqu'à 535 073 m³ pour le scénario de « *référence* ». Pour le scénario « *accroissement du besoin en eau en irrigation* », elle s'élève jusqu'à 642 087 m³ dans ce même horizon d'année. Si nous regardons la capacité de stockage maximale de la retenue en 2022, nous remarquons que le besoin en eau d'irrigation montré par le scénario de référence est inférieur au volume d'eau disponible pendant cette même année. Contrairement au deuxième scénario qui montre que ce besoin dépasse la capacité de stockage en 2022 avec un taux de 2%. Le coefficient de Nash (BERTERRECHE & CHAMPREDONDE, 2008) ; (BELLIER, 2008) calculé à partir de ces deux modèles a montré une valeur de 0,99. Comme ce coefficient est proche de 1 donc, nous pouvons dire que le modèle est admissible (*cf annexe 21* pour la note de calcul).

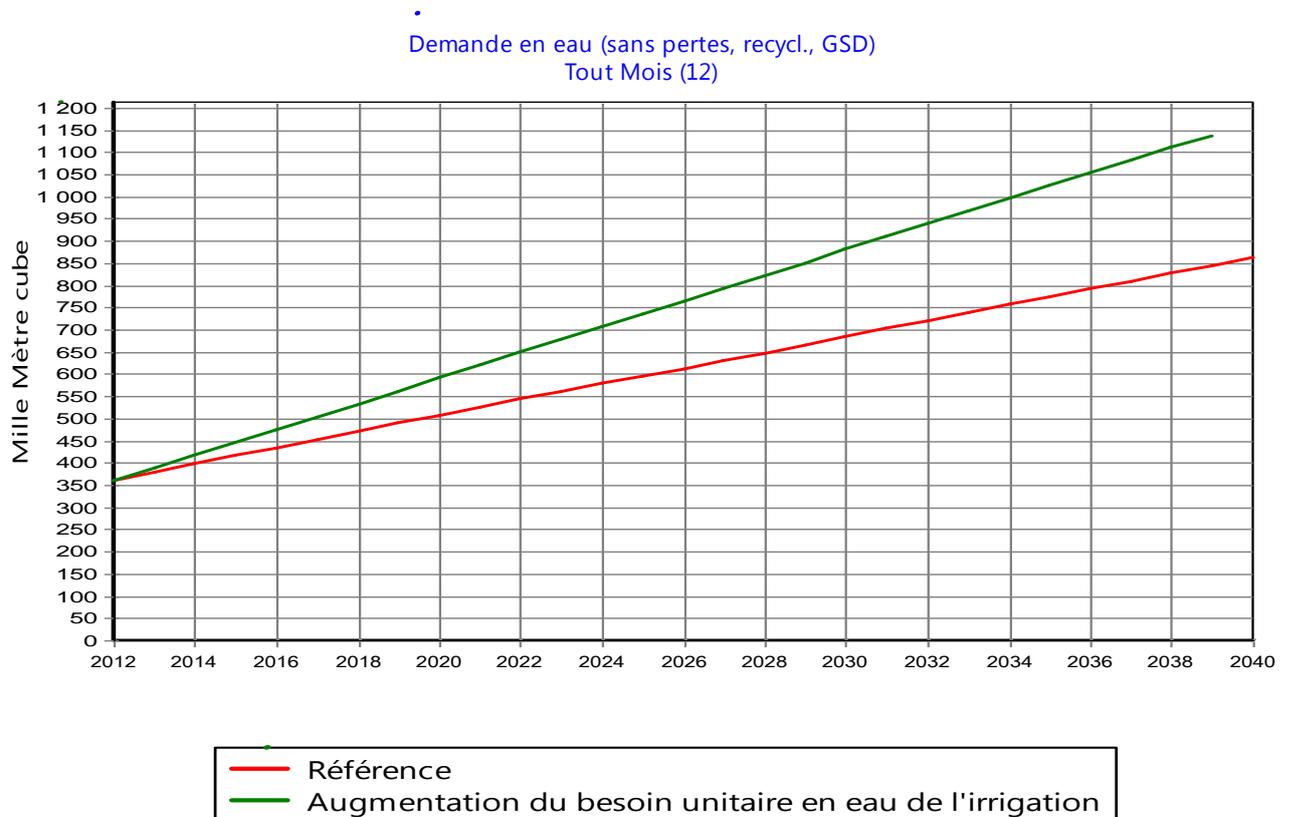


Figure 5 : Evolution du besoin en eau d'irrigation jusqu'en 2040

Abreuvement

La figure n°6 ci-après montre que la consommation en eau pour l'abreuvement du bétail augmente aussi au fil des années mais avec une quantité faible. Elle s'avère insignifiante devant le volume prélevé pour l'irrigation. En 2022, le scénario référence montre que 2456 m³ d'eau seront consommé par les bétails tandis que l'autre scénario donne une valeur de 2677 m³. Pour les deux scénarios, le volume d'eau maximal consommé représente 0,5% seulement du volume d'eau disponible dans cette retenue à la même année. La retenue sert principalement à alimenter les besoins en en eau d'irrigation mais pas au bétail. D'après le critère de Nash, ce modèle a un coefficient de 0,99 qui est très proche de 1 (cf annexe 21 pour la note de calcul). Donc, il est aussi valable.

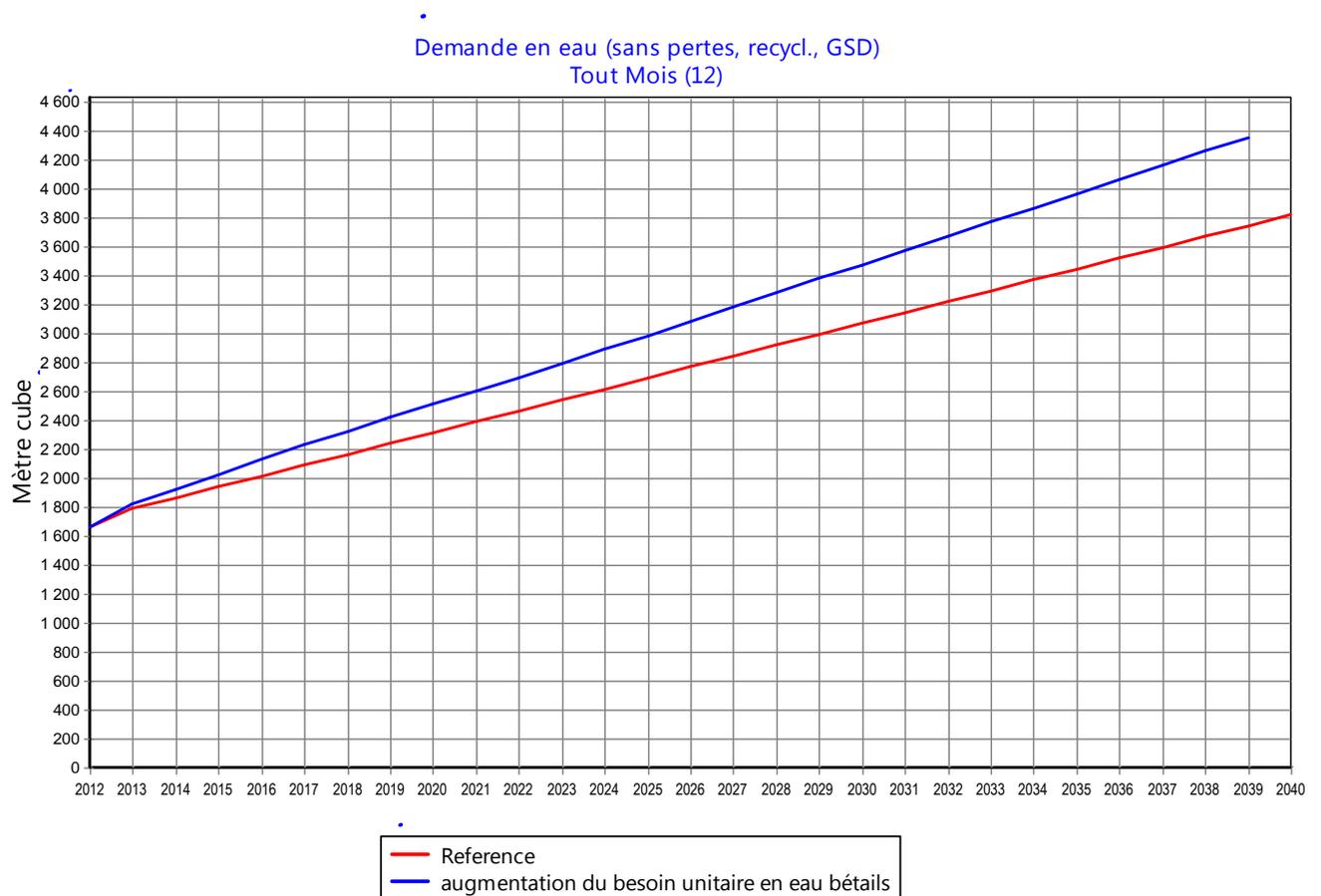


Figure 6 : Evolution du besoin en eau pour les bétails jusqu'en 2040

1.3. Adéquation entre l'offre et la demande

Nous avons vu par les graphes précédents les évolutions futures de quantité d'eau disponible et demandée jusqu'à 2040. Maintenant, nous allons confronter les courbes d'évolutions de demande et d'offre en eau. Le but est de connaître le temps limite où la retenue n'arrive plus à satisfaire aux besoins de différents usages.

La figure 7 montre à la fois la courbe de décroissance de volume d'eau disponible dans la retenue et la courbe de croissance de différentes demandes.

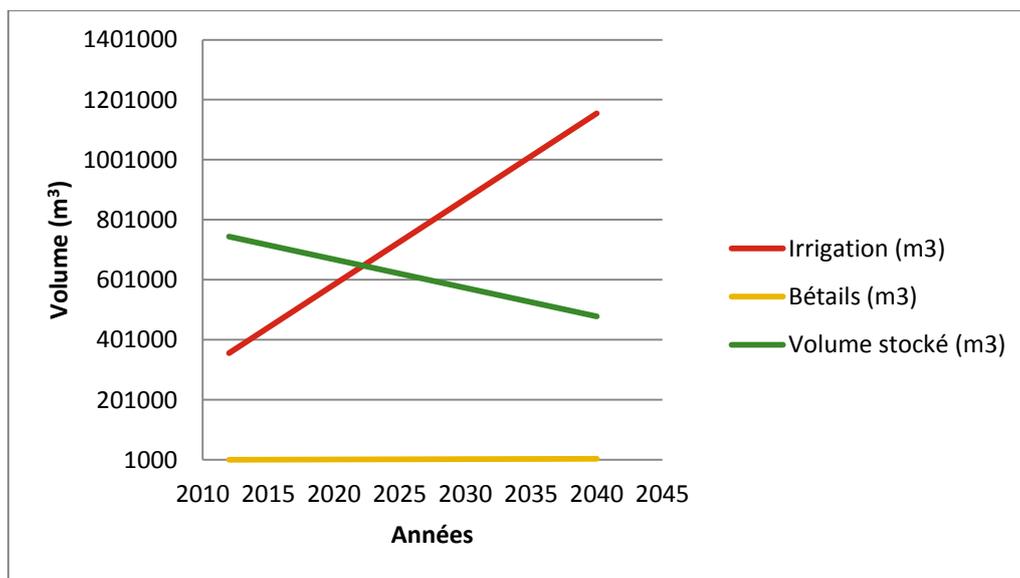


Figure 7 : Evolution de l'offre et la demande en eau au niveau de la retenue de Kierma

Cette figure montre tout à fait la loi entre l'offre et la demande, c'est-à-dire la demande augmente plus que l'offre. Pour les années 2022 et 2032, le volume d'eau disponible dans la retenue est respectivement égal à 627 872 m³ et 533 092 m³. Pourtant, le total de la demande en eau se monte jusqu'à 644 764 m³ à l'horizon de 2022.

Même si la demande en eau de bétails s'augmente, elle est toujours satisfaite par l'eau disponible dans la retenue quelque soit la saison car elle est très faible par rapport à celle de l'irrigation.

2. Planification des ressources en eau

Nous avons vu le problème d'inadéquation entre l'offre en eau par la retenue de Kierma et la demande dans quelques années. Des scénarios principaux sont proposés pour mieux gérer la ressource en eau de cette retenue. Ces scénarios sont toujours testés avec l'outil WEAP. Comme l'irrigation consomme plus d'eau que l'abreuvement, donc pour

mieux planifier la ressource en eau de la retenue hydro-agricole de Kierma, nous avons agi par rapport au mode de prélèvement d'eau pour l'irrigation en diminuant le débit prélevé (1) soit par la considération des *besoins en eau théorique des différentes cultures* (2) soit par le choix d'*irrigation goutte à goutte*. Comme le barrage déverse chaque année donc nous avons envisagé de faire un (3) *rehaussement du barrage* pour pouvoir stocker un grand volume d'eau. Des moyens antiérosifs sont aussi à recommander afin de (4) *diminuer le taux de dépôt de sédiment à 50%*.

1.1. Besoin en eau théorique des cultures

Le volume d'eau théorique demandé par les cultures autour de berge de la retenue de Kierma a été déterminé par le type de culture le plus dominant à savoir le chou, l'aubergine et l'oignon. La formule utilise le produit entre le coefficient cultural (K_c) et l'évapotranspiration de référence (E_{To}) (ALLEN, 1998). K_c est un nombre caractéristique de chaque culture (Cardon & Grebet, 1981) qui varie en fonction de stade de développement de la plante. E_{To} correspond au pouvoir évaporatif de l'atmosphère sur une végétation spécifique non limitée en eau (ROKO, 2007). Les détails du calcul sont présentés à l'annexe 22. La figure 15 montre le résultat de traitement sur WEAP d'évolution de ce besoin jusqu'à 2040.

La figure 8 ci-dessous montre que le volume d'eau consommée pour l'irrigation diminue si les producteurs considéreront les besoins réels de ses cultures en basant sur ses besoins théoriques. Le prélèvement actuel $6994 \text{ m}^3/\text{ha}$ est devenu $3287 \text{ m}^3/\text{ha}$ en considérant le scénario besoin en eau théorique des cultures. Ainsi, les producteurs à Kierma ne seront pas touchés par le problème d'insuffisance d'eau même jusqu'à l'horizon 2080. Donc, toutes les demandes sont couvertes pour l'année 2040.

