



CONCEPTION D'UN MODÈLE TECHNIQUE POUR LE PILOTAGE DE L'IRRIGATION DE COMPLÉMENT À PARTIR DES BASSINS DE COLLECTE DES EAUX DE RUISSELLEMENT

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGÉNIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : EAUX AGRICOLES

Présenté et soutenu publiquement le 25 juin 2013 par :

ALI ABBA

Travaux dirigés par :

Sévère FOSSI

Ingénieur de Recherche au CCREC

Hassane GADO

Ingénieur de Recherche au CCREC

Sewa Koffi da SILVEIRA

Enseignant au CCREC

Jury d'évaluation du stage :

Président : Hamma YACOUBA

Membres et correcteurs : Amadou KEÏTA

Sewa Koffi da SILVEIRA

Promotion 2011/2013



“Education is the most powerful weapon which you can use to change the world.”

Nelson Mandela

À mes parents, qui n'ont jamais cessé de me soutenir et me faire confiance.

REMERCIEMENTS

Arrivé au terme de mon cycle de Master en ingénierie de l'eau, qu'il me soit permis d'exprimer mes sincères hommages et ma reconnaissance aux personnes physiques et morales sans qui ce mémoire n'aurait pu être rédigé. Il s'agit de :

- L'ensemble du personnel enseignant de la fondation 2iE, pour la qualité de l'enseignement transmis ;
- Le Centre de Recherches pour le Développement International (CRDI), pour avoir financé le Projet Irrigation de Complément et Information Climatique (PICIC), sans lequel ce stage n'aurait eu lieu ;
- Mes encadreurs M. Sévère FOSSI, M. Hassane GADO, Ingénieurs de Recherches à 2iE, et M. Sewa Koffi da SILVEIRA, enseignant à 2iE, pour n'avoir à aucun moment hésité à m'éclaircir sur mes zones d'ombres lors du déroulement de ce stage ;
- Dr Dial NIANG, enseignant chercheur en hydrologie à 2iE, pour la fourniture de données climatiques et les remarques très pertinentes apportées dans l'élaboration de ce document ;
- M. Roland YONABA, Ingénieur en eau et assistant de recherches à 2iE, pour son aide et tous les conseils prodigués dans l'écriture de ce modèle ;
- M. Ibrahim KABORÉ et M. Brahim Bokor MAHAMAT TAHIR, Ingénieurs de travaux en Topographie et SIG, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée dans l'élaboration des différentes cartes ;
- Tous les stagiaires 2iE du projet PICIC aux noms de Christine RAZANAMAHANDRY, Faïzatou ROUAMBA, Florence GAJU KAGABIKA, Lionel OUEDRAOGO, Romuald OMBALA, et Taliby KEÏTA, pour l'atmosphère conviviale qu'ils ont su préserver lors du déroulement de ce stage ;
- Mes parents, frères et sœurs, pour leur soutien moral et financier tout au long de cette formation.

RÉSUMÉ

La présente étude est menée dans la partie sahélienne du Burkina Faso, zone particulièrement sensible comme l'ensemble du Sahel africain confronté depuis plusieurs décennies à des phénomènes de sécheresse et de désertification. En effet, la saison des pluies généralement de courte durée (entre 3 et 4 mois) est caractérisée par une succession de plusieurs cycles humides et secs de durée variable pouvant affecter le cycle végétatif des cultures. Dans ce contexte de changement climatique, plusieurs démarches ont été entreprises pour diminuer cette dépendance de l'agriculture envers les pluies, et celle qui concerne notre étude est l'utilisation de Bassins de Collecte des Eaux de Ruissellement (BCER) pour endiguer les poches de sécheresse.

Pour mener à bien cette étude, un modèle technique de gestion de l'eau stockée dans les BCER a été développé. Ce modèle, appelé « modèle technique de gestion de l'eau des BCER » ou « MTGE_BCER 2013 », permettra un meilleur pilotage de l'irrigation de complément à partir des BCER. Il s'agit d'un outil simple à l'utilisation écrit sur Microsoft Excel 2010, dont les paramètres d'entrée sont de type climatique, agricole, édaphique, humain et dimensionnel.

Les principales informations fournies par le modèle sont les volumes consommés (infiltré, évaporé...), et les durées d'autonomie en jours (parcelle, BCER) pendant une séquence sèche.

Le classeur est organisé sous forme de feuilles de calculs, et d'une interface. En plus des paramètres de sortie numériques, l'interface présente un histogramme de répartition des différentes consommations faites de l'eau des BCER, en termes de pourcentages. Par ailleurs, elle présente une zone d'avertissement et une zone de suggestions.

Le cas pratique d'un BCER de 300m³ appartenant à un producteur cultivant du maïs Barka dans le village de Mogodin a été étudié. Les résultats indiquent que la diminution de toutes les consommations non agricoles n'a pas un impact significatif sur l'autonomie du BCER. Par ailleurs, pour une séquence sèche de 16 jours en phase de floraison, il est possible d'irriguer au maximum environ 0.25ha. Pour une même durée de séquence sèche, le volume d'eau nécessaire pour irriguer 4.5ha est estimé à environ 210m³.

Mots-clefs:

-
- 1- Irrigation de complément
 - 2- Modèle technique de gestion
 - 3- Poche de sécheresse
 - 4- BCER
 - 5- Information climatique.

ABSTRACT

This study is conducted in the Sahelian part of Burkina Faso, particularly sensitive area as the entire African Sahel faces since several decades to phenomena of drought and desertification. Indeed, the rain season generally has a short duration (between 3-4 months), and is characterized by a succession of wet and dry cycles of variable duration may affect the crop growth cycle. In the context of climate change, several steps were taken to reduce this dependence on agriculture to the rains and the terms of our study is the use of Pools of Rainwater Runoff (BCER) to face to the pockets of drought.

To carry out this study, a technical management model of water stored in BCER was developed. This model called "technical management model of BCER's water" or "MTGE_BCER 2013", will allow a better control of supplemental irrigation from BCER. It is a simple tool to use written on Microsoft Excel 2010, including the input parameters are climatic, agricultural, edaphic, human and dimensional.

The main information provided is the volumes consumed (infiltrated, evaporated ...), and durations of autonomies in days (plots, basin) during a dry spell.

The workbook is organized in the form of spreadsheets, and an interface. Further to the numerical output, the interface presents a histogram of the distribution of different consumptions made of BCER's water, in terms of percentages. It also has a warning zone and a zone of suggestions.

The practical case of a BCER of 300m³ belonging to a producer growing Barka's corn in the village of Mogodin was studied. The results indicate that the reduction of all non-agricultural consumptions does not have a significant impact on the autonomy of the BCER. Moreover, for a dry spell of 16 days at the flowering stage, it is possible to irrigate a maximum of about 0.25ha. For the same dry spell, the volume of water needed to irrigate 4.5ha is estimated at 210m³.

Keywords:

-
- 1- Supplemental irrigation
 - 2- Technic management model
 - 3- Pocket drought
 - 4- BCER
 - 5- Climate information.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie

AZND : Association Zood Nooma pour le Développement

AZN : Association Zoramb Naagtaaba

BCER : Bassin de Collecte des Eaux de Ruissellement

CCREC : Centre Commun de Recherche « Eau et Climat »

CRDI : Centre de Recherche pour le Développement International

LEAH : Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau

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

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONEDD : Office National de l'Environnement et du Développement Durable

ONG : Organisation Non Gouvernementale

SIDESA : Syndicat Interdépartemental de l'eau Seine Aval

SIG : Système d'Information Géographique

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS	vi
TABLE DES MATIÈRES	1
LISTE DES TABLEAUX.....	4
LISTE DES FIGURES.....	5
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	6
I. PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS	8
I.1. Présentation de la zone d'études	8
I.1.1. Situation géographique	8
I.1.2. Climat.....	8
I.1.3. Relief et sols.....	10
I.1.4. Végétation	10
I.1.5. Hydrographie	11
I.1.6. Population	11
I.1.7. Activités économiques	12
I.2. Objectifs de l'étude	12
I.2.1. Objectif global	12
I.2.2. Objectifs spécifiques	12
II. DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	13
II.1. Revue de la littérature	13
II.1.1. Quelques définitions	13
II.1.2. Synthèse de travaux antérieurs.....	14
II.2. Identification des différents paramètres hydro climatiques et agronomiques du modèle. 15	
II.2.1. Enquête de terrain	15
II.2.2. Détermination du coefficient de ruissellement Cr	17
II.2.3. Détermination des réserves hydriques du sol : réserve utile et réserve facilement utilisable.....	18
II.2.4. Détermination de l'évaporation	20
II.2.5. Détermination de l'infiltration	20
II.2.6. Détermination des besoins en eau des plantes	20

II.3. Hypothèses émises	23
II.4. Formules des différents paramètres de sortie.....	24
II.4.1. Volume du bassin V	24
II.4.2. Volume ruisselé Vr	24
II.4.3. Volume stocké dans le bassin Vst.....	24
II.4.4. Réserve utile RU	25
II.4.5. Réserve facilement utilisable RFU	25
II.4.6. Besoins en eau du stade végétatif BE	25
II.4.7. Nombre de jours avant le déclenchement de l'irrigation d'appoint.....	26
II.4.8. Hauteur totale d'eau infiltrée dans le bassin Htinf.....	26
II.4.9. Hauteur totale d'eau évaporée du bassin Htev	26
II.4.10. Hauteur d'eau totale allouée à la consommation humaine Htchu, au cheptel Htchp, à la fabrication des briques Htfb, et à la fosse fumièrè Htff	26
II.4.11. Volume disponible pour l'irrigation V _{irr}	27
II.4.12. Hauteur d'eau allouée aux plantes Hpl	27
II.4.13. Autonomie du BCER sous irrigation d'appoint N _{irr}	28
II.4.14. Volume restant à la fin de la séquence sèche V _{rest}	28
III. TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS	29
III.1. Contexte d'utilisation du modèle	29
III.1.1. Zones climatiques concernées.....	29
III.1.2. Géométrie des bassins.....	29
III.1.3. Cultures disponibles dans le modèle.....	29
III.1.4. Superficies des parcelles irriguées	29
III.1.5. Bassin versant	30
III.2. Description du fonctionnement du MTGE_BCER 2013	30
III.2.1. Organisation du classeur	30
III.2.2. Description de l'interface.....	30
III.3. Outils utilisés dans l'écriture du modèle.....	33
III.4. Conditions de déclenchement de l'irrigation d'appoint.....	34
III.5. Contraintes et verrous	34
III.5.1. Compatibilité de la durée de cycle des cultures.....	34
III.5.2. Verrouillage des cellules.....	35
IV. QUATRIÈME PARTIE : EXEMPLE D'APPLICATION DU MTGE_BCER 2013	37

IV.1. Présentation du cas d'étude.....	37
IV.2. Discussion	37
IV.2.1. Durée de la séquence sèche inférieure ou égale à 10 jours.....	38
IV.2.2. Durée de la séquence sèche supérieure à 10 jours	39
V. DISCUSSION.....	41
CONCLUSION	43
BIBLIOGRAPHIE	44
ANNEXES	46
Annexe 1 : Questionnaire 1	I
Annexe 2 : Questionnaire 2	V
Annexe 3 : Valeurs par défaut du modèle	VI
Annexe 4 : Macro d'affichage des besoins en eau : « Watercrop »	VII
Annexe 5 : Macros des messages d'ouverture et de fermeture	VIII