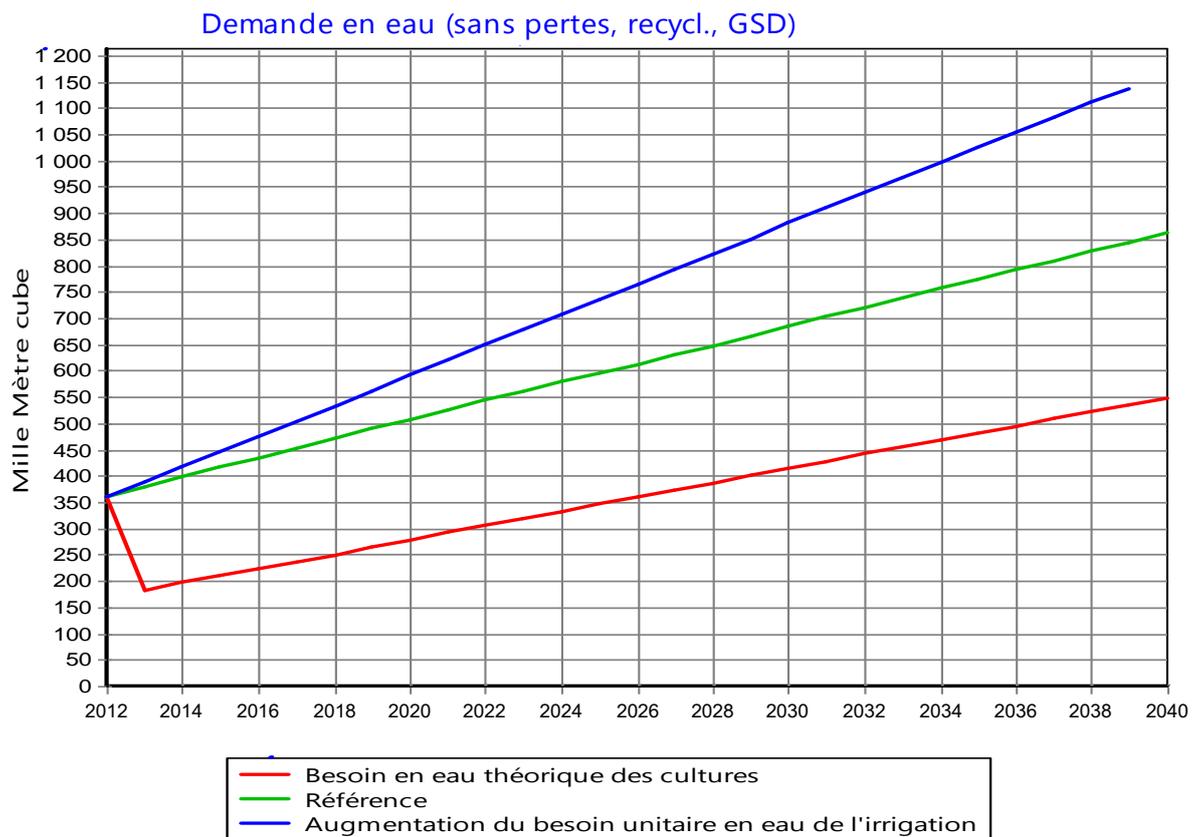


Figure 8 : Evolution de besoin en eau théorique des cultures par rapport aux autres scénarios

1.2. Irrigation goutte à goutte

Le choix de ce type d'irrigation s'explique par les critères suivants :

- Nous avons des cultures des légumes disposés en rangs dans des parcelles de dimension de 0,2 à 1ha. La plupart des terrains a la forme rectangulaire (PHOCAIDES, 2008) avec une pente moyenne de 1,57% qui est inférieur à 3 %.
- Les cultures se trouvent sur sol limoneux argileux de taille moyenne.
- Sur le plan de la qualité de l'eau, la concentration moyenne en matières en suspension (MES) est égal à 789 mg/l qui sont comprise entre 500 mg/l et 2000 mg/l selon la norme (PHOCAIDES, 2008) (KEITA, 2013).

La note de calcul se trouve en *annexe 23*.

●
Demande en eau (sans pertes, recycl., GSD)

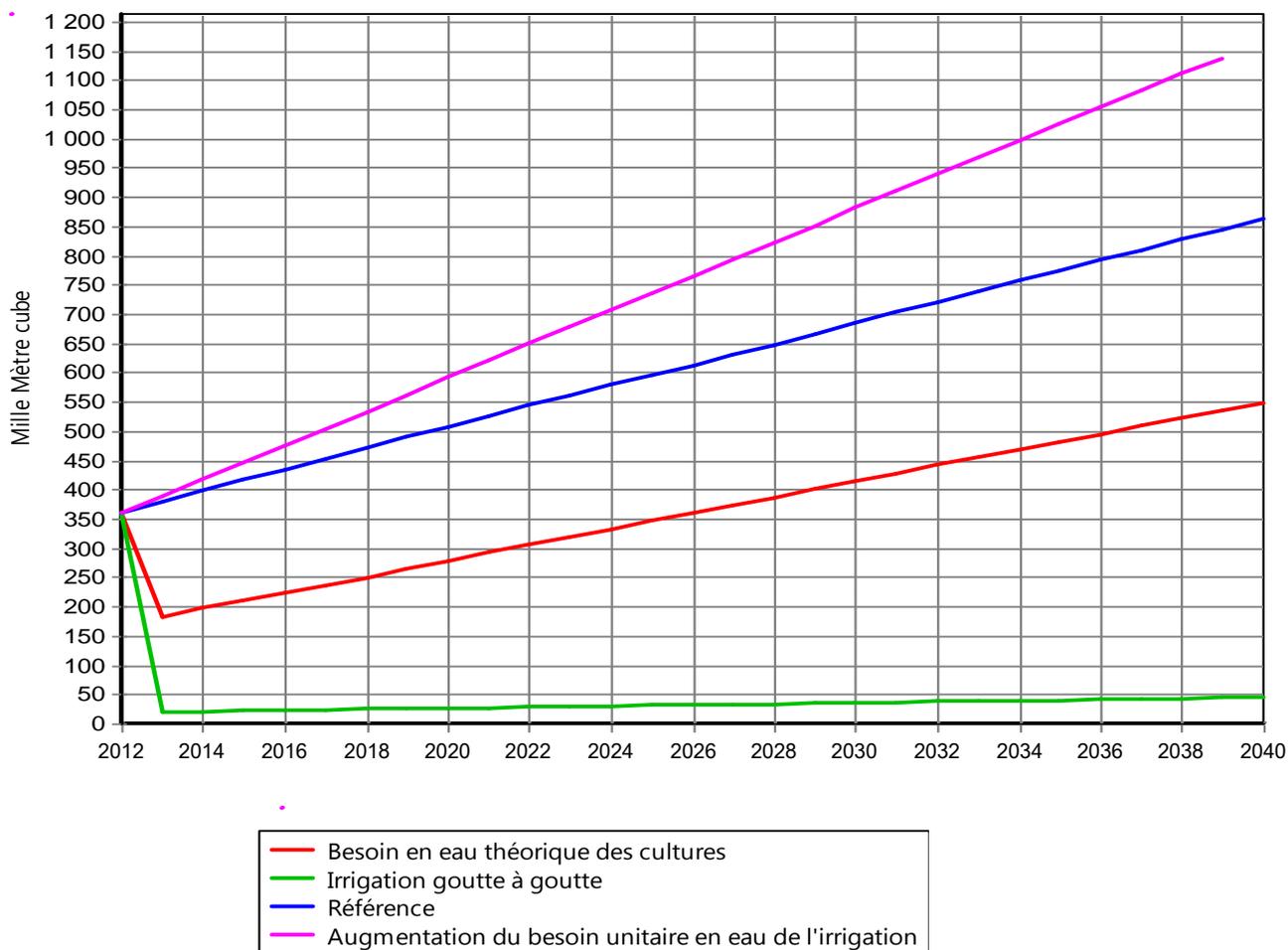


Figure 9 : Evolution de besoin en eau par le choix d'irrigation goutte à goutte par rapport aux autres scénarios

Cette figure 9 montre que la courbe pour le scénario irrigation goutte à goutte est encore plus basse que celle du besoin en eau théorique des cultures. De ce fait, le gain en eau augmente à 95% par rapport au prélèvement de 6994 m³/ha et la marge de sécurité pour les producteurs de Kierma augmente jusqu' à plus de 100 ans s'ils changent leurs modes d'irrigation par du goutte à goutte. Cette pratique est très efficace mais au niveau du coût, il s'élève à 6563 à 8646 FCfa/mois par producteur pour une parcelle moyenne de 0,5 ha (cf. annexe 24).

1.3. Rehaussement du barrage

Le rehaussement de barrage est une solution à recommander puisque nous gagnons un volume d'eau stocké de 331 296 m³ et nous avons en même temps une perte en surface de 241 421 m² aux alentours de la retenue (voir figure 10 et *annexe 25*). Avec ce gain en volume, les insuffisances en eau auront lieu à partir de l'année 2032.

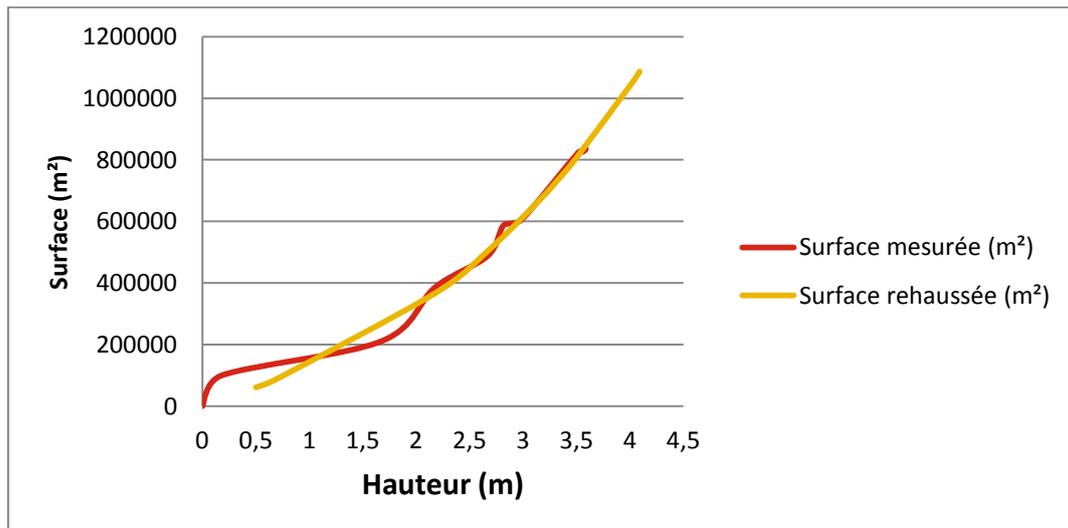


Figure 10 : Comparaison de la surface actuelle avec la surface rehaussée.

1.4. Moyens antiérosifs

La mise en place des dispositifs antiérosifs (*cf annexe 26*) au niveau du bassin versant de Kierma est aussi une autre alternative. Si on arrive à diminuer le taux de dépôt solide à 50% à l'aide de ces moyens, les producteurs pourront gagner une marge de 18 ans après 2022 pour qu'il y ait une insuffisance d'eau (voir figure 11).

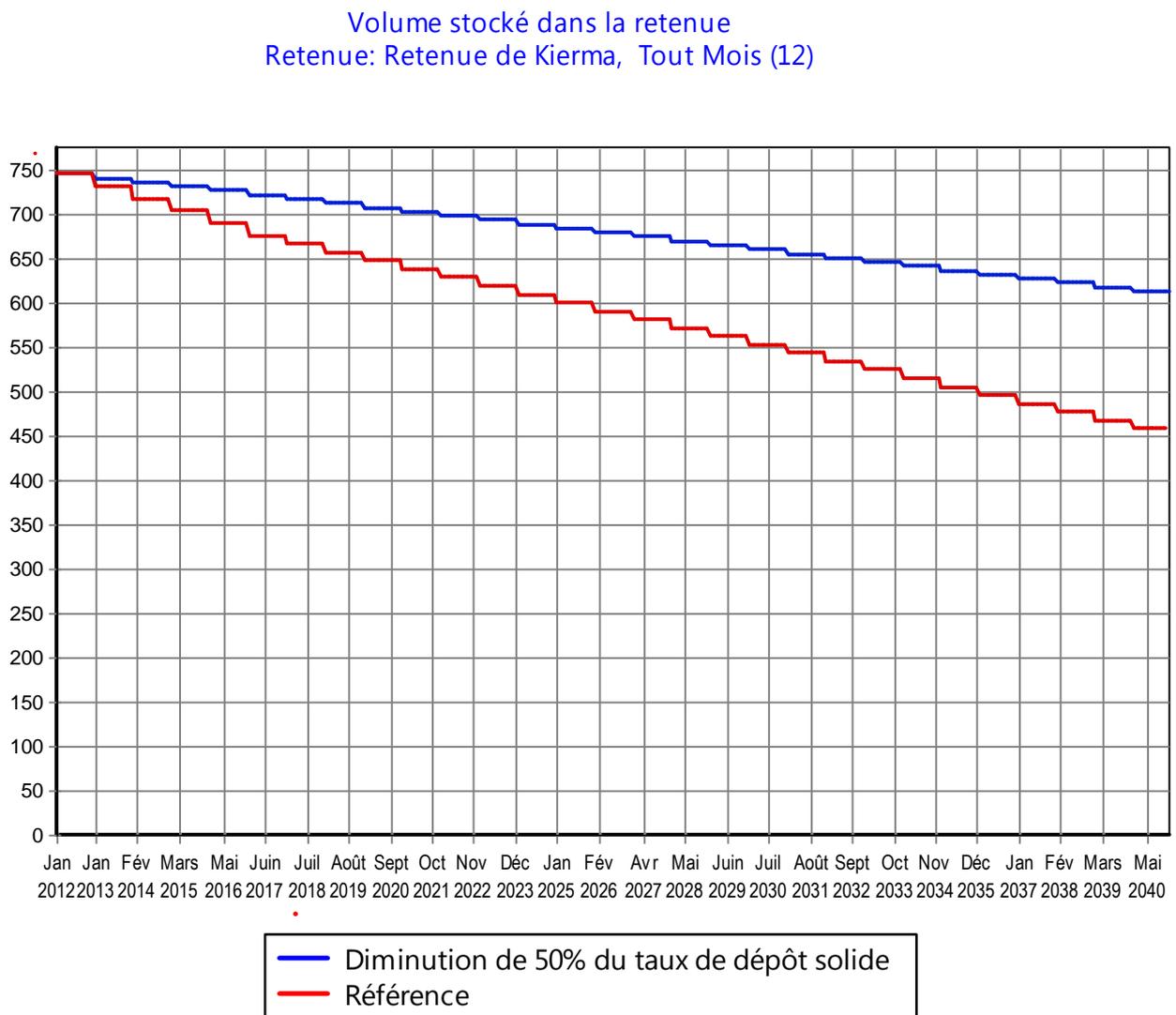


Figure 11 : Evolution de la capacité de stockage en diminuant le taux de dépôt à 50%

V. DISCUSSIONS ET ANALYSES

1. Par rapport aux données disponibles

La plupart des données collectées par le PADI sont conformes à l'exigence de l'outil WEAP. Néanmoins, il y avait des données manquantes. Au niveau des données sur l'évaporation, nous n'avons pas des données pour les cinq premiers mois de l'année 2012. Nous avons pris les données de bacs de Ouagadougou qui a été utilisé à la retenue de Sambissogo (BRUNEL & BOURON, 1992). Néanmoins, les données prises montrent une cohérence avec la réalité c'est-à-dire elles croissent par rapport à la dernière donnée (Décembre 2012) jusqu'au mois de Mars (mois le plus chaud) et après elles commencent à diminuer mais elles restent toujours dans la marge de 200mm par mois. De plus, l'évaporation annuelle dans cette littérature est égale à 2350 mm et dans ce travail, elle est de 2252 mm pourtant nous n'avons que cinq données communes. En outre, nous n'avons pas pu avoir le taux de variation annuel de la surface irriguée par tous les producteurs à partir des enquêtes de l'année 2012 et 2013. De ce fait, une estimation de ce taux a été faite à partir d'une image Spot en 2008 à 2,5m de résolution acquise dans le cadre du projet PADI / BF103 en digitalisant les différentes exploitations autour de la berge de la retenue et un recensement de tous les producteurs de Kierma en 2011. Le taux d'extension de 5% par an est encore remis en question suite au format des données utilisées, l'un en image et l'autre venant de l'enquête. Cela est prouvé dans l'ouvrage de FAO qui montre qu'en Afrique de l'Ouest ce taux devrait être compris entre 0,67 à 1,17% par an (FAO, 2005).

Enfin, les données collectées pour l'irrigation ont de pas de temps décadaire tandis que celles du bétail sont par semaine, et celles de la retenue par mois. Comme le bilan doit être fait au niveau de la retenue ainsi on est obligé de suivre le pas mensuel. Ainsi, les autres données devront avoir le même pas de temps que celui de la retenue.

2. Par rapport aux méthodes de traitement

Au niveau de l'estimation de l'évaporation, le fait d'utiliser les données d'évaporation d'un autre endroit dans notre zone d'étude est une méthode incorrecte car l'évaporation varie fortement d'un endroit à l'autre (BRUNEL & BOURON, 1992) . En plus, la période des observations est différente. De plus, au niveau de calcul d'apport en eau, nous avons utilisé deux méthodes différentes : l'un venant de l'équation bilan hydrique au niveau de la retenue et l'autre venant de l'hydrogramme de crue observé en 2012. Ces deux méthodes ont données

deux résultats avec de différence très faible. Cela peut s'expliquer par rapport à l'erreur des observations fait par le lecteur d'échelle ou bien par l'effet d'utiliser les données d'évaporation d'un endroit différent de notre zone d'étude. Enfin, le choix de l'apport en sédiment annuel constant est considéré comme hypothèse. Normalement, le système devrait être dynamique c'est-à-dire que nous devrions considérer une évolution du taux annuel des sédiments et de voir ensuite son influence par rapport à la quantité disponible dans la retenue. Malheureusement, nous n'avons pas d'information qui pourrait nous dire que ce taux risque d'augmenter dans l'avenir. Cela demande de connaître les occupations de sols de la zone de Kierma et les pratiques des villageois. Des études sont en cours sur ce sujet au sein du PADI.

3. Par rapport aux résultats

En plus du phénomène de la sédimentation, la retenue est aussi de plus en plus menacée par le phénomène d'évaporation. Prenons le cas de l'année 2022, le volume d'eau disponible dans la retenue serait 649 972 m³ sous l'effet de sédiment seulement. Après avoir introduire les données d'évaporation nette, nous avons exécuté la modèle suivi d'une calibration. Les résultats ont montré qu'en cette même année, ce volume deviendra 627 872 m³. L'écart entre ces deux volumes est très grand avec une valeur de 20 100 m³. Ainsi, l'évaporation est un facteur très important qui influe sur le volume d'eau disponible annuel. Elle assèche l'eau de la retenue rapidement plus que le prélèvement en irrigation. Le total annuel d'évaporation nette est égal à 366 262 m³ tandis que celui de l'irrigation est 356 716 m³. Néanmoins, la différence est faible. Le prélèvement par les animaux est faible par rapport à celui des cultures maraîchères. Une inadéquation entre l'offre et la demande est constatée à partir de l'année 2027 si la demande reste toujours la même. S'il y aura des changements suite à l'influence de l'environnement, cette inadéquation va commencer à partir de l'année 2022. Nous avons remarqué aussi que la capacité de stockage de la retenue diminue de façon modérée dû au choix du scénario « Apport annuel de sédiments constant ».

VI. RECOMMANDATIONS

Afin d'améliorer ce travail, nous suggérons nécessaire de :

- Etudier l'occupation du sol et les pratiques villageois du bassin versant ;
- Effectuer un suivi hydrologique de tout le bassin versant ;
- Etudier la contribution des écoulements à la nappe c'est-à-dire installer des piézomètres et suivre les variations des nappes ;
- Densifier le réseau de mesures à ce qu'il soit représentatif de l'ensemble du bassin ;
- Evaluer et comparer le coût et le bénéfice des modèles techniques proposés pour mieux gérer la ressource en eau du barrage de Kierma;
- Etudier les revenus des producteurs de Kierma, pour savoir s'ils arrivent à contribuer s'il y aura un changement de technique d'irrigation.

VII. CONCLUSION

L'application du modèle WEAP à la retenue de Kierma a montré que 28% du volume d'eau disponible actuel dans cette retenue sera perdu en 2032 si l'épaisseur de dépôt de sédiment annuel reste toujours constante avec sa valeur de 2 cm/an. En outre, le modèle conclue aussi que la demande en eau total par les usagers s'élèvera à 537 529 m³ en 2022 s'il n'y a pas d'extension de la surface irriguée et d'accroissement de bétails. Cette demande augmentera jusqu'à 644 764 m³ à la même échéance si l'on tient compte de l'extension de la surface irriguée suite à l'accroissement de la population. A partir de ces différentes valeurs, nous pouvons dire que la première hypothèse (« *Dans 20 ans la retenue aura perdu la moitié de son volume* ») n'est pas vérifiée tandis que la deuxième (« *Dans les dix années à venir, l'eau disponible dans la retenue de Kierma ne couvrira plus la demande en eau des différents usages* ») est confirmée. La non-confirmation de la première hypothèse est due à la considération de dépôt solide annuel constant. Cette hypothèse devrait être acceptable si nous avons un taux d'accroissement des sédiments bien défini pour la retenue de Kierma. Cela demande des études minutieuses de l'occupation du sol du bassin versant de Kierma et surtout des activités anthropiques que subit la couverture végétale dans ce bassin. Le PADI est en train de mener des études sur ce sujet actuellement.

Des limites ont été rencontrées lors de la modélisation avec le logiciel WEAP. Elles sont nombreuses et surgissent à chaque étape de la méthodologie. Mais la limite la plus importante dans le cadre de cette recherche a été que WEAP n'arrive pas à montrer dans une seule figure la courbe de décroissance de volume d'eau disponible et celle d'accroissement des différentes demandes. Pourtant, une figure de tel type s'avère très intéressante lors d'une évaluation de la ressource en eau. Ainsi, nous avons exporté les données brutes dans Excel et fait le graphe à partir sur une feuille choisie. Néanmoins, avec WEAP, nous pouvons améliorer la modélisation des usages de l'eau de Kierma. Le changement de moyen d'exhaure en puits ou forage est une solution possible. WEAP peut modéliser l'interaction entre le volume d'eau disponible souterraine et celui d'eau de surface jusqu'à certaines horizons d'année à venir. Ce domaine reste encore un autre objet de recherche qui entre dans la perspective de ces travaux. En outre, des autres modèles sont encore possibles à étudier avec WEAP au sein du barrage de Kierma. Il s'agira de choisir ou de combiner les modèles suivants: l'étude de la qualité de l'eau du barrage, l'analyse coût-bénéfice des différents

« Elaboration d'un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau des retenues hydro-agricoles : application du modèle WEAP à la retenue de Kierma »

projets d'intervention (réalisation d'irrigation goutte à goutte, rehaussement du barrage, moyens antiérosifs), etc.

VIII. Bibliographie

Ouvrages et articles

- ✚ ALLEN, R. e. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- ✚ BELLIER, S. (2008). *Calibration d'un modèle de routage hydrologique dans le bassin de la Seine*. Paris: Université Pierre et Marie Curie .
- ✚ BERE, T. B. (2012). *Calibration d'un échantillonneur de ruissellement et de sédiments à partir d'un micro bassin agricole situé au niveau des berges de la retenue d'eau de Kierma, au Centre-Sud du Burkina Faso*. Bobo Dioulasso: Memoire de fin de cycle en vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'Agriculture. Centre agricole polyvalent de Matourkou.
- ✚ BERTERRECHE, L., & CHAMPREDONDE, R. (2008). *Etude de la génération de crues par la confrontation de deux logiciels*.
- ✚ BRUNEL, J., & BOURON, B. (1992). *Evaporation des nappes d'eau libre en Afrique Sahélienne et tropicale*. ORSTOM.
- ✚ Cardon, D., & Grebet, P. (1981). *Utilisation de l'informatique dans la constitution d'un fichier "coefficients culturaux"*.
- ✚ COMPAORE, M. (1996). *Cours de barrage 2ème édition*. Ouagadougou: E.I.E.R.
- ✚ DADI. (2011). *Programme de valorisation des plans d'eau. Version provisoire*. Ouagadougou: MAH/DADI.
- ✚ FAO. (2005). *L'irrigation en Afrique en chiffres. Enquêtes AQUASTAT-2005*. Italie: Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation Mondiale.
- ✚ GUEYE, I. (2012). *Barrage*. Ouagadougou: Institut International de l'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
- ✚ HINSCHBREGER, F., MALOUT, J., & BURHANUDDINS, S. (2003). Apport de la bathymétrie et de la géomorphologie à la géodynamique des mers de l'Est-indonésien. *Bull.Soc.Géol.Fr.n°6* , 545-560.
- ✚ JACQUET, J. (2007). *Comparaison des procédés de mesure directe de l'évaporation et de l'évapotranspiration sur des bassins versants expérimentaux de France*.

- ✚ KARAMBIRI, H., & NIANG, D. (2010). *Analyse fréquentielle*. Ouagadougou: Institut International de l'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) (Groupe EIET-ETSHER) UTER Gestion et valorisation de l'Eau et l'Assainissement.
- ✚ KEITA, A. (2013). *Localized irrigation*. Ouagadougou: Institut International de l'Ingénierie (2iE).
- ✚ KOÏTA, M. (2012). *Hydraulique souterraine*. Ouagadougou: Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
- ✚ NORD, G. (2004). *Projet de construction d'un ouvrage hydraulique à vocation agricole*. Grenoble: Université Joseph Fourier.
- ✚ PABIOT, F. (1999). *Optimisation de la gestion d'un barrage collinaire en zone semi-aride*. Montpellier: Mémoire de fin d'étude. Ecole Nationale des sciences agronomiques de Montpellier. DAA physiques des surfaces naturelles et génie hydrologique (ENSAR).
- ✚ PADI. (2012). *Rapport mission de la mise en place de l'échelle limnimétrique au niveau de la retenue de Kierma*.
- ✚ PHOCAIDES, A. (2008). *Manuel des techniques d'irrigation sous pressions*. Rome: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. 2ème édition.
- ✚ RAKOTONDRABE, F. (2007). *Etude de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, modélisation par le logiciel WEAP 21: cas du bassin versant de Morondava (Sud-Ouest de Madagascar)*. Antananarivo: Mémoire de recherche en DEA, Département Hydrogéologie, Ecole Supérieure Polytechniques d'Antananarivo, 113 pages.
- ✚ REMINI, W., & REMINI, B. (2003). La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du Nord. *Larhyss Journal*, 45-54.
- ✚ ROKO, F. B. (2007). *Evolution des variables météorologiques sur le haut bassin de l'Ouémé et leurs influences sur l'évapotranspiration de référence*. Cotonou: Université d'Abomey-Calavi.
- ✚ SEI, S. E. (2008). *WEAP système d'évaluation et de planification des ressources en eau: Tutorial une collection de modules autonomes pour aider à apprendre le logiciel WEAP*. SEI.
- ✚ WARD, D., & MCKAGUE, K. (2007, Mai). Les exigences en eau des bétails. *Fiche technique commande n°07-024*, p. 8 pages.

- ✚ WCD, W. C. (2000). Dams and development. Dans J. L. Loizeau, & W. Wildl, *Aspects sédimentaires de la gestion du barrage de Verbois* (p. 40). Genève: Université de Genève.
- ✚ YAMEOGO, C. (2006). *Les statistiques du secteur de l'élevage au Burkina Faso*. Ouagadougou: Ministère des ressources animales .

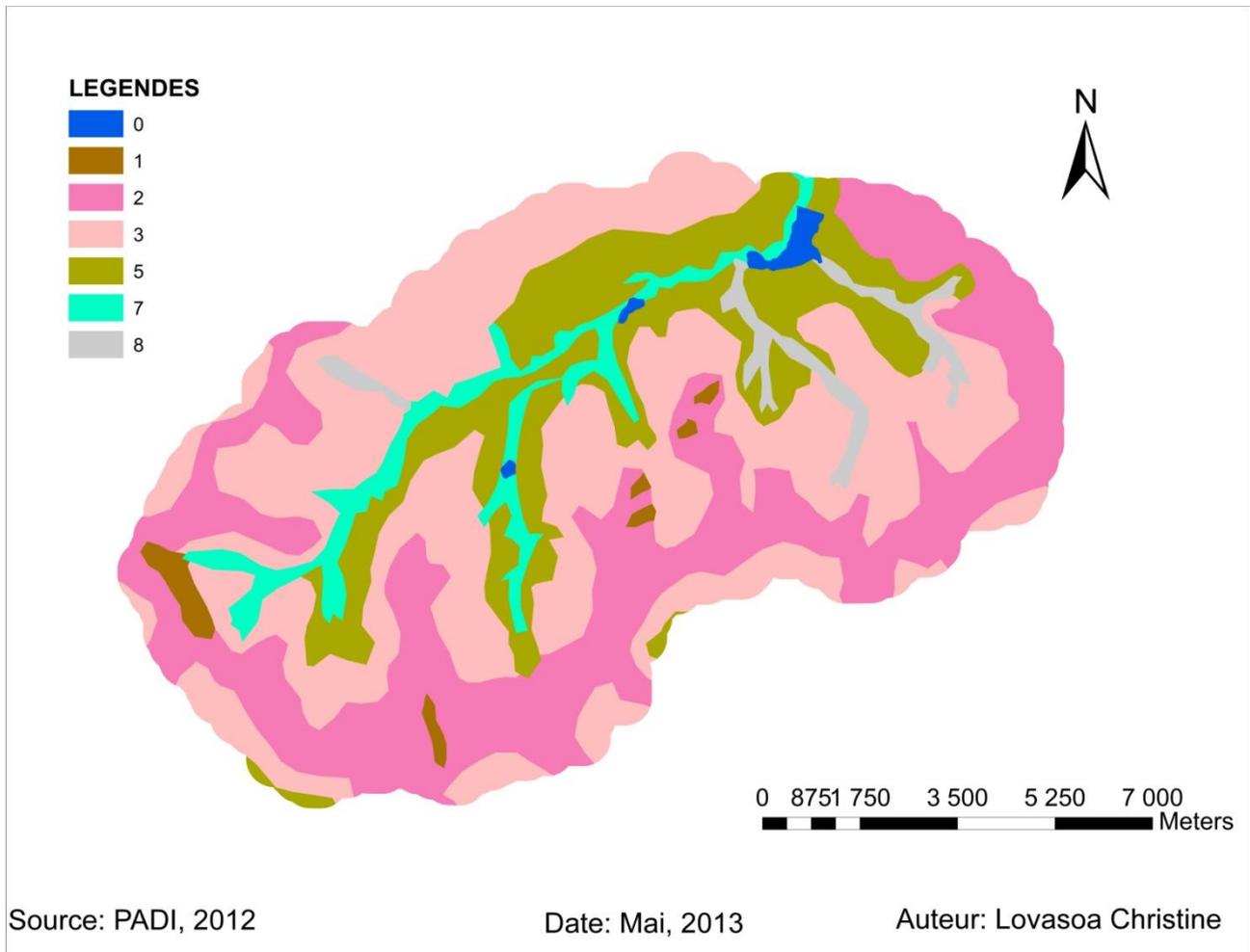
Sites internet

- ✚ *AGENCE D'INFORMATION DU BURKINA*. (2012, Janvier 11). Consulté le Février 02, 2013, sur site web aib.bf: <http://www.aib.bf/spip.php?article780>
- ✚ FAO. (2013, Mars 31). *AQUASTAT- Système d'information de la FAO sur l'eau et l'agriculture*. Consulté le Avril 08, 2013, sur www.fao.org: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use_agr/indexfra.stm
- ✚ UNFPA. (2012, Janvier 24). *Le Burkina en Bref*. Consulté le Mai 01, 2013, sur UNFPA Burkina Faso: <http://burkinafaso.unfpa.org/html/burkina.html>

IX. Annexes

Annexe 1: Pédologie, végétation et géomorphologie du bassin versant de Kierma	53
Annexe 2 : Illustrations d'utilisations de la retenue et pressions	55
Annexe 3 : Données d'entrées pour la modélisation d'une retenue dans WEAP	56
Annexe 4 : Lieu de prélèvement des carottes au niveau de la retenue.....	58
Annexe 5 : Carte bathymétrique mensuelle de la retenue de Kierma pour l'année 2012.....	59
Annexe 6 : Averses journalières au niveau de la retenue	63
Annexe 7 : Fiche de lecture de volume d'eau du bac évaporateur	64
Annexe 8 : Choix de valeur de coefficient de correction « k » d'évaporation du bac.....	65
Annexe 9 : Evaporation mensuelle du barrage de Sambissogo à partir du bac évaporateur	67
Annexe 10 : Fiche de caractérisation des moyens d'exhaure	68
Annexe 11: Fiche de suivi des pratiques d'irrigation	69
Annexe 12: Caractérisation des producteurs suivis	70
Annexe 13 : Volume d'eau prélevée par un échantillon de 10 producteurs à Kierma	71
Annexe14: Calendrier d'irrigation	72
Annexe 15 : Fiche de suivi de l'enquête sur l'abreuvement du bétail	73
Annexe 16: Note de calcul pour les caractéristiques physiques du bassin versant de Kierma	74
Annexe 17: Note de calcul pour l'hydrogramme de crue Note de calcul	75
Annexe 18 : caractéristiques de site de captation et de demande selon les scénarios considérés..	78
Annexe 19: Dépouillement des jaugeages à la station de Kierma	80
Annexe 20 : Note de calcul pour l'analyse fréquentielle (utilisation de loi de Gauss).....	81
Annexe 21 : Coefficient de Nash	87
Annexe 22 : Note de calcul pour le besoin en eau théorique des cultures	88
Annexe 23 : Note de calcul pour l'irrigation goutte à goutte.....	90
Annexe 24: Coût global d'irrigation goutte à goutte :	93
Annexe 25 : Note de calcul pour le rehaussement du barrage	94
Annexe 26: Quelques moyens antiérosives	95