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Coefficient de ruissellement relatif à diverses surfaces	18
Tableau 2: Réserve utile pour quelques types de sol selon Withers & Vipond (1974).....	19
Tableau 3: Différentes spéculations pratiquées dans la zone	21
Tableau 4: Évapotranspirations potentielles de juin en octobre.....	22
Tableau 5: ETM du maïs par stade.....	22
Tableau 6: Récapitulatif des ETM des différentes cultures en fonction du stade végétatif	22
Tableau 7: Durée de cycle maximale en fonction de la zone climatique	35
Tableau 8: Quantité d'eau allouable aux différents usages	38
Tableau 9: Autonomie maximale du BCER en fonction de la superficie irriguée.....	39
Tableau 10: Facteurs de déplétion.....	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude.....	8
Figure 2: Carte des isohyètes de la zone d'études.....	9
Figure 3: Carte régionale de la durée de la saison pluvieuse en 2012 au Burkina Faso	9
Figure 4: Évapotranspiration de référence et pluviométrie moyennes mensuelles de la station de Ouahigouya de 1970 à 2009.....	10
Figure 5: Réseau hydrographique de la zone d'études	11
Figure 6: Focus groupe avec le groupement NABONSWENDÉ à Mogodin.....	16
Figure 7: Différentes utilisations de l'eau des BCER selon les personnes interrogées	17
Figure 8: Répartition des différents types de réserves hydriques dans le sol.....	18
Figure 9: Différents types d'eau au voisinage d'un grain dans le sol (Polubrina-Kochina in Castany).....	19
Figure 10: Profils d'humidités caractéristiques	20
Figure 11: Différentes dimensions du bassin	24
Figure 12: Interface du modèle MTGE_BCER.....	30
Figure 13: Zone de renseignements	31
Figure 14: Zone de graphique	31
Figure 15: Zone d'avertissements.....	31
Figure 16: Zone de suggestions.....	32
Figure 17: Zone de paramètres d'entrée	32
Figure 18: Zone de paramètres de sortie	33
Figure 19: Aperçu du volet "Contrôles" sur Excel 2010.....	33
Figure 20: Aperçu du volet "Outils de données" sur Excel 2010 ;.....	34
Figure 21: Fenêtre d'avertissement 1.....	35
Figure 22: Fenêtre d'avertissement 2.....	36
Figure 23: Étude de cas, résultats.....	38
Figure 24: Autonomie maximale du BCER en fonction de la superficie irriguée	40
Figure 25: Bande du Sahel en Afrique	41

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En Afrique, et plus précisément en zones arides et semi-arides, l'eau constitue le principal facteur limitant pour le développement du secteur agricole. Ceci est dû à plusieurs facteurs comme le faible cumul pluviométrique mais surtout à la forte irrégularité spatio-temporelle des pluies. Le Burkina Faso, pays sahélien est aussi confronté à ce phénomène puisque les cultures pluviales de ce constituent l'essentiel des revenus des populations rurales. En effet, avec la succession de cycles secs durant la période hivernale, le bilan hydrique est généralement déficitaire pour les cultures. Pour le maïs, ce manque d'eau est à l'origine d'une réduction de plus de 60% de la production totale en graines d'où une perte énorme de revenus (Watson & al., 1998), pour des populations déjà éprouvées.

Afin d'optimiser les rendements et de réduire les impacts des changements climatiques, plusieurs techniques culturales comme l'irrigation d'appoint, l'utilisation de variétés adaptées, l'utilisation de techniques de conservation des eaux et des sols ont été développées (Chetaille & Lagandré, 2010).

C'est dans ce contexte que cette étude a été initiée dans le cadre d'un projet initié et piloté par le 2iE avec comme intitulé « Projet d'Irrigation de Complément et Information Climatique », financé par le Centre de Recherche pour le Développement International (CRDI). Ce projet vise à proposer une stratégie d'adaptation innovante et intégrée pour faire face aux poches de sécheresse durant la saison des pluies. La démarche adoptée consiste à pratiquer l'irrigation de complément à partir de Bassins de Collecte des Eaux de Ruissellement (BCER) en vue de corriger le déficit hydrique des cultures. Les BCER sont des retenues servant à collecter les eaux de ruissellement de la pluie. L'utilisation optimale de ces BCER doit répondre à plusieurs questionnements : Quelles superficie et spéculon pourrait-on irriguer avec la quantité d'eau disponible dans le bassin ? Quel est le moment propice pour déclencher l'irrigation d'appoint ? Quels sont les possibilités d'utilisation (domestique, agricole, pastorale) qui s'offrent pour la quantité d'eau disponible ?

C'est pour répondre à ces différentes questions qu'un modèle de gestion de l'eau des BCER a été construit pour faciliter la simulation de plusieurs scénarios et la prise de décisions rapides pour l'exploitant dans la conduite des cultures.

La présente étude vise à identifier et à intégrer les paramètres hydro-climatiques liés à la mobilisation des eaux de ruissellement, et les paramètres agronomiques liés à l'irrigation, afin de concevoir un modèle de gestion de l'irrigation de complément à partir des BCER. Ce document est articulé sur cinq parties. La première partie synthétise l'ensemble des caractéristiques

climatiques et des habitudes agricoles de la zone d'étude. Quant à la seconde partie, elle présente le matériel et les méthodes, alors que la troisième partie résume l'ensemble des résultats obtenus. La quatrième partie concerne un exemple d'application, complété de la discussion dans la cinquième partie, d'une conclusion générale et des recommandations pour l'amélioration du modèle.

I. PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS

I.1. Présentation de la zone d'études

I.1.1. Situation géographique

La province du BAM est située dans la région du Centre Nord du Burkina Faso, et a pour chef-lieu la ville de Kongoussi (située à 110km de Ouagadougou, la capitale politique du pays). Elle est délimitée au Nord par la province du Soum, à l'Est par la province du Sanmatenga, à l'Ouest par la province du Yatenga, et au Sud-Ouest par la province du Passoré (figure 1). Elle s'étend sur une superficie de 4 084 km².

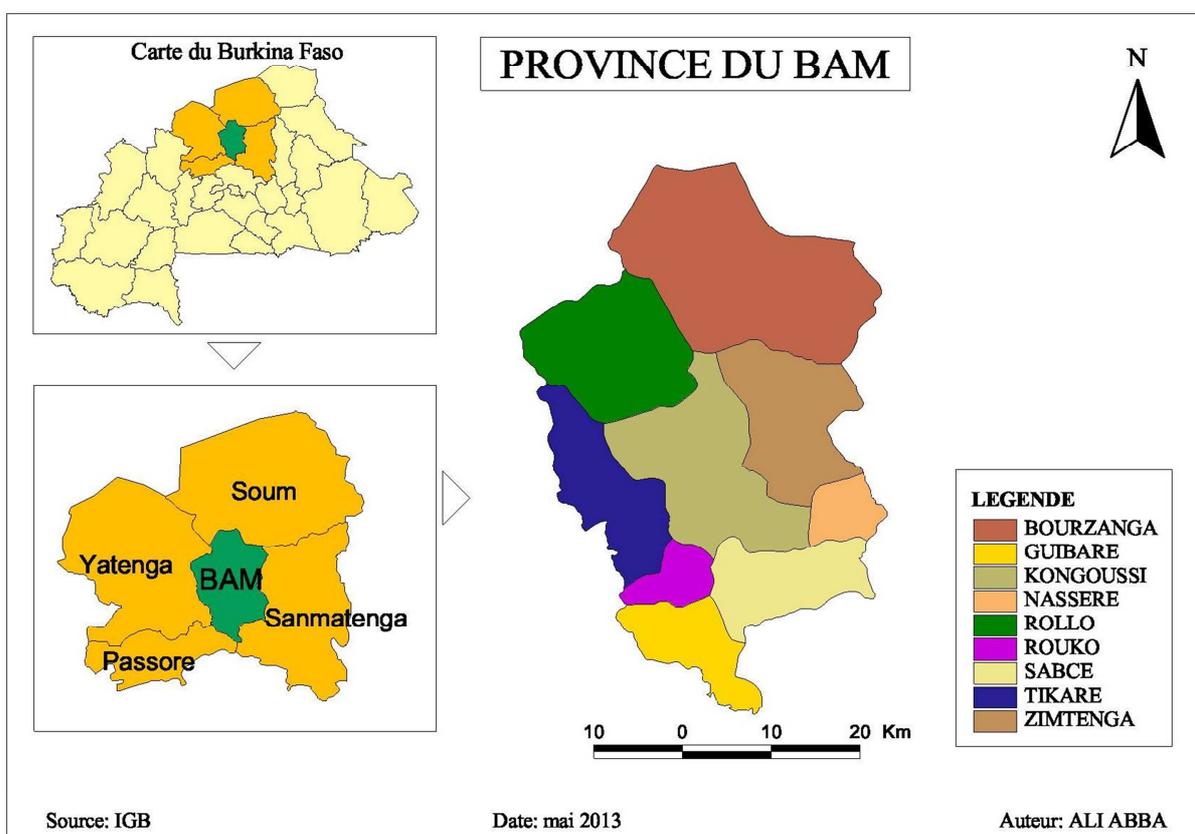


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude

I.1.2. Climat

La province du BAM est caractérisée par deux nuances climatiques du Sud au Nord (figure 2). Au Sud règne un climat soudano sahélien avec une pluviométrie moyenne annuelle variant entre 600 et 750mm ; tandis qu'au nord il est de type sahélien, et la pluviométrie y atteint rarement 600mm.

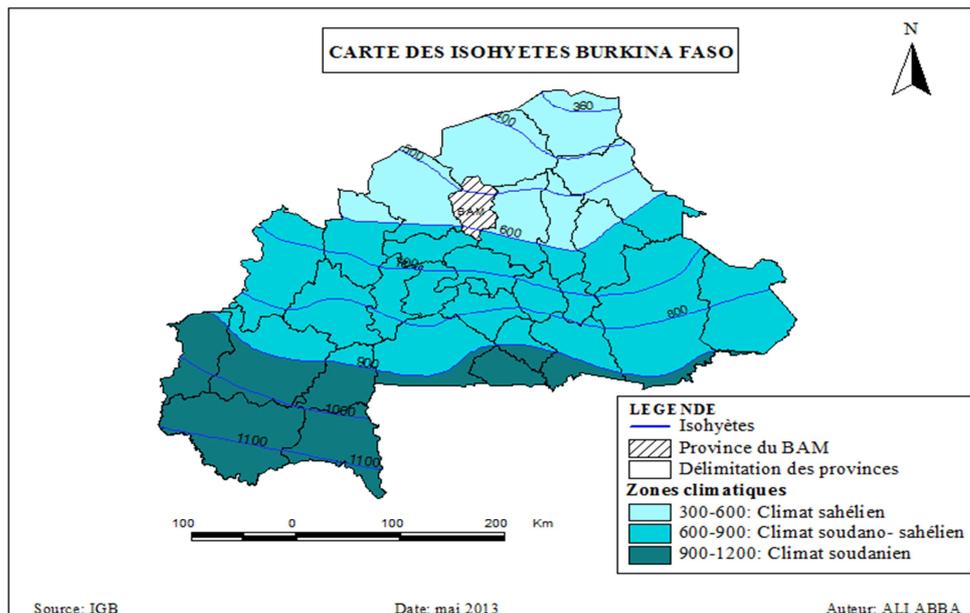


Figure 2: Carte des isohyètes de la zone d'études

On y observe deux saisons distinctes :

- Une longue saison sèche durant entre 8 et 9 mois : elle débute autour du mois de septembre pour se terminer en fin mai ;
- Et une courte saison de pluies de 3 à 4 mois qui débute en général en début juillet pour prendre fin en début septembre.