Annexe 1: Pédologie, végétation et géomorphologie du bassin versant de Kierma



Carte1 : Pédologie, végétation, géomorphologie du bassin versant de Kierma

« Elaboration d'un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau des retenues hydro-agricoles : application du modèle WEAP à la retenue de Kierma »

LEGENDE

GEOMORPHOLOGIE	UNITE CAR- TOGRAPHIQUE		SUPERFICIE		TYPES DE SOL (classification française C.P.C.S 1967)			VEGETATION	
	SYMBOLE	TRAME	ha	%	DOMINANTS	ASSOCIATIONS	INCLUSIONS		
Relief résiduel (buttes et affleurements)	1		26663.92	3.90	Lithosols sur cuirasse ou sur roches.	—	Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés de moins de 40cm de profondeur.	Savane arbustive à Combretum sp, Guiera sp, Detarium sp, Gardenia sp.	
Glacis	pente supérieure	2		181435.36	26.52	Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés de moins de 40cm de profondeur.	—	Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés d'au moins 40cm de profondeur; Sols peu évolués (d'apport colluvial modal ou d'érosion régosolique).	Savane arbustive à Acacia senegal, Sclerocarya birrea, Sterculia sp, Piliostigma sp, Balanites sp, tapis herbacé claire à loudetia sp.
		pente moyenne	3		207931.90	30.39	Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés d'au moins 40cm de profondeur.	—	Sols ferrugineux tropicaux lessivés (indurés de moins de 40cm de profondeur, à concrétions et à tâches et concrétions). Sols peu évolués d'érosions régosolique.
	pente inférieure		4		44519.12	6.51		Sols bruns eutrophes tropicaux (hydromorphes, vertiques, peu évolués et ferruginisés).	Sols ferrugineux tropicaux lessivés (indurés d'au moins 40cm de profondeur et à tâches et à concrétions).
		5		127881.43	18.69	Sols ferrugineux tropicaux lessivés à tâches et à concrétions.	—	Sols bruns eutrophes tropicaux (hydromorphes et vertiques); Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés d'au moins 40cm de profondeur.	Champ de sorgho sous savane parc à Butyrospermum paradoxum, Parkia biglobosa, Lannea acida, Tamarindus indica, et tapis herbacé à Andropogon sp.
Ensembles fluvio-alluviaux	terrasses alluviales	6		4176.68	0.61	Sols hydromorphes peu humifères à pseudo-gley d'ensemble.	—	Sols peu évolués d'apport alluvial hydromorphe; Sols ferrugineux tropicaux lessivés (à tâches et à concrétions et modaux).	Champ de maïs ou de sorgho sous savane parc à Butyrospermum paradoxum, Piliostigma sp, Tamarindus indica, et parkia biglobosa.
	lit majeur d'inondation des cours d'eau principaux	7		49355.18	7.21	Sols hydromorphes peu humifères à pseudo-gley d'ensemble.	—	Sols peu évolués d'apport alluvial hydromorphes.	Rizière; Végétation ripicole à Mitragyna inermis, Butyrospermum paradoxum, Piliostigma sp.
	vallons des cours d'eau secondaires	8		21835.93	3.19	Sols peu évolués d'apport alluvial hydromorphes.	—	Sols ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes; Sols hydromorphes peu humifères à pseudo-gley d'ensemble.	Savane parc à Butyrospermum paradoxum, Parkia biglobosa, Lannea acida.
	Plan d'eau		20316.82	2.97					
	Total		684116.34	100					

Annexe 2 : Illustrations d'utilisations de la retenue et pressions



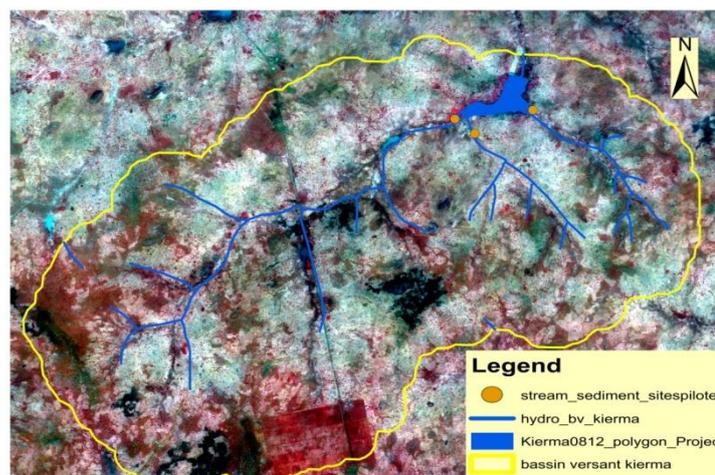
Photo 6 : Culture maraîchère autour de la berge de la retenue de Kierma



Photo 7 : Motopompe utilisée à Kierma



Photo 8 : Bétails au niveau de la retenue de Kierma



Carte 2 : Flux des sédiments au niveau de la retenue

Source : Rapport technique de PADI, 2012

Annexe 3 : Données d'entrées pour la modélisation d'une retenue dans WEAP

Etat actuel

Tableau 12 : Variables d'entrées pour la situation actuelle

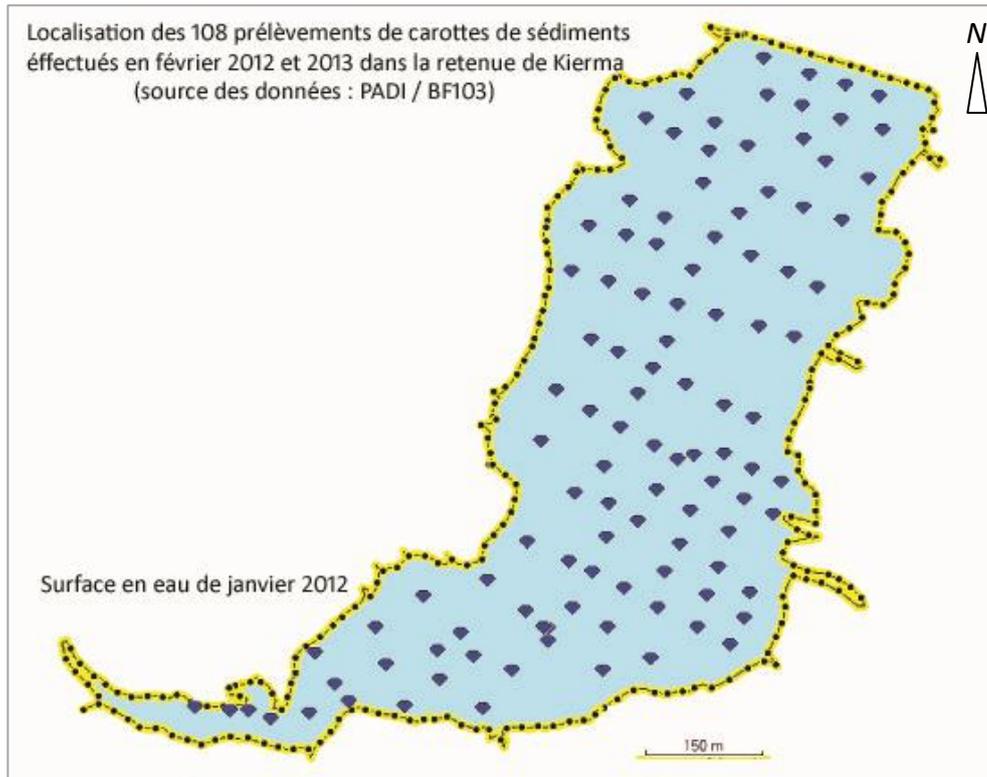
Variables	Définitions
OFFRE : retenue	
Capacité de stockage	Volume total d'eau disponible dans la retenue
Stockage initial	Volume d'eau de la retenue correspondant au premier mois de la simulation
Courbe élévation – volume	Courbe volume d'eau disponible dans la retenue en fonction de la hauteur du plan d'eau
Evaporation nette	Différence entre l'évaporation de la retenue et la précipitation à la surface de la retenue
Perte vers la nappe	Infiltration
Volume observé	Volume d'eau mensuel observé au niveau de la retenue
Débit entrant	Débit annuel ou mensuel des apports en eau au niveau de la retenue
Longueur de bief	Longueur de bief de la rivière qui alimente la retenue
Sommet conservation	Volume maximal dans la retenue (en laissant de l'espace à l'écrêtage de crues)
Sommet tampon	En dessous de ce niveau les largages de retenue sont régulés (si le coefficient tampon est inférieur à 1)
Sommet inactif	Volume dans la retenue non disponible pour allocation
Coefficient tampon	Fraction d'eau dans la zone tampon disponible pour le largage chaque mois. Il doit être compris entre 0 et 1
DEMANDE 1 : Irrigation	
Niveau d'activité annuelle	Surface irriguée
Consommation d'eau annuelle	volume d'eau prélevé annuellement par unité de surface irriguée
Variation mensuelle de prélèvement d'eau (%)	pourcentage d'eau mensuelle demandé
Consommation	Pourcentage d'eau consommée (présence ou non de débit de retour)
DEMANDE 2 : Abreuvement	
Niveau d'activité annuelle	Nombre de tête par type de bétails
Consommation d'eau annuelle	Volume d'eau prélevé annuellement par tête et par type de bétails
Variation mensuelle de prélèvement d'eau (en %)	Pourcentage du nombre de jour de prélèvement d'eau par le bétail
Consommation	Pourcentage d'eau consommée (présence ou non de débit de retour)

Années futures

Tableau 13 : Variables d'entrées pour les années futures

Sites	Variables
OFFRE : retenue	Taux annuel de variation de la capacité de stockage
	Taux annuel de variation du débit entrant ou débits annuels de quelques années futures
	Variation d'évaporation nette
	Variation du volume observé
DEMANDE 1: Irrigation	Taux annuel d'extension de la surface irriguée
	Consommation d'eau annuelle
	Variation mensuelle de prélèvement d'eau
	Consommation
DEMANDE 2 : Abreuvement	Taux annuel d'accroissement de cheptels
	Consommation d'eau annuelle
	Variation mensuelle de prélèvement d'eau
	Consommation

Annexe 4 : Lieu de prélèvement des carottes au niveau de la retenue

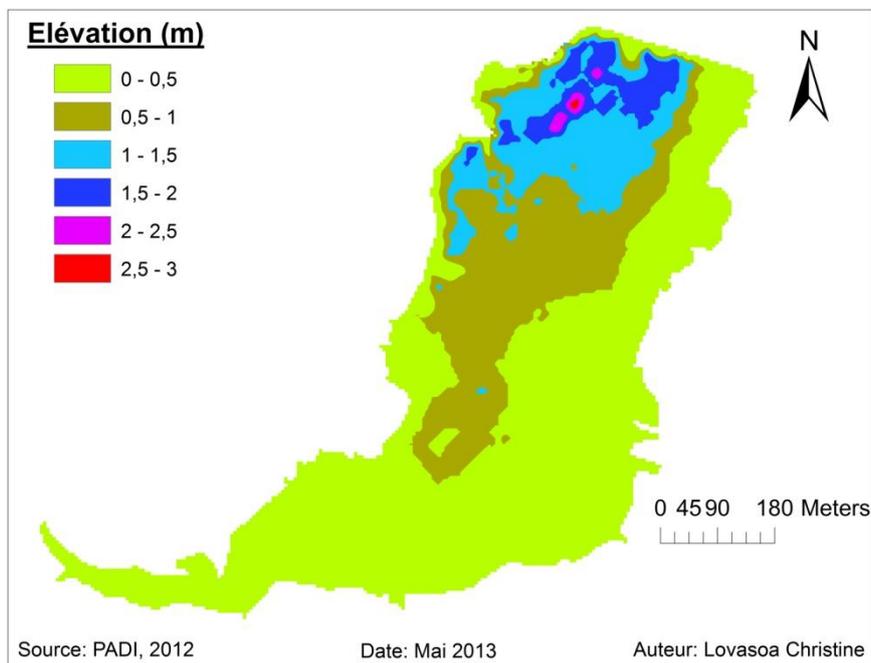


Carte3 : Prélèvement des carottes au niveau de la retenue de Kierma

Source : PADI, 2012

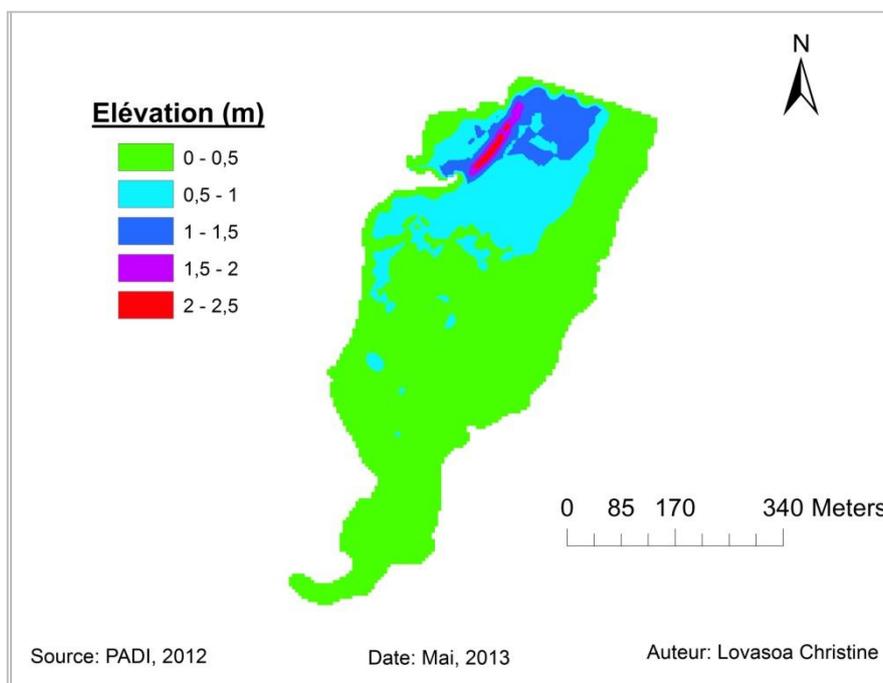
Annexe 5 : Carte bathymétrique mensuelle de la retenue de Kierma pour l'année 2012

23/01/2012



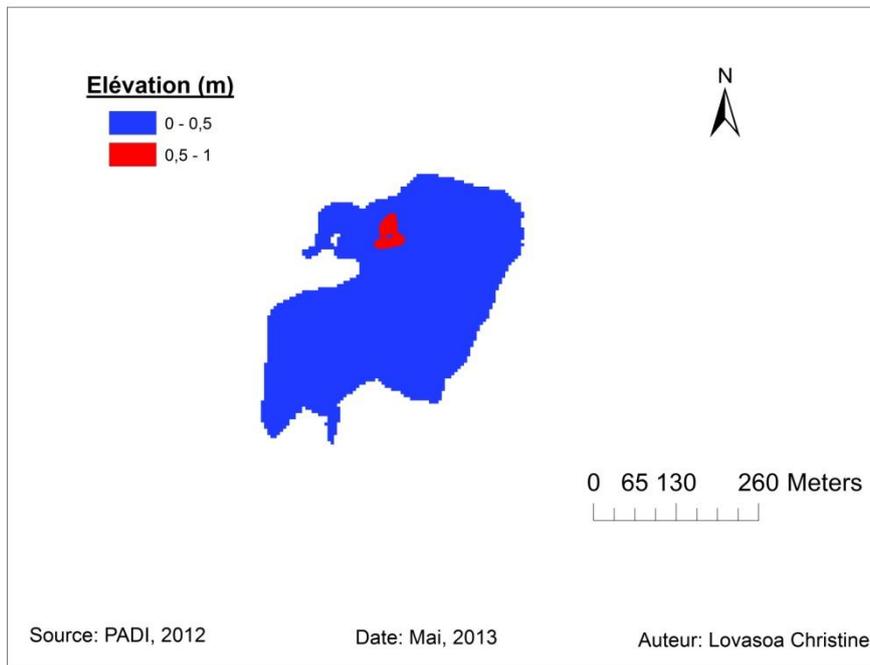
Carte 4 : Carte bathymétrique de la retenue de Kierma du mois de Janvier 2012

23/02/ 2012



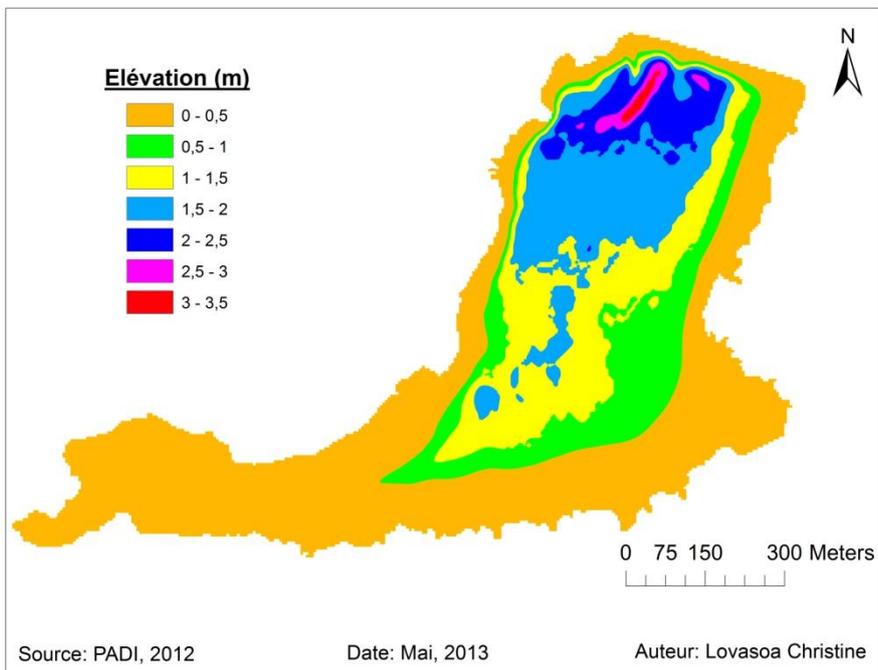
Carte 5 : Carte bathymétrique de la retenue de Kierma du mois de Février 2012

23/03/ 2012



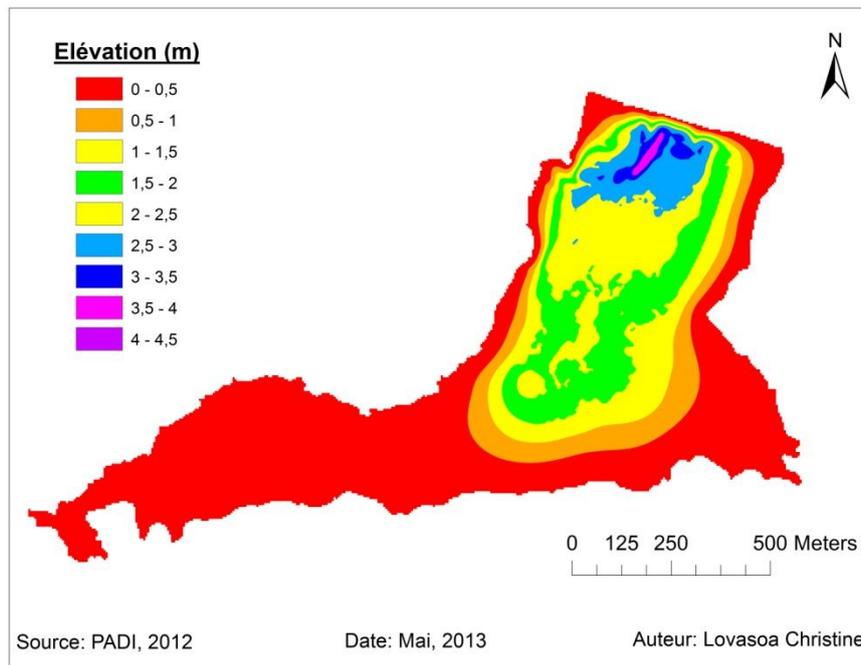
Carte 6 : Carte bathymétrique de la retenue de Kierma du mois de Mars 2012

06/07/ 2012



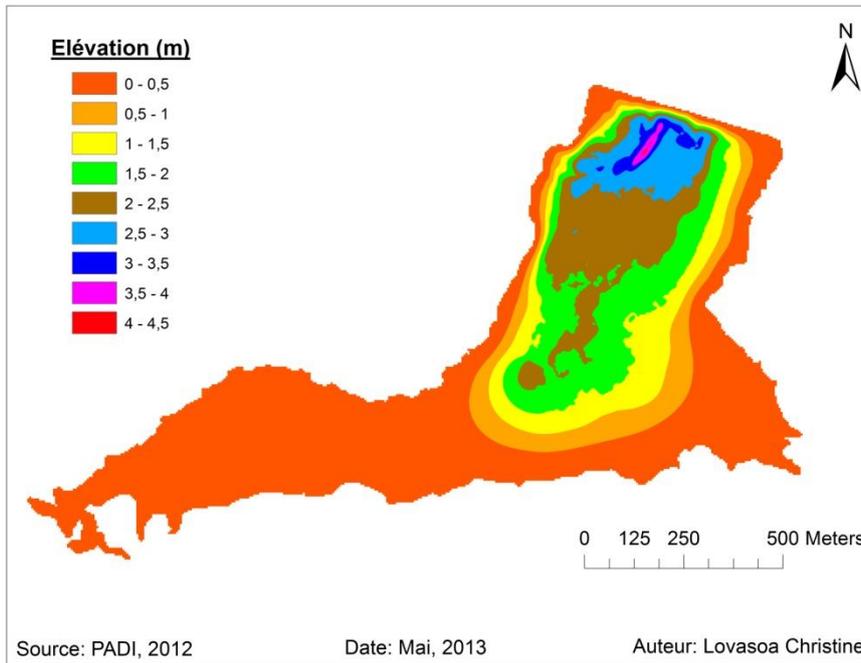
Carte 7 : Carte bathymétrique de la retenue de Kierma du mois du 06 juillet 2012

27/07/ 2012



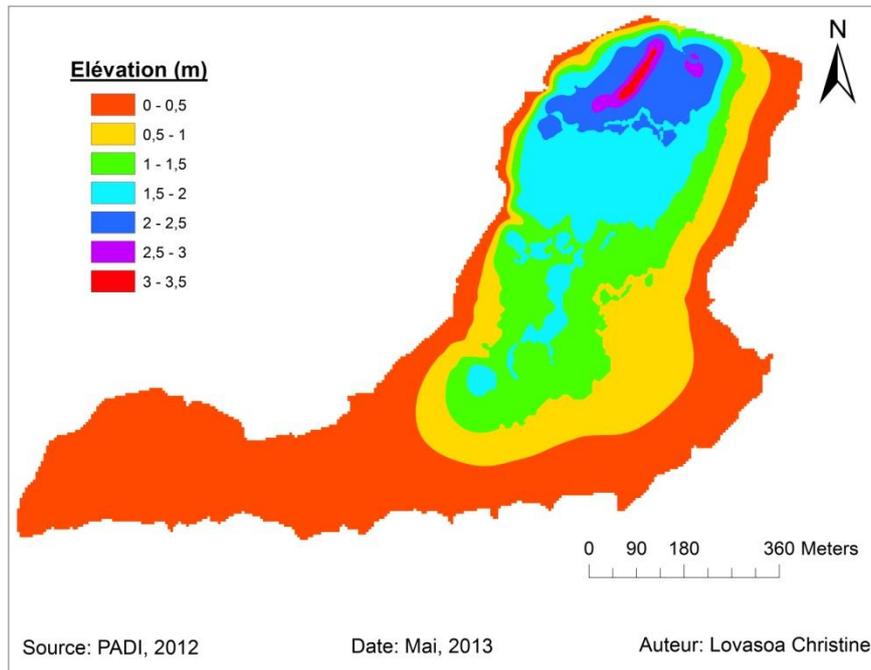
Carte 8 : Carte bathymétrique de la retenue de Kierma du mois de Juillet 2012

09/08/ 2012



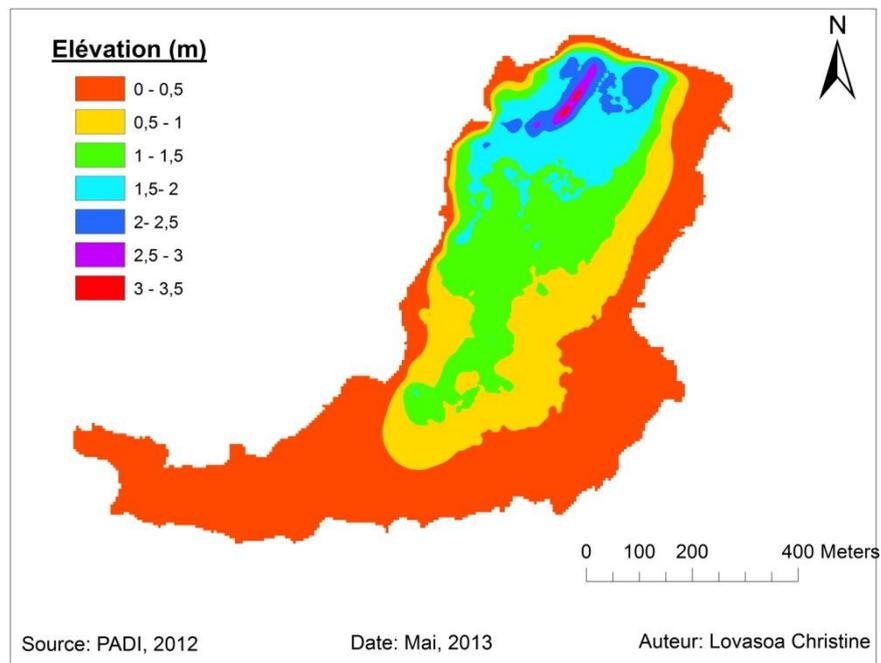
Carte 9 : Carte bathymétrique de la retenue de Kierma du mois d'Août 2012

03/12/ 2012



Carte 10 : Carte bathymétrique de la retenue de Kierma du 03 Décembre 2012

31/12/ 2012



Carte 11 : Carte bathymétrique de la retenue de Kierma du 31 Décembre 2012

Annexe 6 : Averses journalières au niveau de la retenue

Mois	Date Début	Date Fin	Durée (mn)	nbPoints	Int.Maxi (mm/h)	Dur.Maxi (mn.ss)	Pluie (mm)
Mai	30/05/2012 12:20	30/05/2012 12:35	15	3	86,4	5	14
Juin	02/06/2012 17:50	02/06/2012 18:30	40	8	151,2	5	51,4
	09/06/2012 20:55	09/06/2012 21:20	25	5	79,2	5	18,6
	13/06/2012 17:55	13/06/2012 18:05	10	2	91,2	5	12,8
Juillet	01/07/2012 17:10	01/07/2012 17:40	30	6	52,8	5	15
	04/07/2012 06:50	04/07/2012 08:30	100	20	62,4	5	26,8
	15/07/2012 09:25	15/07/2012 09:50	25	5	43,2	5	10,8
	21/07/2012 22:50	22/07/2012	70	14	120	5	43
	24/07/2012 18:25	24/07/2012 19:15	50	10	43,2	5	20,8
	28/07/2012 20:15	28/07/2012 20:45	30	6	120	5	41
Août	04/08/2012 01:30	04/08/2012 02:00	30	6	74,4	5	23
	07/08/2012 00:40	07/08/2012 01:20	40	8	69,6	5	26,4
	15/08/2012	15/08/2012 00:50	50	10	52,8	5	20,8
	21/08/2012 13:35	21/08/2012 14:10	35	7	177,6	5	50
	23/08/2012 14:10	23/08/2012 14:40	30	6	117,6	5	41,2
Septembre	02/09/2012 07:00	02/09/2012 07:45	45	9	81,6	5	32,8
	04/09/2012 06:25	04/09/2012 08:00	95	19	93,6	5	43,6
	05/09/2012 08:40	05/09/2012 09:20	40	8	45,6	5	16,2
	15/09/2012 00:25	15/09/2012 01:05	40	8	60	5	24,2
	17/09/2012 03:30	17/09/2012 04:15	45	9	69,6	5	32,8
	19/09/2012 11:15	19/09/2012 12:35	80	16	100,8	5	37,4
	22/09/2012 20:35	22/09/2012 21:30	55	11	110,4	5	46,6
	26/09/2012 15:45	26/09/2012 16:15	30	6	52,8	5	17,4

Annexe 7 : Fiche de lecture de volume d'eau du bac évaporateur



Programme PADI 2011-2013 / BF 103



Station :

Mois/Année :

Nom de l'observateur :

Jour	MATIN				SOIR			
	Heure	Volume (0,5l)	Pluviométrie (mm)	Observations	Heure	Volume (0,5l)	Pluviométrie (mm)	Observations
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								

Rq.) Un volume ajouté de 0,5 litre correspond à 0,5 mm de hauteur d'eau dans le bac, pour 1 bac de 1m²

Annexe 8 : Choix de valeur de coefficient de correction « k » d'évaporation du bac

La retenue de Kierma se trouve dans la zone soudano-sahélienne. Elle se trouve dans une position géographique 12°02'N et 1°24'W. L'évaporation au niveau de cette retenue varie en fonction du coefficient de correction k considéré.

Tableau 1: Valeur de l'évaporation de la retenue de Kierma en fonction de coefficient de correction k de l'évaporation du bac (bac de type Colorado)

(Données d'évaporation du Juin 2012 à Janvier 2013)

Auteurs	Valeur de k	Evaporation (mm/jour)	Mois plus sec	Mois plus humide
POUYAUD (1985) K = 0,68 à 0,73	Pour k = 0,7	3 à 5	Novembre 2012 Janvier 2013	Septembre
	Pour k = 0,73	4 à 5	Novembre 2012 Janvier 2013	Septembre
ROHWER, 1934 ; KOLHER, 1954; GANGOPADHYAYA & Al., 1966; SHNITNIKOV, 1974 K = 0,80	Pour k= 0,80	4 à 6	Novembre 2012 Janvier 2013	Septembre

Pour choisir la valeur de k considérée, nous avons fait une comparaison de ces valeurs d'évaporation avec celles dans des études qui sont déjà effectuées dans la même zone climatique (soudano-sahélienne).