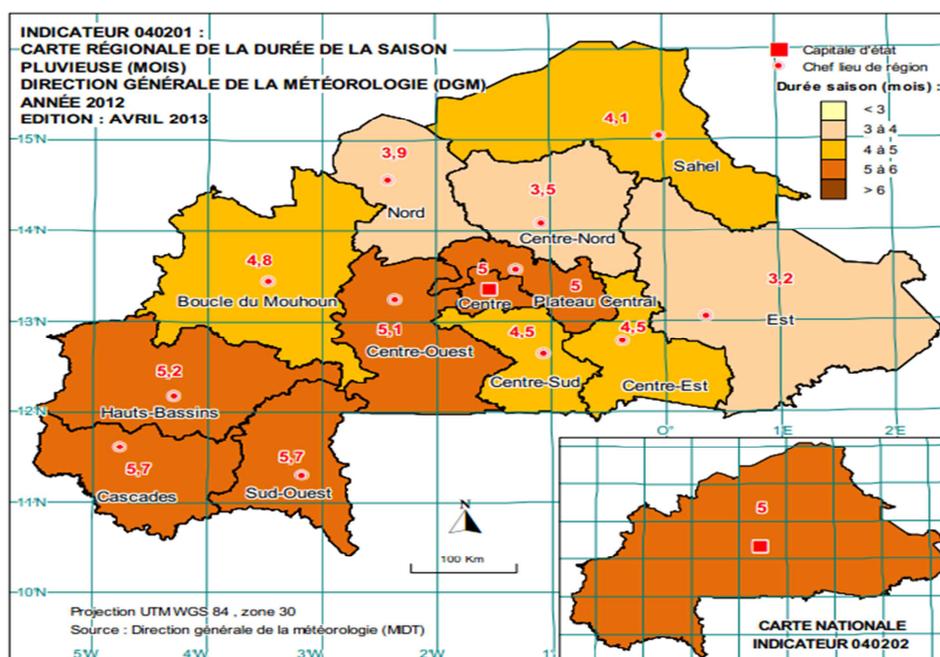


Figure 3: Carte régionale de la durée de la saison pluvieuse en 2012 au Burkina Faso

Source : Direction Générale de la Météorologie (DGM), avril 2013

Du fait de l'absence de données météorologiques propres à la province du Bam, les données climatiques utilisées proviennent de la région du Nord (contexte climatique similaire), plus précisément de la station synoptique de Ouahigouya.

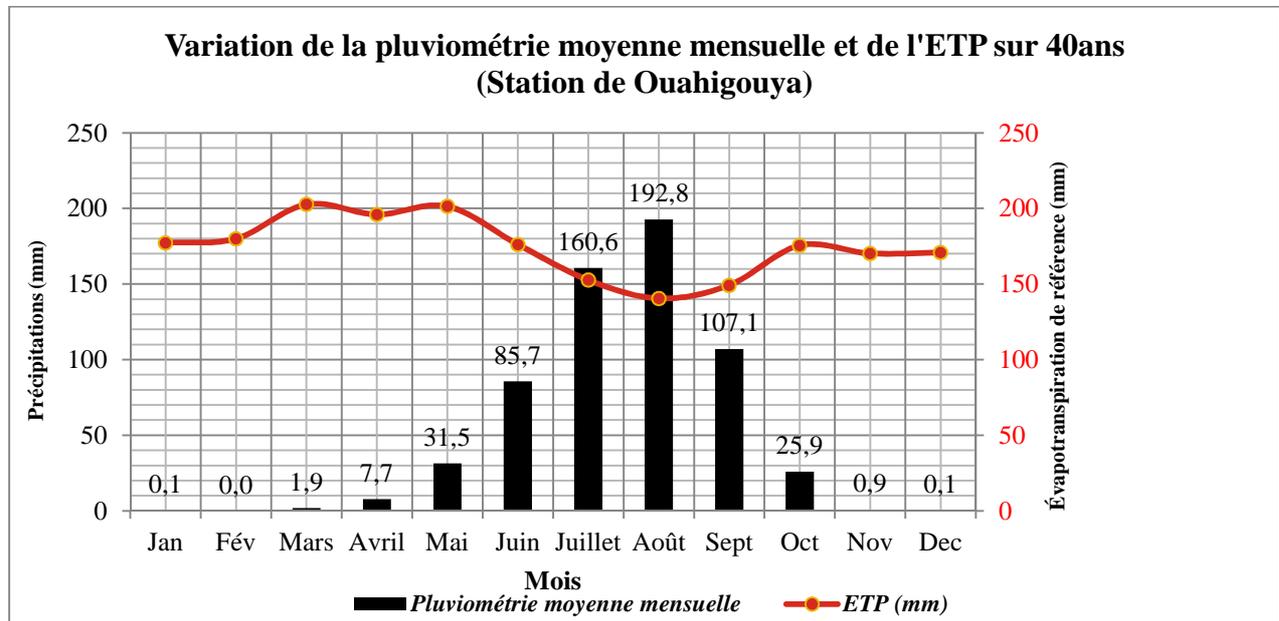


Figure 4: Évapotranspiration de référence et pluviométrie moyennes mensuelles de la station de Ouahigouya de 1970 à 2009

L'observation de la figure 4 montre un déficit hydrique sur toute l'année sauf pour les mois de juillet et août, mois les plus pluvieux de l'année.

I.1.3. Relief et sols

La province du Bam est essentiellement constituée de formations collinaires. Cependant, on observe aussi quelque pénéplaine. L'altitude de la zone varie entre 350 et 400mm (Bado & Zongo, 2009).

Les sols de la province sont à prédominance ferrugineux tropicaux à deux variantes : des sols ferrugineux tropicaux peu profonds et lessivés sur les glacis et les plateaux, et des sols ferrugineux tropicaux profonds dans les bas-fonds.

I.1.4. Végétation

La végétation est constituée de savane arborée dans le Sud et de savane aux hautes herbes au Nord, tendant à remplacer les steppes d'épineux. La région regorge d'une forte diversité biologique, et plus d'une soixantaine d'espèces fournissent des produits forestiers non ligneux (PFNL). Il s'agit des produits des arbres autres que le bois, à savoir fruits, graines, feuilles, fleurs, écorces, racines, etc. On retient en particulier Acacia Senegal (gomme arabique en

peuplement naturel ou en plantation), *Vitellaria paradoxa* (karité), *Tamarindus Indica* (tamarinier), *Bombax costatum* (kapokier rouge), *Adansonia digitata* (baobab)...etc.

I.1.5. Hydrographie

Le réseau hydrographique (figure 5) de la région du Centre-Nord, dont fait partie la province du Bam, s'organise autour de deux bassins versants principaux : Le bassin versant du Nakambé à l'Ouest et au Centre Sud et le sous bassin versant du Niger, constitué de la Sirba à l'Est et de la Faga au Nord. Les deux bassins collectent les principales eaux de la région et les drainent vers les principaux cours d'eau. Le Nakambé est le plus important, et ne sèche qu'une partie de l'année.

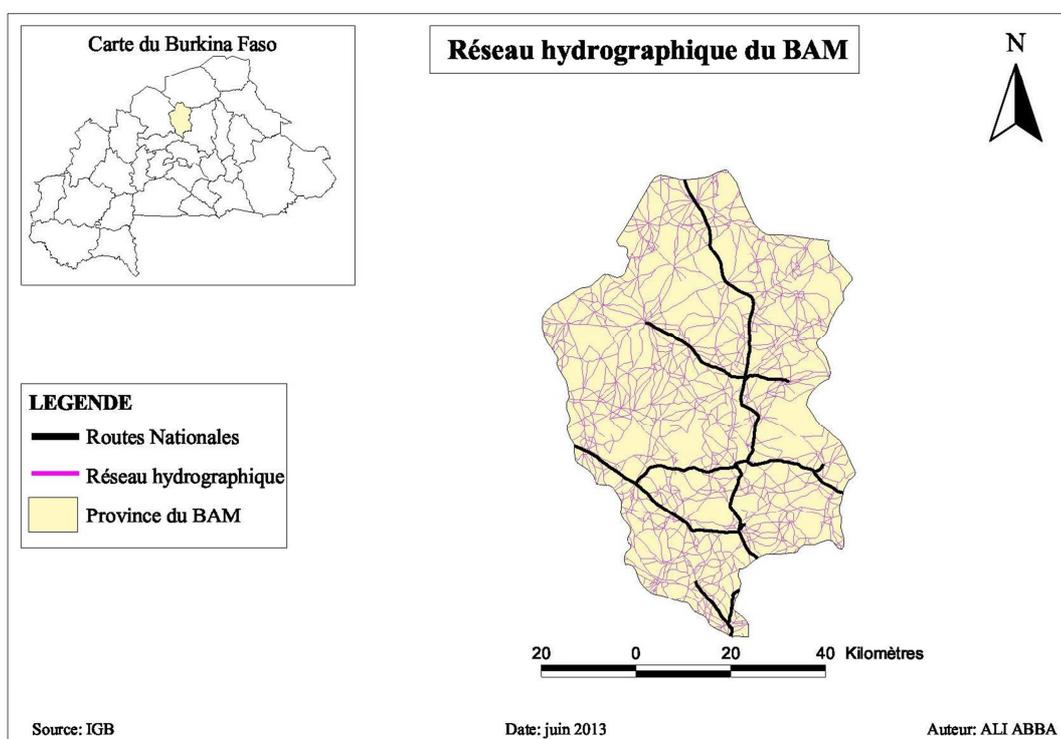


Figure 5: Réseau hydrographique de la zone d'études

La ville de Kongoussi possède par ailleurs un lac, le lac BAM, alimenté par des eaux de ruissellement de la ville.

I.1.6. Population

Selon le recensement de 2006, la population du Bam s'élèverait à 277 092 habitants. En considérant un taux de croissance annuel de 3.1% (Bado & Zongo, 2009), elle devrait atteindre les 343 100 habitants aujourd'hui. La province est en majorité occupée par des Mossi et des Peuhls. On y retrouve cependant des Rimaïbés, des Dogons et des Fulsés.

I.1.7. Activités économiques

Les populations sont essentiellement rurales, et ont pour activités principales l'agriculture (pluviale) et l'élevage. Les principales spéculations sont le maïs, le mil et le sorgho, suivies en second plan de quelques cultures maraîchères comme le haricot vert, l'aubergine, le piment, le gombo, le niébé (haricot blanc) et le tabac.

I.2. Objectifs de l'étude

I.2.1. Objectif global

L'objectif de base de cette étude est la création d'un modèle technique sur Excel suffisamment fiable et facile à l'utilisation, pour la gestion de l'eau des bassins de collecte des eaux de ruissellement pour l'irrigation de complément (BCER). Il s'agira en d'autres termes d'un outil d'aide à la décision pour les agents agricoles et les ONG de développement, au pilotage de l'irrigation de complément dans leurs zones d'intervention.

I.2.2. Objectifs spécifiques

Le modèle devra être capable de :

- Estimer le volume total d'eau collectée dans le BCER au début d'une séquence sèche ;
- Estimer le nombre de jours possibles avant le déclenchement de l'irrigation de complément à partir du BCER sur une superficie emblavée connue ;
- Estimer le nombre de jours d'autonomie du BCER possibles sous irrigation de complément, pour une superficie emblavée connue.

II. DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette partie a été subdivisée en deux points : la recherche bibliographique et l'écriture du présent modèle, à partir d'une identification des paramètres d'entrée du modèle et de leur intégration dans un classeur EXCEL.

II.1. Revue de la littérature

Plusieurs documents et études sur les changements climatiques et la modélisation du bilan hydrique et agronomique ont été consultés.

II.1.1. Quelques définitions

a) Modélisation

Selon Bathelot (2011), la modélisation est un principe ou technique qui permet d'établir un modèle explicatif d'un phénomène ou comportement en recensant les variables ou facteurs explicatifs et l'importance relative de chacune de ces variables.