Tableau 2 : Quelques études sur l'évaporation dans la zone soudano-sahélienne de Burkina Faso

Lieu	Evaporation (mm/j)	Mois le plus pluvieux	Mois le plus sec	Sources
Retenue de Sambissogo (Région de KOUDOUGOU : 12°15'N , 2°2'W)	4 – 9	Août	Mars, Avril	ROCHE, 1965
Région de Tikare (13°13'N, 1°35'-1°43'W)	4-9	Août	Mars	OBERUN. 1965 ; OBERUN & al., 1966
Bassin du PK 20 (LUMBILA)	4-10	Août, Septembre	Février, Mars, Avril	PIEYNS. 1965 ; PIEYNS & KLEIN. 1964
Bassin de	4-10	Août,	Mars, Avril	PIEYNS. 1965 ;

« Elaboration d'un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau des retenues hydro-agricoles : application du modèle WEAP à la retenue de Kierma »

OUAGADOUGOU (A 50 km du site de Kierma)		Septembre		PIEYNS & KLEIN. 1964
Bassin de BOULBI	4-11	Août	Février, Mars, Avril	PIEYNS. 1965 ; PIEYNS & KLEIN. 1964
TONI (12°30'- 12°40'N ,3°50'. 4°W, bassin versant de la plaine de KAMADENA)	5-15	Septembre	Mai	LE BARBE. 1979 .LE BARBE cl al.. 1980 .
TAGOU (11°10'N ,0°40'E, Bassinde la Kompienga)	4-14	Août, Septembre	Février, Mars, Avril	ANONYME. 1981 à 1984

La valeur de l'évaporation 4 à 9 mm est considérée comme référence vu la proximité de la retenue de Sambisso et la région de Tikare par rapport à la zone d'étude. Ainsi, pour le cas de la retenue de Kierma, la valeur de coefficient de correction choisie est 0,8 car il permet d'avoir une évaporation plus proche de la référence.

Annexe 9 : Evaporation mensuelle du barrage de Sambissogo à partir du bac évaporateur

Sources : ROCHE, 1965 ;

Cadre : Note hydrologique sur le barrage de Sambissogo

Climat : P = 897 mm/an ;

Appareils utilisés : Bacs de OUAGADOUGOU

Période d'observation : Nov. 1961 - Déc. 1963

Résultats :

L'évaporation sur bacs a été étudiée par l'ORSTOM dans la région de Ouagadougou présentant une analogie climatique très marquée avec celle de Koudougou. 5 bacs ont été exploités et les résultats ont été présentés précédemment.

On a adopté en principe les moyennes mensuelles de ces 5 bacs, mais le fait qu'un de ces bacs conduit à des résultats beaucoup plus forts que les autres incite à la prudence.

D'autre part, ces bacs étaient placés généralement au voisinage de retenues, ce qui fait penser que le coefficient de passage du bac à la retenue doit être assez élevé. On a adopté finalement un coefficient variant de 0.90 pour la retenue pleine, jusqu'à 1 pour la retenue presque vide à fin Juin : en effet, c'est après une année sèche, lorsque la retenue se vide presque complètement, que l'évaporation est la plus dangereuse.

Estimation de l'évaporation du barrage : 2350 mm/an

Tableau : Répartition mensuelle de l'évaporation sur le barrage de Sambissogo en mm/j

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
6.6	7.8	8.9	8.9	7.6	6.8	4.8	3.7	4.5	5.3	6.0	6.8

Source : BRUNEL et BOURON, 1992

Annexe 10 : Fiche de caractérisation des moyens d'exhaure

DIAGNOSTIC DES MOYENS D'EXHAURE DANS LES RETENUES D'EAU D'IRRIGATION POUR LES ACTIVITES AGRICOLES

Responsables : DADI/APEFE BF103, AEN

N° enquête :

Date de l'enquête :

Nom, prénom et structure de l'enquêteur :

Nom, prénom du producteur :

Tel. Producteur :

Moyens d'exhaure :

1. Motopompe : permanente : mobile
 - Coordonnées GPS (° décimaux) : N :
(si permanente) W :
 - Puissance :
 - Marque :
 - Débit :
2. Pompes à motricité humaine
 - Coordonnées GPS (° décimaux) : N :
W :
 - Type :
 - Marque :
3. Arrosoir, calebasse :

Pratiques hydro-agricoles :

Superficie :

Cultures :

Autres points d'exhaure (à préciser):

Type (puisard, forage, ...) :

- Coordonnées GPS (° décimaux) : N :
W :



Annexe 11: Fiche de suivi des pratiques d'irrigation

Programme PADI 2011 – 2013

Estimation des prélèvements en eau dans les retenues d'eau d'irrigation :

FICHE DE SUIVI DES PRATIQUES D'IRRIGATION

Responsables : DADI/APEFE BF103, AEN

Nom et prénom de l'enquêteur :

Code du producteur :

Nom, prénom du producteur :

Tel. Producteur :

Date	Heure de début d'irrigation	Heure de fin d'irrigation	Superficie irriguée	Cultures	Débit moyen mesuré (litre / seconde)	Nombre d'irrigation de la semaine



Annexe 12: Caractérisation des producteurs suivis

Programme PADI 2011 - 2013

Estimation des prélèvements en eau dans les retenues d'eau d'irrigation :

FICHE DE CARACTERISATION DES PRODUCTEURS SUIVIS

Responsables : DADI/APEFE BF103, AEN

Code du producteur :

Nom, prénom du producteur :

Tel. Producteur :

Moyens d'exhaure :

Motopompe : permanente : mobile

Coordonnées GPS (° décimaux) : N :

W :

Puissance :

Marque :

Débit :

Données sur l'exploitation

SPECULATIONS	SUPERFICIE	DATE DE REPIQUAGE	DATE DE RECOLTE	DATE D'ARRET DE L'IRRIGATION



Annexe 13 : Volume d'eau prélevée par un échantillon de 10 producteurs à Kierma

Mois	Variables	Décade 1	Décade 2	Décade 3
Octobre	Nombre d'irrigation	12	14	16
	Débit moyen (l/s)	6,77	6,8	6,95
	Durée moyenne(s)	24535	25010	23732
Novembre	Nombre d'irrigation	15	16	17
	Débit moyen (l/s)	7,03	7,05	7,06
	Durée moyenne(s)	23468	22935	22636
Décembre	Nombre d'irrigation	19	18	17
	Débit moyen (l/s)	6,83	6,87	6,94
	Durée moyenne(s)	25209	25530	24554
Janvier	Nombre d'irrigation	17	13	11
	Débit moyen (l/s)	6,97	6,73	6,81
	Durée moyenne(s)	25334	26349	26204
Février	Nombre d'irrigation	12	7	7
	Débit moyen (l/s)	7,07	6,88	6,87
	Durée moyenne(s)	24940	24566	24566
Mars	Nombre d'irrigation	4		
	Débit moyen (l/s)	6,42		
	Durée moyenne(s)	29910		

Annexe14: Calendrier d'irrigation

		Octobre		Novembre		Décembre		Janvier		Février		Mars			
		N	D (l/s)	N	D (l/s)										
Décade 1	Aubergine	4	28	4	28	5	36	6	42	4	28	1	6		
	Choux	7	47	8	56	8	54	5	35	4	28				
	Oignon			2	15	5	34	5	35	3	21	1	7		
	Pastèque	1	6	1	6	1	6								
	Tomate							1	7	1	7				
Décade 2	Aubergine	4	27	4	27	6	42	6	42	2	14				
	Choux	7	56	9	64	7	47	3	19	2	13				
	Oignon			2	15	5	35	3	20	3	21				
	Pastèque	2	11	1	6										
	Tomate							1	7						
Décade3	Aubergine	4	27	4	27	6	42	6	28	2	14				
	Choux	8	56	8	57	5	34	3	20	2	13				
	Oignon	2	15	2	15	5	35	5	20	3	21				
	Pastèque	2	11	1	6										
	Tomate					1	7	1	7						
														TOTAL	
total		41	284	46	323	54	372	45	282	26	180	2	13	214	1454

Annexe 15 : Fiche de suivi de l'enquête sur l'abreuvement du bétail

Programme PADI 2011 - 2013

FICHE DE SUIVI DE L'ABREUUREMENT DU BETAIL

Responsables : DGADI/APEFE BF103

Site de :

Nom, prénom de l'enquêteur :

Tel. Enquêteur :

Données sur le nombre d'animaux

DATE	HEURES	NOMBRE D'ANES	NOMBRE DE BOEUFS	NOMBRE DE MOUTONS ET DE CHEVRES	AUTRES (A PRECISER)
	07H00 – 12H00				
	12H00 – 15H00				
	15H00 – 18H30				
	07H00 – 12H00				
	12H00 – 15H00				
	15H00 – 18H30				
	07H00 – 12H00				
	12H00 – 15H00				
	15H00 – 18H30				
	07H00 – 12H00				
	12H00 – 15H00				
	15H00 – 18H30				
TOTAL					

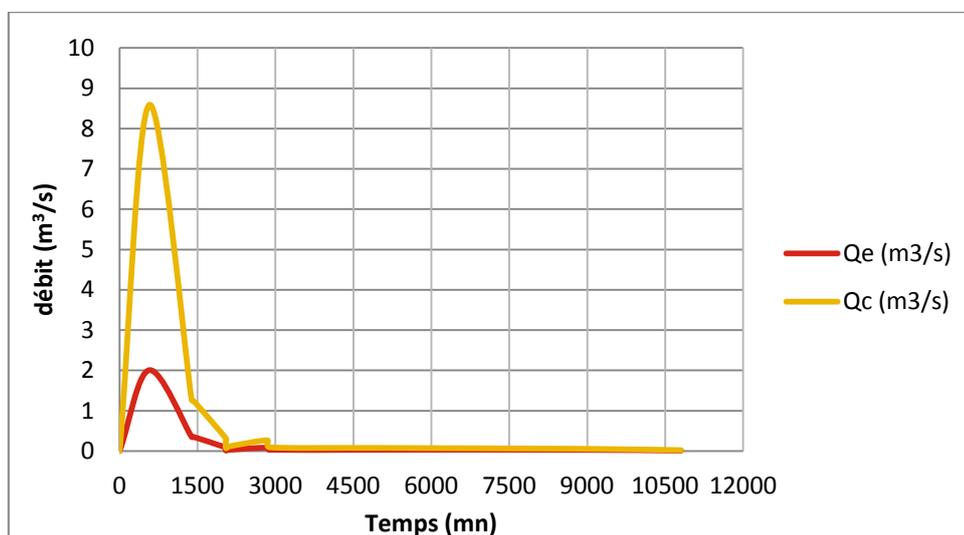


Annexe 16: Note de calcul pour les caractéristiques physiques du bassin versant de Kierma

Variables	Formule de calcul	Paramètres
Indice de compacité : K_c	$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	P : Périmètre du bassin versant S : surface du bassin versant
Longueur du rectangle équivalent : L	$L = \left(\frac{P - \sqrt{(P^2 - 16 \times S)}}{4} \right)$	P : Périmètre du bassin versant S : surface du bassin versant

Annexe 17: Note de calcul pour l'hydrogramme de crue

Variables	Formules	Paramètres
Débit de pointe de la crue laminée : Q_e	$Q = CLh^{3/2}$	L : Longueur déversant (m) h : charge sur le déversoir (m) $C = m\sqrt{2g} = 4,429$ m m : coefficient du débit qui dépend de l'épaisseur de déversoir et la forme de déversoir
Débit de crue entrant : Q_c	$Q_c = Q_e + \frac{\Delta V}{t} \leftrightarrow \Delta h = \frac{1}{A}(Q_c - Q_e)\Delta t$ $Q_c = \frac{A\Delta h}{\Delta t} + Q_e$	A : Surface du plan d'eau (m ²) Δh : variation de charge (m) Δt : variation de temps (s)



Hydrogramme de crue pendant l'année 2012

Source : Données de PADI modifiées par l'Auteur, 2012

« Elaboration d'un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau des retenues hydro-agricoles : application du modèle WEAP à la retenue de Kierma »

Tableau récapitulatif

Date: t	delta t (mn)	delta t (s)	Hauteur d'eau lue sur l'échelle (m)	Hauteur d'eau déversée: charge (h)	delta h (m)	valeur absolue de delta h	h ^{1,5}	Longueur déversante (m)	C	Qe (m3/s)	A (m ²)	Qc(m3/s)	Volume sortant (m3)	Volume entrant (m3)
t0	0	0	3,6	0						0		0	0	0
22/07/2012 06:28	388	23280	3,67	0,07	0,07	0,07	0,0185	2,5	4,4	0,2050656	548098	1,853127	4773,93	43140,79
02/09/2012 17:48	500	30000	3,64	0,04	0,03	0,03	0,0052	2,5	4,4	0,0575344	763941	0,821475	1726,03	24644,26
15/09/2012 17:09	550	33000	3,62	0,02	0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	763941	0,494312	1033,49	16312,31
05/09/2012 17:47	551	33060	3,8	0,2	-0,18	0,18	0,0764	2,5	4,4	0,8455795	763941	5,004968	27954,9	165464,2
11/09/2012 17:27	562	33720	3,66	0,06	0,14	0,14	0,0524	2,5	4,4	0,580013	763941	3,751773	19558	126509,8
04/09/2012 18:00	569	34140	3,94	0,34	-0,28	0,28	0,1482	2,5	4,4	1,6405246	763941	7,906004	56007,5	269911
15/08/2012 16:58	571	34260	3,62	0,02	0,32	0,32	0,181	2,5	4,4	2,0043366	704457	8,584203	68668,6	294094,8
08/08/2012 17:38	577	34620	3,61	0,01	0,01	0,01	0,001	2,5	4,4	0,0110725	704457	0,214555	383,33	7427,9
15/09/2012 07:59	579	34740	3,64	0,04	-0,03	0,03	0,0052	2,5	4,4	0,0575344	763941	0,717242	1998,74	24916,97
12/08/2012 17:59	592	35520	3,62	0,02	0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	704457	0,427971	1112,41	15201,55
14/09/2012 16:38	598	35880	3,66	0,06	-0,04	0,04	0,008	2,5	4,4	0,08858	763941	0,940242	3178,25	33735,89
11/09/2012 06:49	600	36000	3,67	0,07	-0,01	0,01	0,001	2,5	4,4	0,0110725	763941	0,223278	398,61	8038,02
17/09/2012 17:19	600	36000	3,64	0,04	0,03	0,03	0,0052	2,5	4,4	0,0575344	763941	0,694152	2071,24	24989,47
24/09/2012 07:40	601	36060	3,63	0,03	0,01	0,01	0,001	2,5	4,4	0,0110725	763941	0,222925	399,274	8038,684
24/09/2012 17:41	601	36060	3,61	0,01	0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	763941	0,455023	1129,32	16408,14
17/09/2012 07:19	602	36120	3,66	0,06	-0,05	0,05	0,0112	2,5	4,4	0,1237943	763941	1,181298	4471,45	42668,5
12/08/2012 08:07	605	36300	3,63	0,03	0,03	0,03	0,0052	2,5	4,4	0,0575344	704457	0,63973	2088,5	23222,21
23/07/2012 06:37	609	36540	3,61	0,01	0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	548098	0,331317	1144,35	12106,31
12/09/2012 07:18	609	36540	3,68	0,08	-0,07	0,07	0,0185	2,5	4,4	0,2050656	763941	1,668554	7493,1	60968,97
08/08/2012 08:01	610	36600	3,62	0,02	0,06	0,06	0,0147	2,5	4,4	0,1627319	704457	1,317579	5955,99	48223,41
06/09/2012 07:36	611	36660	3,66	0,06	-0,04	0,04	0,008	2,5	4,4	0,08858	763941	0,922122	3247,34	33804,98
21/09/2012 07:16	613	36780	3,62	0,02	0,04	0,04	0,008	2,5	4,4	0,08858	763941	0,919402	3257,97	33815,61
20/09/2012 17:29	615	36900	3,65	0,05	-0,03	0,03	0,0052	2,5	4,4	0,0575344	763941	0,678625	2123,02	25041,25
12/09/2012 17:35	617	37020	3,67	0,07	-0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	763941	0,444036	1159,38	16438,2

« Elaboration d'un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau des retenues hydro-agricoles : application du modèle WEAP à la retenue de Kierma »

22/07/2012 16:46	618	37080	3,65	0,05	0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	548098	0,326948	1161,26	12123,22	
13/09/2012 17:27	618	37080	3,67	0,07	-0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	763941	0,443368	1161,26	16440,08	
23/09/2012 17:39	619	37140	3,69	0,09	-0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	763941	0,442702	1163,14	16441,96	
29/07/2012 16:56	622	37320	3,61	0,01	0,08	0,08	0,0226	2,5	4,4	0,2505421	548098	1,425457	9350,23	53198,07	
23/07/2012 17:03	626	37560	3,68	0,08	-0,07	0,07	0,0185	2,5	4,4	0,2050656	548098	1,226547	7702,26	46069,12	
13/09/2012 07:09	626	37560	3,67	0,07	0,01	0,01	0,001	2,5	4,4	0,0110725	763941	0,214465	415,883	8055,293	
04/09/2012 08:31	631	37860	3,95	0,35	-0,28	0,28	0,1482	2,5	4,4	1,6405246	763941	7,290379	62110,3	276013,7	
07/08/2012 18:11	642	38520	3,64	0,04	0,31	0,31	0,1726	2,5	4,4	1,9111212	704457	7,580427	73616,4	291998,1	
14/09/2012 06:40	647	38820	3,66	0,06	-0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	763941	0,424899	1215,76	16494,58	
03/09/2012 17:35	648	38880	3,62	0,02	0,04	0,04	0,008	2,5	4,4	0,08858	763941	0,874528	3443,99	34001,63	
03/09/2012 06:47	659	39540	3,63	0,03	-0,01	0,01	0,001	2,5	4,4	0,0110725	763941	0,20428	437,807	8077,217	
06/09/2012 16:56	680	40800	3,62	0,02	0,01	0,01	0,001	2,5	4,4	0,0110725	763941	0,198313	451,758	8091,168	
05/09/2012 07:58	718	43080	3,9	0,3	-0,28	0,28	0,1482	2,5	4,4	1,6405246	763941	6,605786	70673,8	284577,3	
23/08/2012 19:02	735	44100	3,65	0,05	0,25	0,25	0,125	2,5	4,4	1,3840625	704457	5,377583	61037,2	237151,4	
24/08/2012 07:38	756	45360	3,63	0,03	0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	704457	0,341925	1420,57	15509,71	
23/09/2012 07:20	1386	83160	3,73	0,13	-0,1	0,1	0,0316	2,5	4,4	0,3501432	763941	1,268783	29117,9	105512	
19/09/2012 17:00	1425	85500	3,63	0,03	0,1	0,1	0,0316	2,5	4,4	0,3501432	763941	1,243641	29937,2	106331,3	
07/08/2012 07:29	2044	122640	3,67	0,07	-0,04	0,04	0,008	2,5	4,4	0,08858	704457	0,318344	10863,5	39041,73	
11/08/2012 18:02	2044	122640	3,64	0,04	0,03	0,03	0,0052	2,5	4,4	0,0575344	704457	0,229858	7056,02	28189,73	
15/08/2012 07:27	2048	122880	3,65	0,05	-0,01	0,01	0,001	2,5	4,4	0,0110725	704457	0,068401	1360,59	8405,159	
25/07/2012 06:48	2115	126900	3,63	0,03	0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	548098	0,1177	3974,22	14936,18	
10/09/2012 16:49	2848	170880	3,67	0,07	-0,04	0,04	0,008	2,5	4,4	0,08858	763941	0,267405	15136,6	45694,19	
29/07/2012 06:18	2879	172740	3,65	0,05	0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	548098	0,094777	5409,83	16371,79	
04/08/2012 07:34	5008	300480	3,63	0,03	0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	704457	0,078207	9410,36	23499,5	
21/08/2012 19:27	8802	528120	3,65	0,05	-0,02	0,02	0,0028	2,5	4,4	0,0313178	704457	0,057996	16539,5	30628,68	
02/09/2012 09:28	10807	648420	3,64	0,04	0,01	0,01	0,001	2,5	4,4	0,0110725	763941	0,022854	7179,63	14819,04	
			Charge moy	0,0624						Dmoy	0,28		1,428879	652682	3132795
			charge max	0,35						débit max	2,0043366		8,584203		

Annexe 18 : caractéristiques de site de captation et de demande selon les scénarios considérés

Retenue

Scénario : Diminution de taux de MES à 50%

Années	Volume stocké (m3)	Volume des sédiments annuels (m3)
2012	744753	4739
2017	721058	23695
2022	697363	47390
2027	673668	71085
2032	649972	94781
2040	612060	132693

Irrigation

Scénario : Augmentation du besoin en eau de l'irrigation

Années	volume (m3)	surface (ha)
2012	356715	51
2017	499401	71
2022	642087	92
2027	784773	112
2032	927459	133
2040	1155757	165

Scénario : Besoin en eau théorique des cultures

Années	volume (m3)	surface (ha)
2012	167636	51
2017	234690	71
2022	301745	92
2027	368799	112
2032	435854	133
2040	543141	165

Scénario : Irrigation goutte à goutte

Années	volume (m3)	surface (ha)
2012	18309	51
2017	25633	71
2022	32956	92
2027	40280	112
2032	47603	133
2040	59321	165

Abreuvement

Scénario : Augmentation du besoin en eau de bétails

Années	Nombre de tête	V (m³)
2017	71093	2177
2022	86888	2677
2027	102682	3178
2032	118477	3679
2040	143748	4480

Source : Auteur, 2013

Annexe 19: Dépouillement des jaugeages à la station de Kierma

Tableau 14: Résultat de dépouillement des jaugeages à la station de KIER 1

Date	Cotes (cm)	Date de début et de fin du jaugeage	Débit (m³/s)
05/08/2012	208	02H55 à 03H40	3.01

Un seul jaugeage fait à cette station était en période de hautes eaux avec un déversement de la retenue. Cela s'explique par le fait que le projet n'a pas mis à la disposition des équipes un moyen de transport pour faire la navette entre les deux sites. Pour les prochaines campagnes à venir, on recommande au projet de mettre à la disposition de la DEIE un moyen de transport pendant toute la période de jaugeage afin de permettre aux équipes de faire la navette entre les différents sites en cas de nécessité.

Annexe 20 : Note de calcul pour l'analyse fréquentielle (utilisation de loi de Gauss)

1. Données brutes

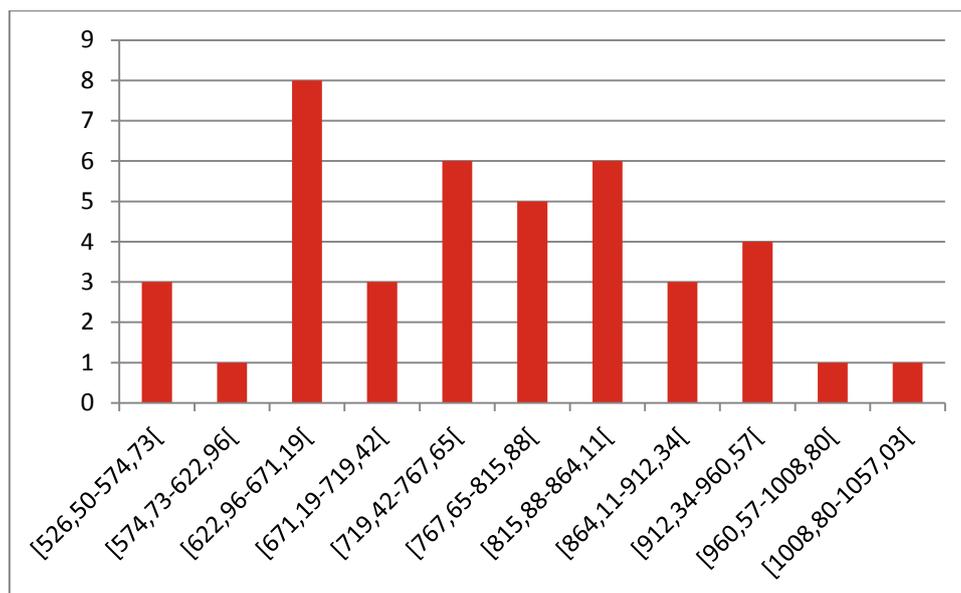
Années	Pluie (mm)	Années	Pluie (mm)
1972	830	1994	1009
1973	657	1995	779
1974	877	1996	758
1975	861	1997	544
1976	800	1998	1008
1977	796	1999	851
1978	873	2000	638
1979	774	2001	583
1980	956	2002	669
1981	735	2003	647
1982	870	2004	746
1983	642	2005	861
1984	616	2006	659
1985	707	2007	527
1986	757	2008	726
1987	701	2009	855
1988	930	2010	725
1989	859	2011	661
1990	711	2012	667
1991	920		
1992	918		
1993	782		

2. Statistique descriptive des données brutes

Minimum	526,500
Maximum	1008,800
Moyenne	767,746
Ecart-type (n-1)	121,245
Coefficient de variation	0,156

3. Effectif pour chaque intervalle de pluie définie

$$\textit{Amplitude} = (\text{Max} - \text{Min}) \times 0,1$$



4. Fréquence expérimentale

Formule de Hazen :

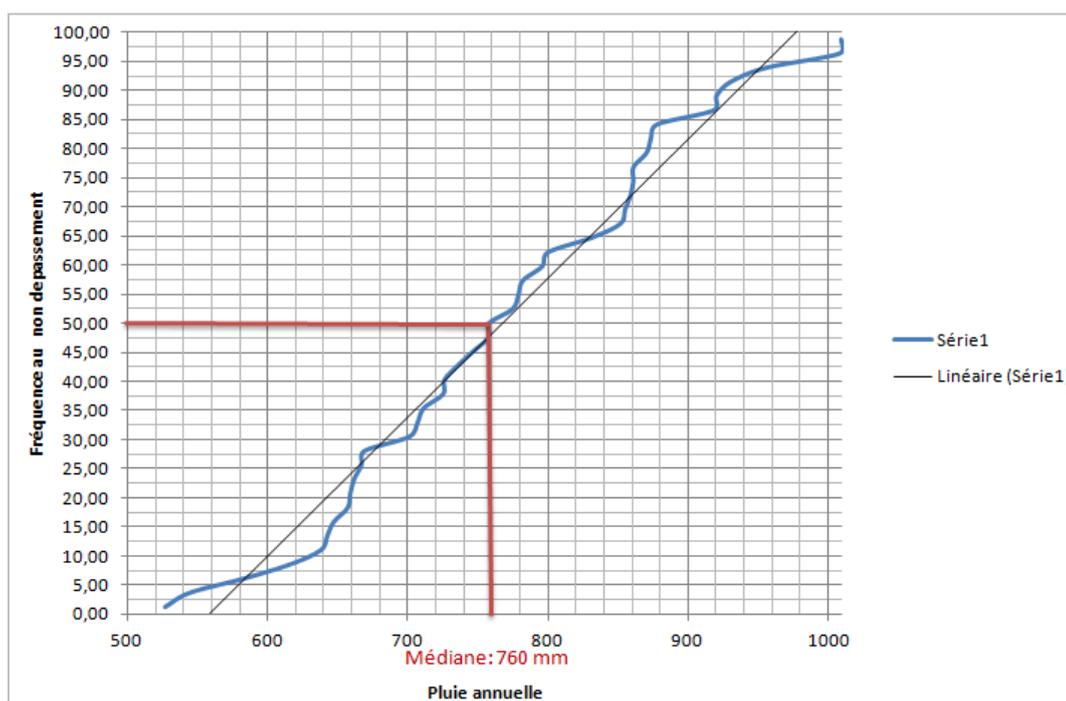
$$F(xi) = \frac{r - 0,5}{n}$$

Où : n : taille de l'échantillon et r : rang de l'échantillon

Années	Pluie (mm): xi	Rang: i	Fréquence expérimentale F *(xi)	F en pourcentage
2007	527	1	0,012	1,22
1997	544	2	0,037	3,66
2001	583	3	0,061	6,10
1984	616	4	0,085	8,54
2000	638	5	0,110	10,98
1983	642	6	0,134	13,41
2003	647	7	0,159	15,85
1973	657	8	0,183	18,29
2006	659	9	0,207	20,73
2011	661	10	0,232	23,17
2012	667	11	0,256	25,61
2002	669	12	0,280	28,05
1987	701	13	0,305	30,49
1985	707	14	0,329	32,93
1990	711	15	0,354	35,37
2010	725	16	0,378	37,80
2008	726	17	0,402	40,24
1981	735	18	0,427	42,68

« Elaboration d'un outil d'évaluation et de planification des ressources en eau des retenues hydro-agricoles : application du modèle WEAP à la retenue de Kierma »

2004	746	19	0,451	45,12
1986	757	20	0,476	47,56
1996	758	21	0,500	50,00
1979	774	22	0,524	52,44
1995	779	23	0,549	54,88
1993	782	24	0,573	57,32
1977	796	25	0,598	59,76
1976	800	26	0,622	62,20
1972	830	27	0,646	64,63
1999	851	28	0,671	67,07
2009	855	29	0,695	69,51
1989	859	30	0,720	71,95
2005	861	31	0,744	74,39
1975	861	32	0,768	76,83
1982	870	33	0,793	79,27
1978	873	34	0,817	81,71
1974	877	35	0,841	84,15
1992	918	36	0,866	86,59
1991	920	37	0,890	89,02
1988	930	38	0,915	91,46
1980	956	39	0,939	93,90
1998	1008	40	0,963	96,34
1994	1009	41	0,988	98,78



5. Ajustement numérique et graphique

Estimation des quantiles :

$$X_p = m + U_p \times S$$

Où :

X_p : quantile à la probabilité p

U_p : variable réduite à la probabilité p

m : Moyenne

S : Écart type

$$F = 0,5 \rightarrow U = -1,39214E-16$$

$$F=0,05 \rightarrow U = -1,644853627 \rightarrow X_{0,05} = 569 \text{ mm}$$

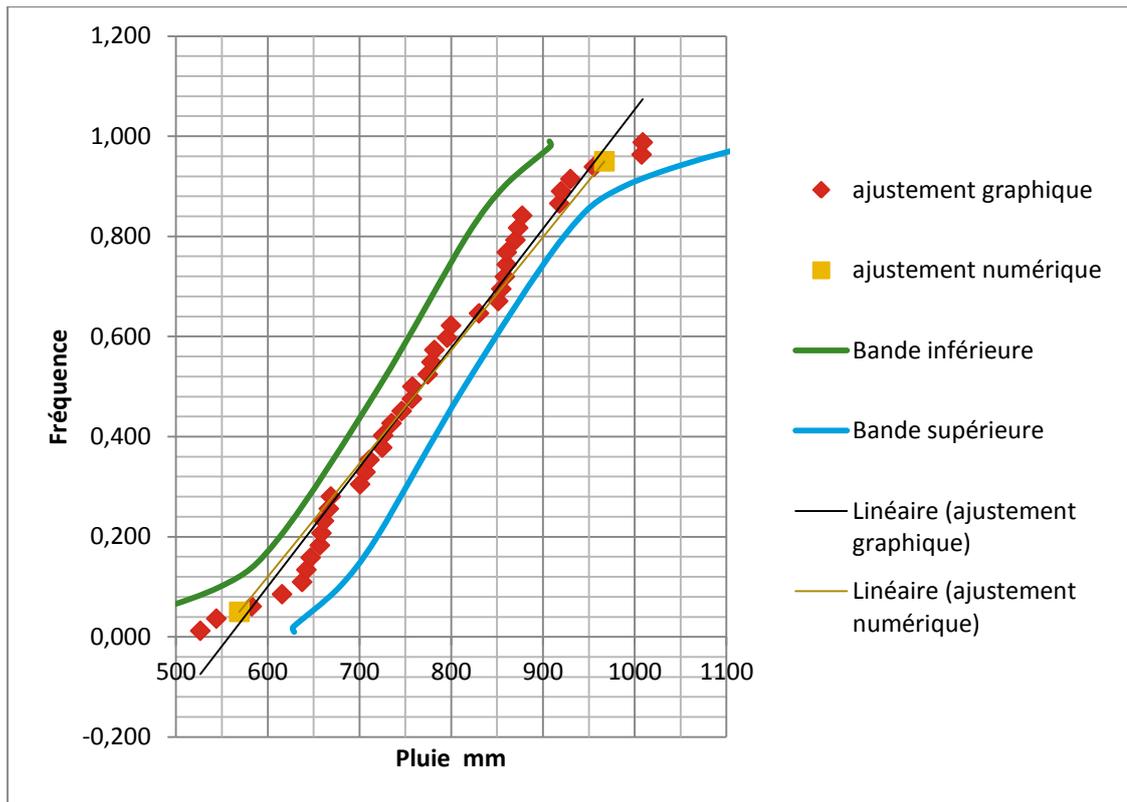
$$F = 0,95 \rightarrow U = 1,644853627 \rightarrow X_{0,95} = 967 \text{ mm}$$

$$\text{Droite de Henry (D) : A (569 ; 0,05) et B (967 ; 0,95) } \rightarrow X = 121 U + 768$$