Pour Giraut-Pamart (1974), la modélisation est une opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe, afin d'étudier plus commodément et de mesurer les effets sur ce système des variations de tel ou tel de ses éléments composants (Hubert, 2013).

b) Modèle

Selon Birou (1966), le modèle est un système physique, mathématique ou logique représentant les structures essentielles d'une réalité et capable à son niveau d'en expliquer ou d'en reproduire dynamiquement le fonctionnement (Hubert, 2013). Il peut être numérique ou analogique. Le modèle numérique est un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène. En modifiant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique. Le modèle analogique quant à lui est un système physique qui reproduit plus ou moins un phénomène que l'on souhaite étudier.

c) Séquence sèche

Une séquence sèche, ou poche de sécheresse, ou encore épisode sec, peut être définie comme une période plus ou moins longue (en termes de jours) de la saison des pluies pendant laquelle on n'observe pas de pluies significatives. La notion de séquence sèche est donc étroitement liée à celle de pluie efficace.

Le terme «pluie efficace» peut avoir deux définitions très différentes selon que nous soyons en hydrologie ou alors en agriculture.

D'un point de vue **hydrologique** : «Les précipitations efficaces représentent la quantité d'eau qui reste disponible, à la surface du sol, après soustraction des pertes par évapotranspiration réelle» (Margat, 1996). Dans le modèle, cette définition sera prise en compte pour l'évaluation des apports dans les BCER.

D'un point de vue **agricole** : «La partie résiduelle de l'eau de pluie, stockée dans la zone racinaire et qui peut être utilisée par la plante s'appelle pluie efficace» ; «La pluie efficace est la pluie totale moins le ruissellement, moins l'évaporation et moins la percolation profonde. Le terme « pluie efficace » définit donc la fraction de l'eau des précipitations qui répond aux besoins en eau des cultures » (Brouwer & Heibloem, 1987).

II.1.2. Synthèse de travaux antérieurs

Lhomme & Eldin (1984) ont mené des études sur un modèle agro-climatologique de simulation du bilan hydrique des cultures. Il s'agissait de simuler le bilan hydrique du sol à partir de données journalières de pluie, de moyennes mensuelles de l'ETP, et certaines caractéristiques du sol et de la culture considérée. Le modèle évolue à pas de temps journalier. Il a supposé que la réserve hydrique du sol évolue dans une fourchette située entre 0 et la réserve hydrique maximale ou réserve utile du sol. Toute quantité d'eau supérieure à la capacité de rétention du sol est considérée comme drainée. Le modèle a été programmé en FORTRAN IV sous forme d'un sous-programme appelé SBH (Simulation de Bilan Hydrique) dont la liste de données fait apparaître des données climatiques, culturales et édaphiques.

Albergel & al. (1991) ont effectué des travaux sur l'amélioration des modèles du bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. Les objectifs de cette étude étaient de proposer une méthode d'estimation fiable du ruissellement tout en gardant la fonctionnalité des modèles existants, et compléter le programme de Franquin et Forest (modèle de bilan hydrique) pour un fonctionnement en pas de temps journalier. L'étude s'est faite sur deux sites, au Sénégal et au Mali. Il s'agissait de faire une simulation de bilan hydrique d'une culture sur 03 types de sols fréquents en zone sahélienne, et de les comparer aux résultats obtenus antérieurement avec des anciens modèles. Les 03 types de sols en question étaient :

- de type C1 : porosité vésiculaire absente ou très faible (<5%) ;
- de type C2 : porosité vésiculaire peu abondante (5 à 30%) ;
- de type C3 : porosité vésiculaire forte (>30%).

Les principaux résultats montrent que le programme représente bien la différence entre drainage et ruissellement. Il en ressort qu'une bonne estimation du ruissellement dans les modèles de bilan hydrique est très importante, surtout lorsque l'on veut l'appliquer à l'échelle

d'un cycle cultural. De plus il a été démontré que la scarification des sols n'augmente pas leur capacité de rétention.

Sarr & al. (2011) ont mené une étude sur l'identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso. L'étude s'est faite en zones soudano sahélienne (Dédougou, Fada N'Gourma et Ouagadougou) et soudanienne (Bobo Dioulasso, Gaoua et Pô). Il s'agissait d'étudier la vulnérabilité aux séquences sèches du maïs pluvial, la variabilité spatiotemporelle des saisons de pluies (début, fin, durée), et de déterminer les probabilités d'apparition de séquences sèches en saisons de pluies. Les données pluviométriques utilisées s'étendaient de 1978 à 2008, et les évapotranspirations de Penmann de 1984 à 2008, venant de six (06) stations météorologiques représentatives dont trois (03) en zone soudanienne et trois (03) en zone soudano sahélienne. L'étude de risques climatiques s'est faite à partir du logiciel Instat+v.3.036. Il est principalement ressorti de cette étude que le maïs est une culture sensible aussi bien au déficit hydrique qu'à l'excès. De plus, les stades végétatifs les plus délicats sont la phase initiale et la phase de floraison. Enfin, la probabilité d'apparition de séquences sèches de longue durée est plus grande en zone soudano-sahélienne qu'en zone soudanienne.

II.2. Identification des différents paramètres hydro climatiques et agronomiques du modèle

II.2.1. Enquête de terrain

Une sortie de terrain a été effectuée du 29 avril au 03 mai 2013 à Kongoussi. Pour cela, nous avons élaboré deux types de questionnaires (annexes 1 & 2) :

- Le questionnaire 1 adressé aux agriculteurs ;
- Le questionnaire 2 adressé aux structures de la zone œuvrant dans l'agriculture et la sécurité alimentaire.

Nous avons visité 03 villages pilotes, Sandouré, Yennéga et Mogodin, où ont été construits des BCER d'expérimentation par le PICIC. Nous avons pu y rencontrer des producteurs, avec qui nous avons eu des échanges. Des focus groupes ont été organisés avec les différents groupements d'agriculteurs, et des entretiens individuels avec les propriétaires de BCER (producteurs pilotes). Plus précisément, nous avons effectué 08 entretiens individuels et 3 focus groupes dans lesquels les effectifs variaient entre 05 et 08 producteurs. Les entretiens se faisaient en Mooré (langue de l'ethnie MOSSI), et la traduction était assurée par une animatrice de l'AZND, Mme Hortense SAWADOGO et l'étudiant stagiaire en master 2 eaux agricoles Lionel OUEDRAOGO.



Figure 6: Focus groupe avec le groupement NABONSWENDÉ à Mogodin

Le but de cette sortie de terrain était de prendre connaissance de l'usage fait de l'eau provenant des BCER, les spécificités culturelles pratiquées, les techniques culturelles adoptées, les types de sols rencontrés, les conditions de déclenchement de l'irrigation d'appoint. Il en est ressorti essentiellement que :

- Les périmètres cultivés varient entre 01 à 4.5ha ;
- Les sols sont à prédominance sableuse, et sablo argileuse ;
- Les principales cultures pratiquées sont essentiellement céréalières, à savoir le maïs, le mil et le sorgho, suivies de quelques cultures maraîchères dont le piment, le niébé et l'aubergine ;

Par ailleurs, toutes les personnes utilisant les BCER pour l'irrigation d'appoint nous ont fait comprendre qu'elles s'en servaient lorsqu'elles voyaient apparaître les premiers signes de flétrissement : « *Nous commençons à irriguer lorsque nous voyons que les feuilles se fanent, et que le sol se craquelle* »¹. Malheureusement, une telle méthode de suivi des besoins en eau s'avère très peu efficace, puisque l'apparition de signes visibles sur les cultures est une preuve de stress hydrique. Dans le cas du maïs, si les besoins en eau à la floraison sont satisfaits à moins de 60%, les rendements deviennent très faibles quelles que soient les conditions hydriques sur le reste du cycle (Poss & al., 1988). En outre, nous avons identifié les différents usages et activités menées par les villageois à partir de l'eau provenant des BCER. Il s'agit essentiellement de :

- L'arrosage des plantes pendant les séquences sèches ;

¹ Propos recueillis pendant le focus groupe avec le groupe RELWENDÉ à Sandouré

- L'abreuvement du bétail ;
- La fabrication de briques en terre ;
- L'alimentation des fosses fumières.

La figure 7 montre les différentes activités liées à l'utilisation des eaux des BCER par les exploitants enquêtés.

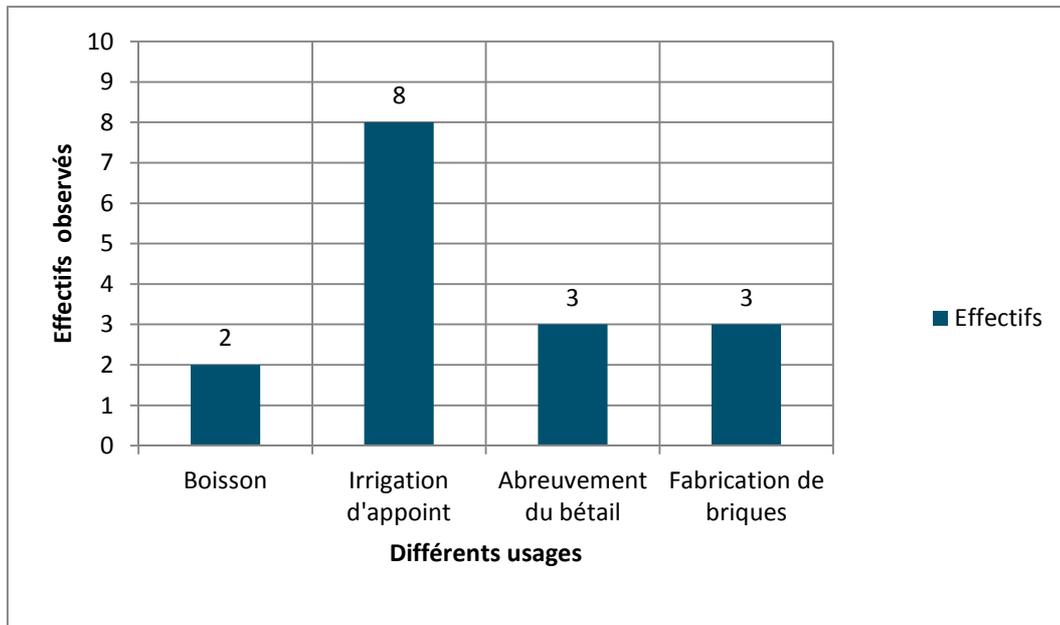


Figure 7: Différentes utilisations de l'eau des BCER selon les personnes interrogées

II.2.2. Détermination du coefficient de ruissellement Cr

Le ruissellement correspond à l'écoulement par gravité de l'eau à la surface du sol suite à des précipitations (LeBissonais & al., 2002). Le coefficient de ruissellement Cr quant à lui, est le rapport entre la « pluie nette » (c'est-à-dire la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface donnée) et la pluie brute (hauteur d'eau précipitée). Il permet de calculer la quantité d'eau que nous pouvons collecter dans le BCER à partir d'une pluie et de la superficie d'un mini bassin versant donné. En l'absence de mesures in situ de ce paramètre, les valeurs présentées ont été obtenues à travers la littérature et nous avons considéré dans notre démarche les valeurs limites (minimum et maximum). Les coefficients de ruissellement selon le type d'occupation des sols sont reportés dans le tableau 1.

Tableau 1: Coefficient de ruissellement relatif à diverses surfaces

Occupation du sol	Coefficient de ruissellement
Prairies, forêts	0,10
Terre	0,20
Prés et champs cultivés	0,20 à 0,30
Zones résidentielles	0,30 à 0,50
Zones bitumées	0,50 à 0,90

Source : Syndicat Interdépartemental de l'eau Seine Aval (Sidesa, 2012)

L'utilisateur du programme règlera la barre de défilement sur la valeur correspondant à sa zone d'intervention.

II.2.3. Détermination des réserves hydriques du sol : réserve utile et réserve facilement utilisable

La réserve hydrique du sol représente la quantité d'eau stockée dans le sol et disponible pour les plantes. Il s'agit d'un nombre positif exprimé en millimètres, qui varie entre 0 et la réserve utile maximale du sol. La réserve utile quant à elle représente la différence entre les quantités d'eau stockées à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent dans une tranche de sol d'épaisseur égale à la profondeur d'enracinement.

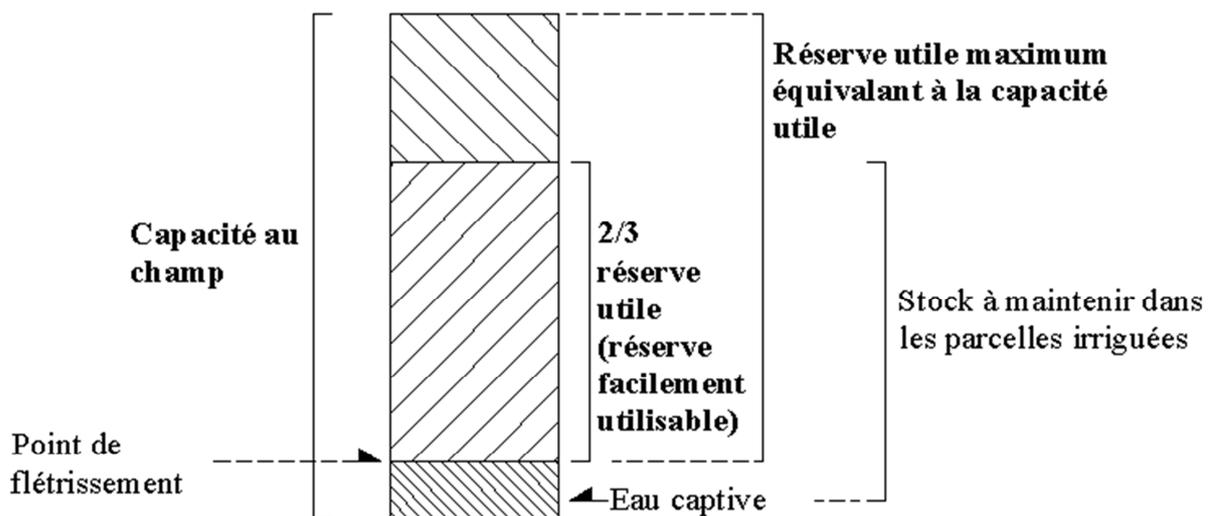


Figure 8: Répartition des différents types de réserves hydriques dans le sol

La réserve utile étant directement liée à la profondeur d'enracinement, elle variera donc en fonction du stade de développement de la culture mais aussi de la quantité d'eau disponible dans le sol. Nous avons répertorié plusieurs types de sols avec leurs humidités à la capacité au champ (tableau 2).

Tableau 2: Réserve utile pour quelques types de sol selon Withers & Vipond (1974)

Type de sol	Réserve utile (mm/m)
Sableux	55
Sable fin	80
Sablo-limoneux	120
Argilo-limoneux	150
Argileux	235

Source : (Savva & Frenken, 2001)

Une fois la réserve utile RU connue, nous pouvons en déduire la réserve facilement utilisable RFU par les plantes. Il s'agit de la fraction d'eau contenue dans le sol pouvant être aisément sucée par les racines des plantes. Elle est constituée d'eau capillaire, et correspond à une certaine proportion de la réserve utile.

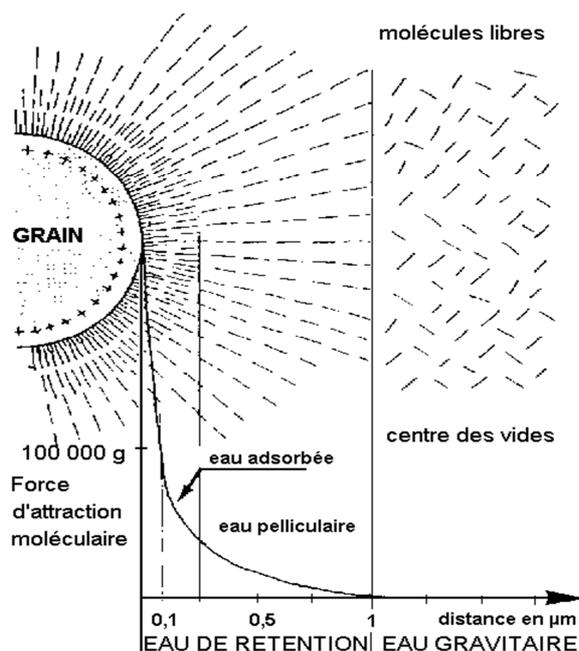


Figure 9: Différents types d'eau au voisinage d'un grain dans le sol (Polubrina-Kochina in Castany)

Source : (Beauchamp, 2006)

La RFU correspond généralement à 2/3 de la RU. Les 1/3 restants constituent la réserve de survie RS. C'est une quantité d'eau difficilement utilisable voire inaccessible pour la plante (eau pelliculaire et eau de constitution).

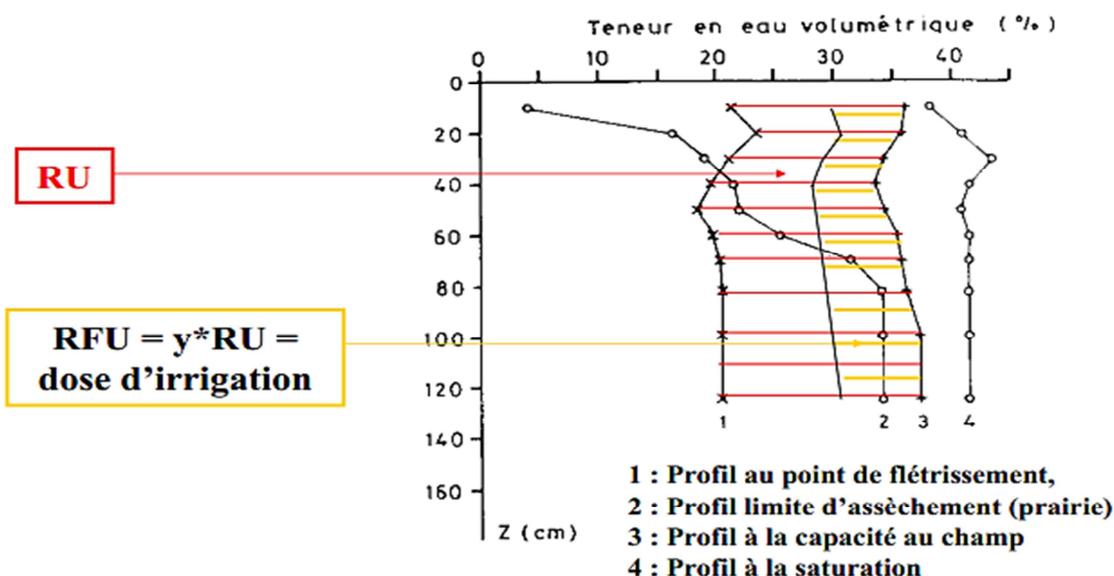


Figure 10: Profils d'humidités caractéristiques

Source : (Xhantoulis, 2013)

II.2.4. Détermination de l'évaporation

Concernant l'évaporation journalière, la meilleure méthode serait de prendre les résultats fournis par la station météorologique la plus proche, telle qu'elle se produit dans une retenue de grande profondeur. Nous savons néanmoins que selon certaines études menées au Niger, elle tournerait autour de **2 à 7mm/j** pendant la saison pluvieuse (Rodier & Lussigny, 1954).

II.2.5. Détermination de l'infiltration

L'infiltration dépend de l'état du BCER et du type de sol dans lequel il a été creusé. Plus les fissures sur les berges et le fond sont importantes, plus importante est l'infiltration, et vice-versa. Dans le village de Yennéga, nous avons pu avoir un bassin pour lequel la conductivité hydraulique à saturation est de 24mm/h. dans le modèle nous avons fixé le plafond d'infiltration à **1000mm/j**. Toutefois, cela n'empêchera pas l'utilisateur d'entrer manuellement une valeur se trouvant hors de cette limite.

II.2.6. Détermination des besoins en eau des plantes

La consommation en eau des plantes est influencée par plusieurs facteurs, dont la température, l'humidité, le vent, mais surtout par le stade végétatif. Ainsi, pour ce modèle, nous avons effectué le calcul des besoins en eau des plantes selon les différents stades végétatifs.

a) Spécificités culturelles de la zone

Les cultures ont été choisies par rapport aux habitudes des paysans des différents villages visités. Suite aux différents entretiens avec les villageois, il est clairement ressorti que les

principales cultures pratiquées sont le maïs, le mil et le sorgho, pour la vente ou la consommation ; ensuite viennent quelques cultures maraîchères, à savoir l'aubergine, le niébé (haricot blanc) et le piment.

Tableau 3: Différentes spéculations pratiquées dans la zone

Type	Spéculations	Durée de cycle (jours)	Coefficients culturaux kc			
			Initial	Croissance	Développement	Maturation
Cultures principales	Maïs	140 (25/40/45/30)	0.40	0.75	1.15	0.70
	Mil	105 jours (15/25/40/25)	0.35	0.70	1.10	0.65
	Sorgho	120 (20/30/40/30)	0.35	0.75	1.10	0.65
Cultures secondaires	Aubergine	130 (30/40/40/20)	0.45	0.75	1.15	0.80
	Piment	125 (30/35/40/20)	0.35	0.75	1.05	0.90
	Niébé	110 (20/30/40/20)	0.35	0.75	1.10	0.50

Source : (Doorenbos, 1975)

Les besoins des cultures (ETM) ont été calculés pour chaque phase du cycle végétatif. Nous avons choisi une telle approche car un des paramètres d'entrée du modèle sera le stade végétatif de la culture, que l'utilisateur pourra estimer à partir de l'état des plantes (par observations sur le terrain) ou alors de la date de semis.

b) Procédure de calcul : exemple du maïs

$$ETM = Kc * ETP(mm/jr)$$

ETM : évapotranspiration maximale (ou encore réelle dans ce cas de figure) ;

ETP : évapotranspiration potentielle.

Les ETP mensuelles utilisées sont tirées des données météorologiques de 1970 à 2009 de la station synoptique de Ouahigouya. Nous en avons fait des moyennes mensuelles sur les 40 ans d'études.

Puisqu'il s'agit ici d'agriculture pluviale, nous avons considéré que les semis se font à la même date que le démarrage de la saison des pluies. Selon (Sarr, Kafando, & Atta, 2011), en

zone sahélienne, la saison des pluies démarre avant début juin. Nous avons donc fait le calcul des besoins en considérant que les semis se font en début juin. Le tableau 4 présente les ETP utilisées dans le calcul des besoins du maïs :

Tableau 4: Évapotranspirations potentielles de juin en octobre

	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.
ETP (mm/mois)	176,2	152,6	140,5	149,2	175,5
ETP (mm/jr)	5,87	5,09	4,68	4,97	5,85

L'ETM de chaque phase a été calculée de la manière suivante :

$$ETMi (mm/jr) = Kci \times ETPi(mm/jr)$$

ETMi : évapotranspiration maximale du mois i ;

Kci : coefficient cultural du stade correspondant ;

ETPi : évapotranspiration potentielle du mois i.

Les résultats sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 5: ETM du maïs par stade

	Besoins par stade			
	Initiale	croissance	Mi saison	Maturation
ETM (mm/j)	2,3	3,9	5,5	3,9

Les valeurs présentées dans le tableau 5 ne tiennent pas compte des pertes, en général liées à l'efficacité globale de la technique culturale utilisée. Pour le présent modèle, compte tenu du fait que la distance entre les bassins et les parcelles est très faible (5 à 15m), nous avons fixé l'efficacité à **0.80**, quelle que soit la technique utilisée.