Intervalle de confiance de 95% : $\alpha = 95\%$ et $k=1,96$

F(xi)	ui	m+Su	b[F(xi)]	ksb[F(xi)]/(n)^0.5
0,01	-2,33	486,5	3,84	142,2
0,02	-2,05	519,5	2,92	108,2
0,1	-1,28	612,9	1,76	65,2
0,2	-0,84	666,2	1,43	53,0
0,5	0,00	768,0	1,25	46,3
0,8	0,84	869,8	1,43	53,0
0,9	1,28	923,1	1,76	65,2
0,98	2,05	1016,5	2,92	108,2
0,99	2,33	1049,5	3,84	142,2

F(xi)	xmini	xmaxi
0,01	344,3	628,7
0,02	411,3	627,6
0,1	547,7	678,1
0,2	613,2	719,1
0,5	721,7	814,3
0,8	816,9	922,8
0,9	857,9	988,3
0,98	908,4	1124,7
0,99	907,3	1191,7



6. Débit entrant au niveau de la retenue de Kierma pour les années futures

Temps de retour	Pluie annuelle (mm)	Coefficient d'écoulement (ke)	Coefficient d'abattement (A)	Volume annuel (m3)	Débit Q (m3/s)
5	869,84	0,3	1,057	27393099	0,87
10	923,07	0,3	1,056	29043483	0,92
15	949,63	0,3	1,055	29852788	0,95
20	967,03	0,3	1,055	30376998	0,96
28	986,13	0,3	1,054	30947054	0,98

Tableau explicatif de chaque variable :

Variabes	Formules	Paramètres
Temps de retour : T	$T = \frac{1}{P} = \frac{1}{1-F}$	P : Probabilité de dépassement F : Fréquence au non dépassement (Fréquence expérimentale)

Coefficient d'abattement : A	$A = 1 - 0.001(9 \log_{10}(T) - 0.042 P_{an} + 1.52) \cdot \log_{10}(s)$	Pan : pluie annuelle S : Surface du bassin versant
Volume d'eau écoulee annuellement : Van	$Van (m3) = P_{an} (mm) \times 1000 \times K_e \times A \times S(Km^2)$	Ke : coefficient d'écoulement dépend du type du bassin versant (bassin versant de Kierma catégorie 2 : classification de FAO)
Débit entrant : Q	$Q \left(\frac{m3}{s} \right) = \frac{Van (m3)}{31,54 \times 10^6}$	

Annexe 21 : Coefficient de Nash

Calcul de coefficient de Nash pour le modèle volume d'eau stocké dans la retenue

Années	Observé: qobs	simulé: qsim
2012	744753	744753
2017	697363	678408
2022	649972	612063
2027	602582	545718
2032	555192	479373
2040	479367	373221
Qsimulé		3433536

Formule :

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum(\text{qsim} - \text{qobs})^2}{\sum(\text{Qsim} - \text{qsim})^2}$$

(BERTERRECHE & CHAMPREDONDE, 2008)

Calcul de coefficient de Nash pour le modèle irrigation

Années	Observé: q.obs	simulé: q.sim
2012	356715	356715
2017	445894	499401
2022	535073	642087
2027	624251	784773
2032	713430	927459
2040	856116	1155757
Q. simulé		4366193

(Même formule que la précédente)

Calcul de coefficient de Nash pour le modèle abreuvement de bétails

Années	observé: q.obs	simulé: q.sim
2012	1676	1676
2017	2066	2177
2022	2456	2677
2027	2846	3178
2032	3236	3679
2040	3860	4480
Q.simulé		17866

(Même formule que la précédente)

Annexe 22 : Note de calcul pour le besoin en eau théorique des cultures

Formule :

$$E_{tm} = K_c \times E_{tp}$$

K_c : coefficient cultural (voir tableau ci-dessous). Il varie en fonction de stade de développement des plantes. Dans notre cas nous avons utilisé le K_c moyenne.

Nous avons utilisé l'évapotranspiration référence de FAO : E_{to} . Nous avons choisi la valeur moyenne des chiffres encadrés en rouge dans le deuxième tableau ci-dessous.

TABLEAU 6.5 - Coefficient cultural (k_c) pour certaines cultures saisonnières (valeurs moyennes)

Culture	Phase initiale	Phase de croissance	Phase mi-saison	Phase tardive et recolt
Arachide	0,45	0,75	1,00	0,75
Aubergine	0,45	0,75	1,15	0,80
Betterave à sucre	0,45	0,80	1,15	0,80
Canne à sucre	0,45	0,85	1,15	0,65
Carotte	0,45	0,75	1,05	0,90
Chou	0,45	0,75	1,05	0,90
Concombre	0,45	0,70	0,90	0,75
Coton	0,45	0,75	1,15	0,75
Courge	0,45	0,70	0,90	0,75
Épinard	0,45	0,60	1,00	0,90
Haricot (sec)	0,35	0,75	1,10	0,50
Haricot (vert)	0,35	0,70	1,00	0,90
Laitue	0,45	0,60	1,00	0,90
Maïs (doux)	0,40	0,80	1,15	1,00
Maïs (grain)	0,40	0,75	1,15	0,70
Melon	0,45	0,75	1,00	0,75
Oignon (sec)	0,50	0,75	1,05	0,85
Oignon (vert)	0,50	0,70	1,00	1,00
Pois (frais)	0,45	0,80	1,15	1,05
Poivron	0,35	0,75	1,05	0,90
Pomme de terre	0,45	0,75	1,15	0,75
Sorgho	0,35	0,75	1,10	0,65
Tomate	0,45	0,75	1,15	0,80
Tournesol	0,35	0,75	1,15	0,55

Regions	Mean daily temperature (°C)		
	Cool ~ 10°C	Moderate 20°C	Warm > 30°C
Tropics and subtropics			
- humid and sub-humid	2 - 3	3 - 5	5 - 7
- arid and semi-arid	2 - 4	4 - 6	6 - 8
Temperate region			
- humid and sub-humid	1 - 2	2 - 4	4 - 7
- arid and semi-arid	1 - 3	4 - 7	6 - 9

Tableau récapitulatif des résultats

Culture	Kc	Etp (mm/jour)	Etm (mm/jour)	Nbr jour d'irrigation	Etm (mm)	Etm (m)	surface occupée (ha)	surface occupée (m ²)	volume (m ³)
Aubergine	0,79	7	5,5125	68	374,85	0,37485	11	110000	41234
Choux	0,79	7	5,5125	86	474,075	0,474075	18	180000	85334
Oignon sec	0,79	7	5,5125	46	253,575	0,253575	15	150000	38036
Pastèque	0,74	7	5,1625	9	46,4625	0,046463	6	60000	2788
Tomate	0,7	7	4,9	5	24,5	0,0245	1	10000	245
Total				214	1173,463	1,173463	51	510000	167636

projection

Années	volume (m ³)	V (m ³ /ha)	surface (ha)
2012	167636	3287	51
2017	209545	3287	64
2022	251454	3287	77
2027	293363	3287	89
2032	335272	3287	102
2040	402326	3287	122

Scénario

Années	volume (m ³)	V (m ³ /ha)	surface (ha)
2012	167636	3287	51
2017	234690	3287	71
2022	301745	3287	92
2027	368799	3287	112
2032	435854	3287	133
2040	543141	3287	165

Annexe 23 : Note de calcul pour l'irrigation goutte à goutte

1) Etm

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
Eto	5,44	5,74	5,8	5,5	6,46	7,51
Kc Chou	0,7	0,9	1,05	1,05	1,05	1
Etm chou	3,81	5,36	6,09	5,78	6,78	7,51
KC oignon sec		0,625	0,95	1,05	0,93	0,7
Etm oignon		3,59	5,51	5,78	6,03	5,26
Kc Aubergine	0,7	0,9	1,05	1,05	1,05	1
Etm Aubergine	3,81	5,36	6,09	5,78	6,78	7,51

2) Etm Peak

Etm peak = Etm max.

cultures	Etm Peak
chou	7,51
oignon	6,03
Aubergine	7,51

3) Etm localisé

Hypothèse :

- Couverture du sol : GC = 90% → coefficient de réduction : Kr = 1 (Keller & Karmelli)

Ground cover (GC) in %	Crop ground cover reduction factor Kr		
	Keller & Karmelli	Freeman & Garzoli	Decroix CTGREF
10	0.12	0.10	0.20
20	0.24	0.20	0.30
30	0.35	0.30	0.40
40	0.47	0.40	0.50
50	0.59	0.75	0.60
60	0.70	0.80	0.70
70	0.82	0.85	0.80
80	0.94	0.90	0.90
90	1.00	0.95	1.00
100	1.00	1.00	1.00

Formule : $E_{tm\ localisé} = E_{tm\ peak} \times K_r$

Cultures	E _{tm localisé}
Chou	7,51
Oignon	6,03
Aubergine	7,51

4) Irrigation nette

Formule : $IR_n\ (mm/jour) = E_{Tm\ localisé}\ (mm/jour) - (R + P_e)$

Hypothèses :

- Pas de pluie : $P_e = 0$
- Pas d'apport en eau du sol, seulement le barrage : $R = 0$

$$IR_n = E_{tm\ localisé}$$

cultures	IR _n (mm/jour)
Chou	7,51
Oignon	6,03
Aubergine	7,51

5) Dose réel

Hypothèse : Tour d'eau T(d): 1 jour

Formule : $D_a\ (mm) = T(d) \times IR_n\ (mm/jour)$

cultures	D _a (mm)
Chou	7,51
Oignon	6,03
Aubergine	7,51

6) Dose brute

Hypothèse : Pas de lessivage

Formule : $D_g\ (mm) = \frac{D_a\ (mm)}{E_a} \times LR\ (mm/jour) \times T(d)$

Où :

LR : Lessivage = 0mm/jour

Ea : efficience

L'irrigation localisée a une efficience de 80 à 90%. Nous avons pris la valeur moyenne de 85%

cultures	Dg (mm)
Chou	8,84
oignon	7,09
Aubergine	8,84

7) Volume d'eau à mobiliser

$$V(m3/ha) = Dg(mm) \times 10m3/ha$$

cultures	V (m3/ha)	surface (ha)	Vtotal (m3)	
chou	88	18	1590	
oignon	71	15	1064	
Aubergine	88	11	972	
Total	248	44	3626	(taux de 5%)
	310	44	13640	(taux de 8%)
	359	51	18309	(taux de 8%)

Pour 51 ha avec un taux de 8% d'accroissement : 359 m³/ha

Années	volume (m3)	V (m3/ha)	surface (ha)
2012	18309	359	51
2017	25633	359	71
2022	32956	359	92
2027	40280	359	112
2032	47603	359	133
2040	59321	359	165

Annexe 24: Coût global d'irrigation goutte à goutte :

1. Informations sur l'irrigation à Kierma

Surface irriguée totale : 51 ha

Nombre de producteur : 100

Parcelle moyenne pour chaque producteur : 0,5 ha

2. Coût global d'irrigation goutte à goutte

Irrigation goutte à goutte	Coût min	Coût max
prix d'installation (Dollar/ha)	3000	3950
Prix d'entretien (Dollar/ha)	150	200

Source : Phocaidès , 2001

3. Coût pour une parcelle moyenne de 0,5 ha : C_{0,5}

Hypothèse: temps d'amortissement = 10 ans

Formule de calcul :

$$\text{Coût} = \frac{\text{coût à l'hectare} \times \text{superficie}}{\text{Nombre de de producteur} \times \text{temps d'amortissement}}$$

et

$$C_{0,5} = C_{0,5} \text{ installation} + C_{0,5} \text{ entretien}$$

	Coût min	Coût max
C _{0,5} installation	150	197,5
C _{0,5} entretien	7,5	10
C _{0,5} (Dollar/0,5ha/producteur/an)	157,5	207,5
C _{0,5} (Dollar/0,5ha/producteur/mois)	13	17
C_{0,5}(FCFA/0,5ha/producteur/mois)	6563	8646

Annexe 25 : Note de calcul pour le rehaussement du barrage

❖ Surface

Date	H échelle (m)	Surface mesurée (m ²)	H rehaussée (m)	Surface rehaussée (m ²)
15/04/2012	0	0	0,5	61861
30/05/2012	0	0	0,5	61861
23/03/2012	0,18	99811	0,68	86194
23/02/2012	1,68	211496	2,18	367928
23/01/2012	2,18	386450	2,68	507663
31/12/2012	2,67	488015	3,17	674860
06/07/2012	2,82	587682	3,32	732758
03/12/2012	2,99	606710	3,49	802473
09/10/2012	3,52	824650	4,02	1049866
29/08/2012	3,56	825900	4,06	1070496
27/07/2012	3,59	834693	4,09	1086157
	3,6	849992	4,1	1091413

Surface perdue = surface rehaussée maximum – surface mesurée maximum

$$\text{Surface perdue} = 1091413 - 849992 = 241\,421\text{m}^2$$

❖ Volume

Date	H échelle (m)	Volume d'eau actuel (m ³)	H rehaussée (m)	Volume d'eau rehaussé (m ³)
15/04/2012	0	0	0,5	66053
30/05/2012	0	0	0,5	66053
23/03/2012	0,18	2711	0,68	85921
23/02/2012	1,68	73233	2,18	365916
23/01/2012	2,18	171226	2,68	509596
31/12/2012	2,67	341512	3,17	677564
06/07/2012	2,82	425626	3,32	734606
03/12/2012	2,99	477154	3,49	802540
09/10/2012	3,52	714285	4,02	1037461
29/08/2012	3,56	725468	4,06	1056651
27/07/2012	3,59	726824	4,09	1071180
	3,6	744753	4,1	1076049

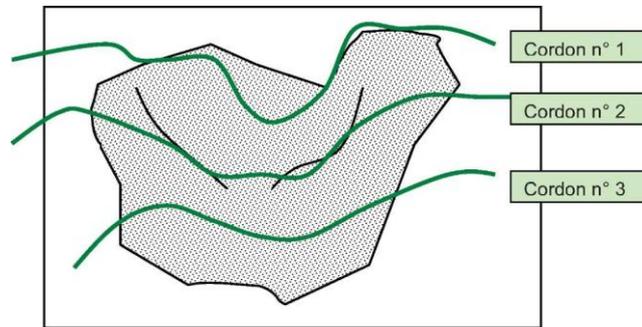
Gain en volume = volume rehaussé maximum – volume actuel maximum

$$\text{Gain en volume} = 1076049 - 744753 = 331\,296\text{m}^3$$

Annexe 26: Quelques moyens antiérosifs

❖ Cordon de paille :

Le cordon de paille est une rangée de paille fixée par des piquets suivant les courbes de niveau. Cette mesure consiste à ralentir la force de l'eau à travers la régénération d'une couverture végétale.



Cordon de Pierre

Source : PLAE ,2008

❖ Diguette en pierres

La diguette en pierres est un dispositif filtrant construit avec des cailloux. Elle est aussi installée suivant les courbes de niveau mais l'écartement entre deux diguette est beaucoup plus large.



Diguette de pierre

Source : PLAE ,2008

❖ Haies antiérosives

Utilisation de plante à racine très développée comme le Vétiver et le Sisal. Ces haies doivent avoir une bonne reprise et une bonne fermeture.



Eclat de souche du vétiver et le développement de son système racinaire

Source : PLAE ,2008