Le récapitulatif des besoins de toutes les cultures selon leur stade végétatif est présenté dans le tableau 6.

Tableau 6: Récapitulatif des ETM des différentes cultures en fonction du stade végétatif

Spécificité culturale	Besoins en mm/j en fonction du stade végétatif			
	Initiale	croissance	Mi saison	Maturation
Maïs	2,3	3,9	5,5	3,9
Mil	2,1	3,9	5,4	3,1
Sorgho	2,1	4,0	5,3	3,2
Aubergine	2,6	3,7	5,5	4,0
Piment	2,1	3,8	5,0	4,5
Niébé	2,1	4,0	5,3	2,5

II.3. Hypothèses émises

Certaines hypothèses simplificatrices ont été posées afin de faciliter l'écriture de ce modèle.

a) Au niveau du BCER

- Les dimensions du bassin sont invariables : ceci revient à dire qu'il n'y a pas d'érosion des berges, ou de déformation du bassin. Ainsi, le volume total reste inchangé ;
- Le volume spécifique d'eau dans le bassin est calculé à partir de la surface de la petite base et de la grande base, et la hauteur du bassin :

Soient $l1$ et $L1$ les dimensions de la petite base, et $l2$ et $L2$ les dimensions de la grande base.

$$S1 = l1 \times L1; \quad S2 = l2 \times L2 \quad (m^2)$$

Avec $S1$ et $S2$ les surfaces respectives de la petite et de la grande base.

La surface moyenne S_{moy} du plan d'eau est donnée par :

$$S_{moy} = \frac{S1 + S2}{2} (m^2)$$

Ainsi, le volume moyen V_{moy} du bassin sera :

$$V_{moy} = S_{moy} \times \text{hauteur du bassin} (m^3)$$

D'où le volume spécifique donné par la relation suivante :

$$Vs(m^3/mm) = \frac{V_{moy} (m^3)}{\text{profondeur du bassin} (mm)}$$

Cette relation va permettre de suivre l'évolution de l'eau dans le bassin en terme de hauteur d'eau (mesurable plus facilement à l'aide d'un limnimètre) ;

b) Au niveau des parcelles

- Au début d'une séquence sèche, la réserve utile est supposée pleine.
- Le modèle a été écrit de telle manière que, pour qu'il y ait nécessité d'irrigation, la réserve facilement utilisable vienne à être épuisée pendant la séquence sèche. Par conséquent, la quantité d'eau à apporter à la plante en ce moment sera l'ETM de la phase considérée, et non les besoins nets (vu qu'il n'y a pas de pluie significative) ;
- La consommation journalière des différentes activités autre que l'arrosage des plantes est continue sur toute la période sans pluie.

II.4. Formules des différents paramètres de sortie

II.4.1. Volume du bassin V

Afin de simplifier le calcul du volume, nous avons considéré une surface moyenne entre la petite et la grande base, que nous avons multipliée par la hauteur totale du bassin.

Soient $l1$ et $L1$, respectivement la largeur et la longueur de la petite base ; et $l2$ et $L2$ respectivement la largeur et la longueur de la grande base (figure 11).

$$V(m^3) = \frac{(l1(m) \times L1(m)) + (l2(m) \times L2(m))}{2} \times H(m)$$

Avec

V : le volume total du bassin

H : hauteur totale du bassin.

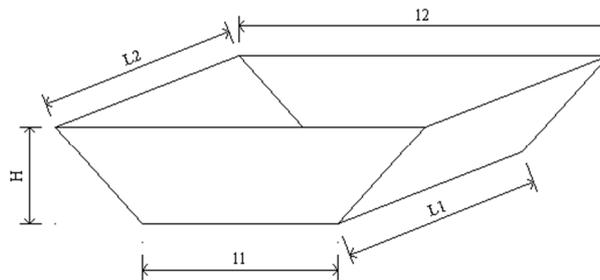


Figure 11: Différentes dimensions du bassin

II.4.2. Volume ruisselé Vr

Le volume total ruisselé est calculé à partir du cumul des 03 dernières pluies précédant le début de la séquence sèche, de la surface du micro bassin versant, et enfin du coefficient de ruissellement considéré pour la zone. Le calcul est effectué par la relation suivante :

$$Vr(m^3) = Cr(\%) \times \sum (3 \text{ dernières pluies } (mm)) \times 10 \times S(ha)$$

Avec

Cr : coefficient de ruissellement de la zone

S : surface du micro bassin versant

Vr : volume ruisselé

II.4.3. Volume stocké dans le bassin Vst

Nous avons considéré que le volume d'eau stocké dans le bassin ne constitue qu'un certain pourcentage du volume ruisselé. Ainsi, il est calculé par la relation suivante :

$$Vst(m^3) = \alpha(\%) \times Vr(m^3)$$

Avec

α : pourcentage de volume dévié dans le bassin

V_r : volume ruisselé

V_{st} : volume d'eau stocké dans le bassin.

Condition sur la formule :

$$V_{st} = (Si V_{st} > V ; V ; V_{st})$$

II.4.4. Réserve utile RU

Elle n'est pas calculée, mais choisie dans la liste des différentes réserves utiles selon le type de sol, déterminées par Withers & Vipond en 1974 (voir la partie II.2.3).

II.4.5. Réserve facilement utilisable RFU

Elle est calculée à partir de la réserve utilisable. Elle vaut généralement deux tiers (2/3) de la réserve utile :

$$RFU(mm) = \frac{2}{3} \times RU(mm)$$

Avec

RFU : réserve facilement utilisable

RU : réserve utile.

II.4.6. Besoins en eau du stade végétatif BE

Ils sont calculés pour chaque phase du cycle cultural de la plante. Les calculs ont été faits à partir des données climatiques de la station synoptique de Ouahigouya. Les besoins ont d'abord été évalués pour des cycles dont la longueur a été prise dans la littérature. Ensuite, ils ont été ramenés par une interpolation linéaire aux besoins correspondant à un cycle de 100 jours. Par ailleurs, nous avons considéré une efficacité globale de **80%**, étant donné que les parcelles ne sont pas très éloignées des BCER.

$$BE(mm/j) = \frac{ETM(mm/j) \times \text{longueur de cycle } (j) \times \frac{1}{100j}}{0.80}$$

Avec

ETM : évapotranspiration maximale calculée pour le cycle obtenu dans la littérature

BE : besoins en eau du stade végétatif.

II.4.7. Nombre de jours avant le déclenchement de l'irrigation d'appoint

Comme expliqué plus haut dans cette partie, l'irrigation d'appoint est préconisée lorsque la réserve facilement utilisable est épuisée. Ce nombre de jours est obtenu en divisant simplement la réserve facilement utilisable par les besoins journaliers de la période :

$$\text{Nombre de jours} = \frac{RFU(mm)}{BE(mm/j)}$$

Avec

RFU : réserve facilement utilisable

BE : besoins en eau du stade végétatif.

N.B. : Le nombre de jours est arrondi par défaut.

II.4.8. Hauteur totale d'eau infiltrée dans le bassin H_{tin}

Elle est obtenue en multipliant l'infiltration journalière dans le bassin par le nombre de jours de la séquence sèche.

$$H_{tin}(mm) = \text{Infiltration} (mm/j) \times N_{ss}(j)$$

Avec

N_{ss} : nombre de jours de la séquence sèche

II.4.9. Hauteur totale d'eau évaporée du bassin H_{tev}

Elle est obtenue en multipliant l'évaporation journalière au niveau du bassin, par le nombre de jours de la séquence sèche.

$$H_{tev}(mm) = \text{Evaporation} (mm/j) \times N_{ss}(j)$$

Avec

N_{ss} : nombre de jours de la séquence sèche

II.4.10. Hauteur d'eau totale allouée à la consommation humaine H_{tchu}, au cheptel H_{tchp}, à la fabrication des briques H_{tfb}, et à la fosse fumière H_{tff}

Ces différentes hauteurs d'eau sont calculées de la même manière. Elles sont obtenues en multipliant la consommation journalière de l'activité en question par le nombre de jours de la séquence sèche :

$$H_{ti}(mm) = \frac{V_{ji}(m^3/j) \times N_{ss}(j) \times H(m) \times 1000}{V(m^3)}$$

Avec

V_{ji} : consommation journalière de l'activité i (consommations humaines, cheptel, fabrication de briques, fosses fumières)

Nss : nombre de jours de la séquence sèche

H : hauteur du bassin

V : volume total du bassin

Hti : hauteur totale d'eau allouée à l'activité i.

II.4.11. Volume disponible pour l'irrigation V_{irr}

C'est de ce volume qu'est déduite la consommation des plantes. Il est obtenu en soustrayant au volume stocké, la somme des volumes totaux des différentes activités, de l'infiltration et de l'évaporation.

$$V_{irr}(m^3) = V_{st} - [(V_{jchu} + V_{jch} + V_{jfb} + V_{jff}) \times N_{ss} + (H_{inf} + H_{ev}) \times V_s]$$

Avec

V_{st} : volume stocké dans le BCER au début de la séquence sèche en m^3

V_{jchu} : consommation journalière humaine m^3/j

V_{jch} : consommation journalière du cheptel m^3/j

V_{jfb} : consommation journalière pour la fabrication des briques m^3/j

V_{jff} : consommation journalière pour les fosses fumières m^3/j

Nss : nombre de jours de la séquence sèche en j

H_{inf} : hauteur journalière d'eau infiltrée dans le bassin en mm

H_{ev} : hauteur journalière d'eau évaporée du bassin en mm

V_s : volume spécifique dans le BCER en m^3/mm

II.4.12. Hauteur d'eau allouée aux plantes H_{pl}

Tout d'abord, nous multiplions les besoins de la période considérée par le nombre de jours **nécessaires** à l'irrigation d'appoint (nombre de jours après épuisement de la RFU). Le résultat obtenu correspond à une hauteur d'eau au niveau de la parcelle. Ensuite, cette hauteur d'eau est convertie en hauteur d'eau dans le BCER.

Soit x le nombre de jours nécessaires à l'irrigation.

$$x = N_{si}(j) - N_{ss}(j)$$

Avec

N_{si} : nombre de jours possibles sans irrigation d'appoint

Nss : nombre de jours de la séquence sèche

$$H_{pl}(mm) = \frac{x(j) \times BE(mm/j) \times 10 \times S(ha)}{V_s(m^3/mm)}$$

Avec

x : nombre de jours nécessaires à l'irrigation

BE : besoins en eau du stade végétatif

S : superficie cultivée

Vs : volume spécifique au niveau du BCER.

II.4.13. Autonomie du BCER sous irrigation d'appoint Nirr

Il s'agit du nombre de jours durant lesquels il sera possible d'arroser les plantes à partir de l'eau stockée dans le BCER, après déclenchement de l'irrigation d'appoint. Il est obtenu par la relation suivante :

$$\mathbf{Nirr(jr) = durée\ de\ la\ séquence\ sèche(jr) - autonomie\ de\ la\ parcelle(jr)}$$

II.4.14. Volume restant à la fin de la séquence sèche Vrest

Il est obtenu en faisant la différence entre le volume disponible pour l'irrigation et le volume d'eau alloué aux plantes.

$$\mathbf{Vrest(m^3) = Virr(m^3) - Hpl(mm) \times Vs(m^3/mm)}$$

Avec

Virr : volume disponible pour l'irrigation

Hpl : hauteur d'eau allouée aux plantes

Vs : volume spécifique au niveau du BCER.

III. TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS

Le présent modèle se nomme « Modèle Technique de Gestion de l'Eau des BCER (MTGE_BCER 2013) ». Il s'agit d'un outil d'aide à la gestion de l'eau des BCER, destiné à des utilisateurs de niveau technicien ou plus. Il a été écrit à partir du programme Microsoft Excel du pack Office 2010. Grosso modo, il permet à l'utilisateur de connaître le moment propice de déclenchement de l'irrigation de complément.

III.1. Contexte d'utilisation du modèle

III.1.1. Zones climatiques concernées

Ce modèle est conçu pour trois principales zones climatiques :

- La zone sahélienne ;
- La zone soudano sahélienne ;
- La zone soudanienne.

Le choix de ces 3 zones s'explique par le fait de la prédominance de l'agriculture pluviale par les populations y vivant.

III.1.2. Géométrie des bassins

Lors de la sortie de terrain, nous avons remarqué que les BCER utilisés sont de forme trapézoïdale, et de dimensions variables. Cependant, bien que les dimensions puissent changer d'un exploitant à un autre, le volume de tous ces bassins est unique, à savoir 283m^3 . Afin d'élargir le champ d'utilisation du modèle, le MTGE_BCER 2013 laisse la latitude à l'utilisateur d'insérer les dimensions du BCER pour lequel il voudrait effectuer des simulations.

III.1.3. Cultures disponibles dans le modèle

Les spéculations utilisées dans le MTGE_BCER 2013 correspondent aux principales cultures pratiquées dans les villages enquêtés. Il s'agit essentiellement :

- De cultures céréalières : maïs, mil, sorgho ;
- Et de cultures maraichères : aubergine, niébé, et piment.

III.1.4. Superficies des parcelles irriguées

D'après les résultats de l'enquête, les superficies de parcelles varient d'un exploitant à un autre. La plus petite parcelle est d'environ 1ha, dans le village de Sandouré, tandis que la plus grande est de l'ordre de 4.5ha, à Mogodin. Au vu de ces valeurs, nous avons décidé de faire varier les superficies entre 0 et 10 ha, en supposant qu'avec la vulgarisation des BCER, les paysans pourront étendre leurs parcelles sur de plus grandes surfaces.

III.1.5. Bassin versant

Nous avons considéré que les eaux alimentant les BCER proviennent de surfaces de ruissellement relativement petites, ou micro bassins versants. Dans le modèle, ces superficies varient entre 5 et 30 ha.

III.2. Description du fonctionnement du MTGE_BCER 2013

III.2.1. Organisation du classeur

Par souci d'ordre et de clarté dans l'écriture de ce modèle, le classeur a été réparti sur plusieurs feuilles de calculs et une feuille servant d'interface, sur laquelle l'utilisateur saisit les paramètres d'entrée du modèle, et en observe les paramètres de sortie.

L'écriture des différentes formules nécessite la liaison de plusieurs cellules appartenant soit à la feuille où elles se trouvent, soit à d'autres feuilles appartenant au même classeur (cas précis des formules de la plupart des paramètres de sortie sur l'interface).

III.2.2. Description de l'interface

La police d'écriture utilisée pour l'interface (figure 12) est le « Franklin Gothic Medium » taille 10. Cette police a été choisie pour sa lisibilité et son économie d'espace.

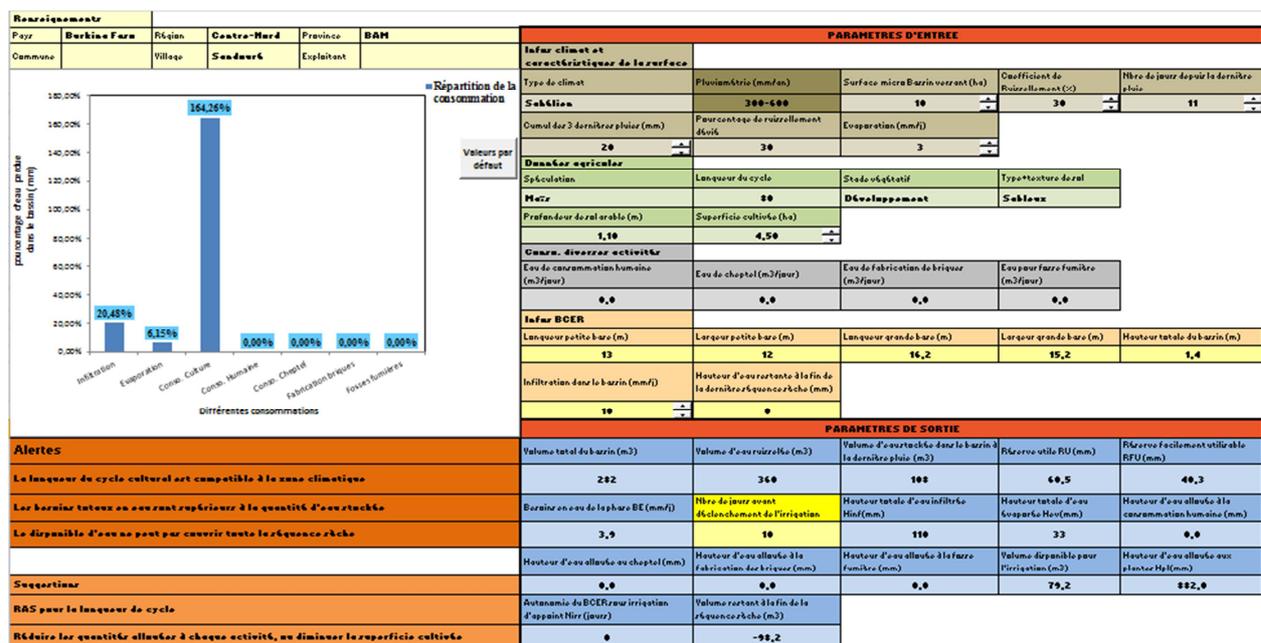


Figure 12: Interface du modèle MTGE_BCER 2013

Elle est constituée de 6 grandes zones :

- **La zone de renseignements** (figure 13) : l'utilisateur peut y entrer les différentes informations concernent la situation géographique de son lieu d'études (pays, région, province, commune, nom de l'exploitant du BCER).

Renseignements					
Pays		Région		Province	
Commune		Village		Exploitant	

Figure 13: Zone de renseignements

- **La zone de graphique** (figure 14) : elle est située directement en dessous de la zone de renseignements. À travers un histogramme, elle renseigne sur les proportions d'eau allouées à la consommation des plantes, l'évaporation, l'infiltration, et les différents usages de l'eau provenant des BCER (consommation humaine, fabrication des briques, fosses fumières). Ces proportions sont calculées par rapport au volume d'eau stocké dans le bassin.

Au coin supérieur droit de la zone se trouve un bouton commande (nommé « valeurs par défaut ») lié à une macro dont le rôle est de ramener les renseignements et les différents paramètres d'entrée aux valeurs par défaut (annexe 3).

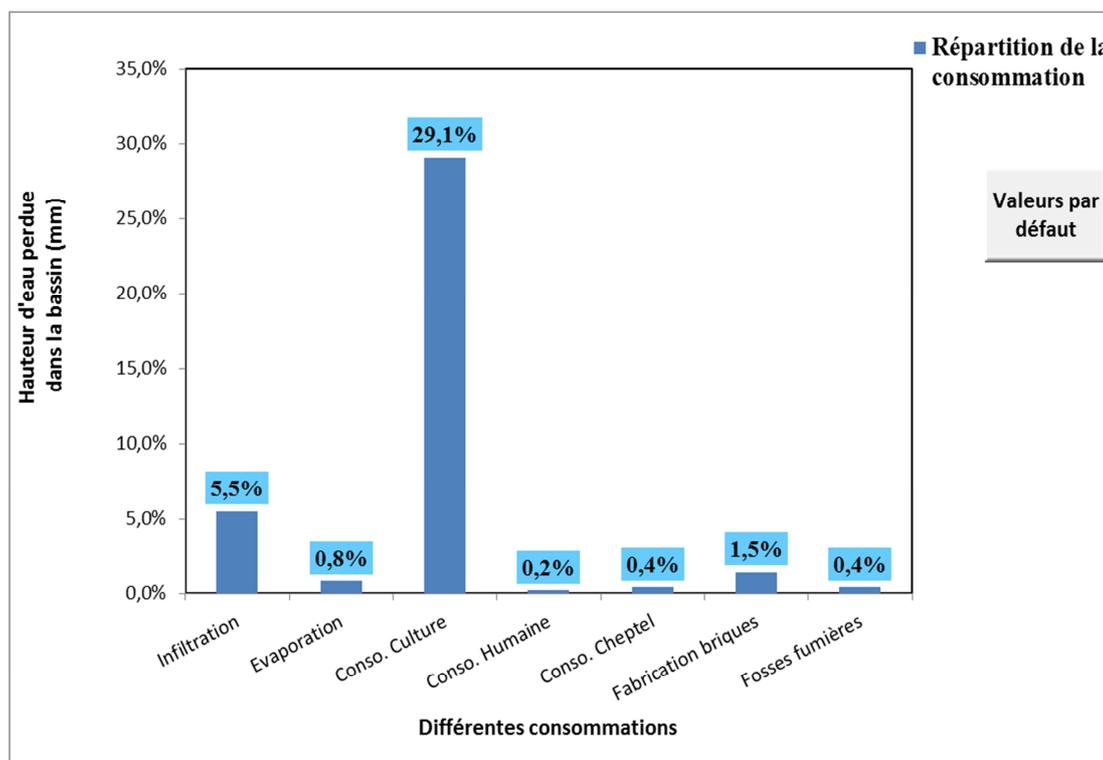


Figure 14: Zone de graphique

- **La zone d'avertissements** (figure 15) : elle est située en dessous de la zone de graphique. L'utilisateur peut y être alerté d'une éventuelle anomalie dans certains de ses choix.

Alertes
Incompatibilité entre la durée de cycle et la longueur de la saison des pluies, risque de ne pas boucler le cycle végétatif
Le volume d'eau stockée est suffisant pour les différentes activités

Figure 15: Zone d'avertissements

- **La zone de suggestions** (figure 16) : Située en dessous de la zone d'avertissements, elle propose à l'utilisateur des solutions aux anomalies identifiées.

Suggestions
Veillez choisir une spéculation à cycle plus court
RAS pour les consommations journalières

Figure 16: Zone de suggestions

- **La zone de paramètres d'entrée** (figure 17) : c'est dans cette partie que l'utilisateur entre les valeurs des différents paramètres propres au projet. Il s'agit essentiellement :
 - ✓ **Des informations sur le climat et les caractéristiques du mini bassin versant d'apport** : type de climat, surface du micro bassin versant d'apport, coefficient de ruissellement, nombre de jours de la séquence sèche, cumul des 3 dernières pluies, pourcentage de ruissellement dévié, évaporation ;
 - ✓ **Des données agricoles** : spéculation, longueur de cycle, stade végétatif, type et texture du sol, profondeur du sol arable, et superficie cultivée ;
 - ✓ **Consommations des diverses activités** : eau pour consommation humaine, eau pour cheptel, eau pour fabrication de briques, eau pour fosses fumières ;
 - ✓ **Informations sur le BCER** : longueur et largeur des petites et grandes bases, hauteur totale du bassin, infiltration dans le bassin, hauteur d'eau restante à la fin de la dernière séquence sèche.

PARAMETRES D'ENTREE				
Infos climat et caractéristiques de la surface d'apports				
Type de climat	Pluviométrie (mm/an)	Surface micro Bassin versant (ha)	Coefficient de Ruissellement (%)	Nbre de jours depuis la dernière pluie
Sahélien	300-600	15	70	5
Cumul des 3 dernières pluies (mm)	Pourcentage de ruissellement dévié	Evaporation (mm/j)		
20	30	1		
Données agricoles				
Spéculation	Longueur du cycle	Stade végétatif	Type+texture de sol	
Maïs	85	Maturation	Sableux	
Profondeur de sol arable (m)	Superficie cultivée (ha)			
1,05	0,50			
Conso. diverses activités				
Eau de consommation humaine (m3/jour)	Eau de cheptel (m3/jour)	Eau de fabrication de briques (m3/jour)	Eau pour fosse fumière (m3/jour)	
0,2	0,1	0,5	0,1	
Infos BCER				
Longueur petite base (m)	Largeur petite base (m)	Longueur grande base (m)	Largeur grande base (m)	Hauteur totale du bassin (m)
13	12	16,2	15,2	1,2
Infiltration dans le bassin (mm/j)	Hauteur d'eau restante à la fin de la dernière séquence sèche (mm)			
3	0			

Figure 17: Zone de paramètres d'entrée

- **La zone de paramètres de sortie** (figure 18) : c'est la partie où sont reportés les principaux résultats. Elle renseigne sur :

- ✓ Le volume total du bassin ;
- ✓ Le volume d'eau ruisselé ;
- ✓ Le volume total d'eau collectée dans le bassin ;
- ✓ Les réserves utile et facilement utilisable correspondant au type de sol choisi et à la profondeur ;
- ✓ Les besoins en eau de la phase ;
- ✓ Le nombre de jours avant le déclenchement de l'irrigation d'appoint ;
- ✓ Les hauteurs totales d'eau infiltrée, évaporée et allouée aux différentes activités ;
- ✓ Le volume d'eau disponible à l'irrigation ;
- ✓ La hauteur d'eau allouée aux plantes ;
- ✓ Le volume restant à la fin de la séquence sèche ;
- ✓ L'autonomie du bassin sous irrigation d'appoint.

PARAMETRES DE SORTIE				
Volume total du bassin (m3)	Volume d'eau ruisselée (m3)	Volume d'eau stockée dans le bassin à la dernière pluie (m3)	Réserve utile RU (mm)	Réserve facilement utilisable RFU (mm)
282	360	108	60,5	40,3
Besoins en eau de la phase BE (mm/j)	Nbre de jours avant déclenchement de l'irrigation	Hauteur totale d'eau infiltrée Hinf(mm)	Hauteur totale d'eau évaporée Hev(mm)	Hauteur d'eau allouée à la consommation humaine (mm)
3,9	10	110	33	0,0
Hauteur d'eau allouée au cheptel (mm)	Hauteur d'eau allouée à la fabrication des briques (mm)	Hauteur d'eau allouée à la fosse fumière (mm)	Volume disponible pour l'irrigation (m3)	Hauteur d'eau allouée aux plantes Hpl(mm)
0,0	0,0	0,0	79,2	882,0
Autonomie du BCER sous irrigation d'appoint Nirr (jours)	Volume restant à la fin de la séquence sèche (m3)			
0	-98,2			

Figure 18: Zone de paramètres de sortie

III.3. Outils utilisés dans l'écriture du modèle

La plupart des outils utilisés sur l'interface appartiennent au menu « Développeur » (figure 19).

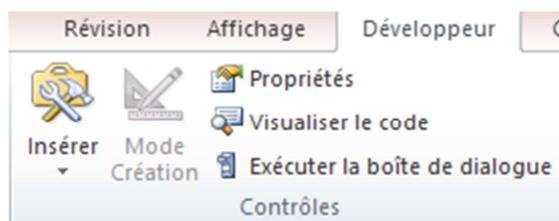


Figure 19: Aperçu du volet "Contrôles" sur Excel 2010

Il s'agit :

- De la **toupe**  : elle permet d'entrer et de modifier rapidement une plage de valeurs dans une cellule choisie au préalable. Dans ce modèle, elle est utilisée pour les paramètres

d'entrée dont la valeur peut varier dans une certaine fourchette d'une zone d'étude à une autre ; notamment la superficie de l'exploitation, le coefficient de ruissellement...etc. Il s'agit d'un outil très important permettant d'élargir le champ d'utilisation du modèle ;

- De **l'outil de validation des données** : Cet outil permet de limiter le choix de données à une liste restreinte prédéfinie, et d'afficher des messages d'alerte à l'utilisateur. Dans ce modèle par exemple, il permet entre autres de choisir une culture parmi les différentes spéculations disponibles, le type de climat... Cet outil est disponible dans le volet « Outils de données » du menu « Données » d'Excel 2010 (figure 20).

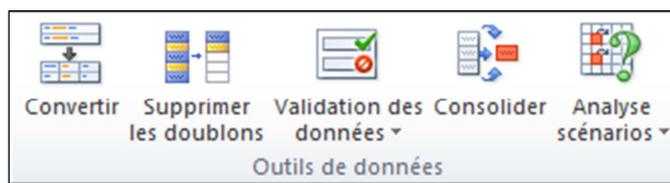
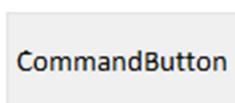


Figure 20: Aperçu du volet "Outils de données" sur Excel 2010 ;



- Du **bouton de commande** : il sert de raccourci pour l'exécution des macros qui ont été écrites au préalable et qui lui ont été affectées. Dans ce modèle, il permet d'exécuter une macro qui renvoie toutes les données de la feuille aux valeurs par défaut.

Par ailleurs, certaines macros ont été écrites et d'autres générées pour l'exécution de certaines fonctions. Il s'agit notamment du renvoi de tous les paramètres d'entrée aux valeurs par défaut, de l'affichage des besoins en eau d'une spéculation donnée par rapport à son stade végétatif, et enfin de l'affichage des messages d'ouverture et de fermeture (annexes 4 à 5).

III.4. Conditions de déclenchement de l'irrigation d'appoint

Le modèle a été conçu de telle manière que, la réserve facilement utilisable soit d'abord épuisée avant que l'irrigation d'appoint ne soit préconisée.

III.5. Contraintes et verrous

Le MTGE_BCER 2013 permet également de donner des messages d'alerte ou de restriction à l'utilisateur, lorsque ce dernier fait certains choix supposés préjudiciables aux cultures ou au fonctionnement du modèle.

III.5.1. Compatibilité de la durée de cycle des cultures

Lorsque la durée de cycle de la culture est :

- supérieure à la durée de la saison de pluies dans la zone, le message suivant apparaît dans la zone d'avertissement :

« *Incompatibilité entre la durée de cycle et la longueur de la saison des pluies, risque de ne pas boucler le cycle végétatif* » ;

- Inférieure à la durée de la saison des pluies dans la zone, le message suivant apparaît dans la zone d'avertissement :

« *La longueur du cycle cultural est compatible à la zone climatique* »

En plus des alertes mentionnées dans le tableau 7, une fenêtre d'avertissement (figure 21) apparaît immédiatement lors de la saisie de la durée du cycle lors de l'insertion de la valeur de la durée du cycle, lorsque celle-ci est supérieure à la valeur admissible pour la zone climatique considérée.

Tableau 7: Durée de cycle maximale en fonction de la zone climatique

Zone climatique	Durée de cycle maximale préconisée (jours)
Sahélienne	110
Soudano-sahélienne	140
Soudanienne	160

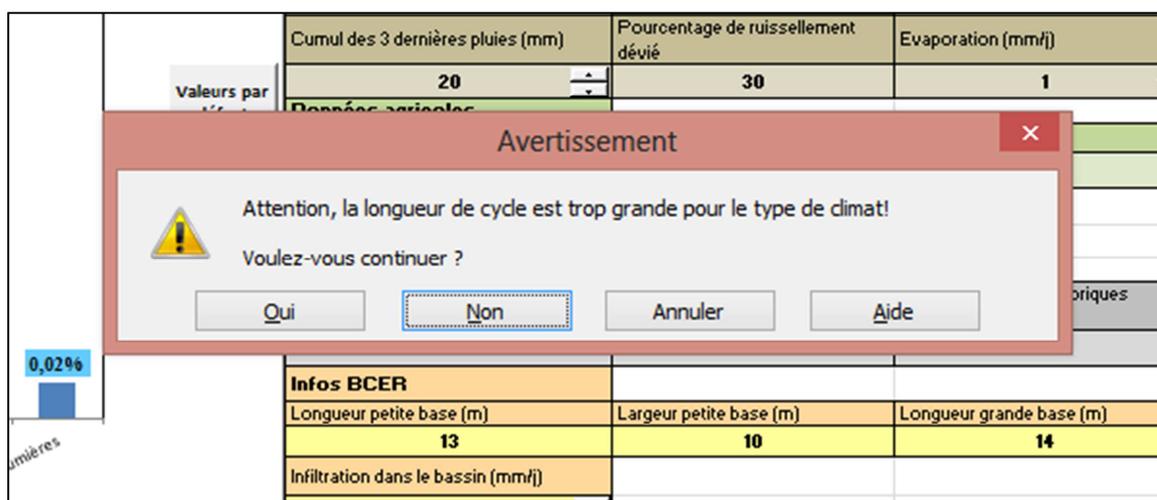


Figure 21: Fenêtre d'avertissement 1

III.5.2. Verrouillage des cellules

Dans l'intention de protéger le modèle, nous avons verrouillé les différentes feuilles de calcul et toutes les cellules de l'interface autres que les champs de renseignements et de paramètres d'entrée. Ainsi, lorsque l'utilisateur essaie de changer une information dans ces

Conception d'un modèle technique pour le pilotage de l'irrigation de complément à partir des bassins de collecte des eaux de ruissellement

cellules, un message d'erreur (figure 22) apparaît pour l'informer de l'impossibilité d'effectuer cette opération.

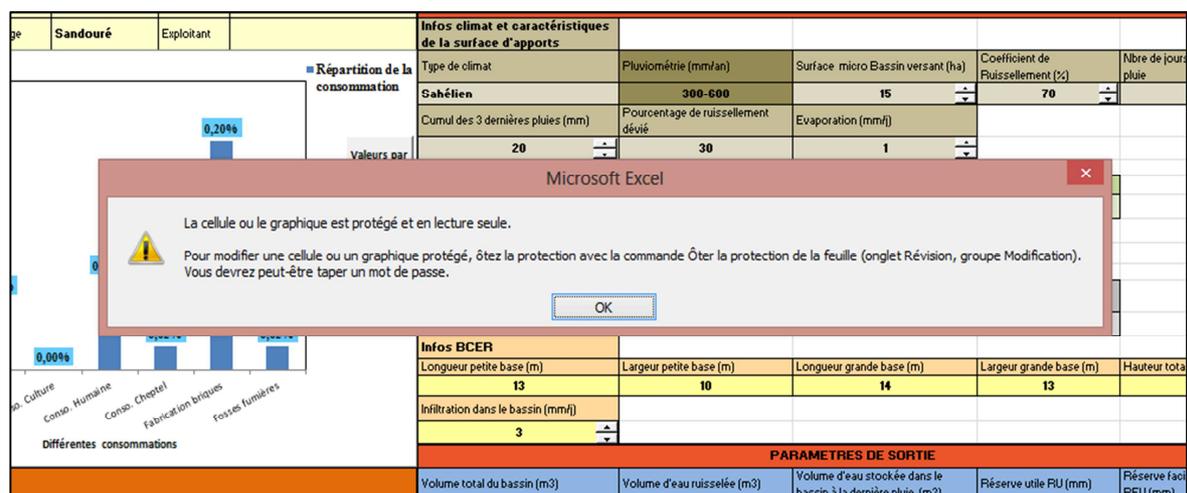


Figure 22: Fenêtre d'avertissement 2

IV. QUATRIÈME PARTIE : EXEMPLE D'APPLICATION DU MTGE_BCER 2013

IV.1. Présentation du cas d'étude

Considérons le cas du bassin de M. Boukaré MAÏGA à Mogodin (3km de Kongoussi). Le climat de la province du Bam étant de type sahélien, les différentes informations disponibles se résument comme suit :

- Surface d'apport : 10ha ;
- Coefficient de ruissellement du bassin versant : 30% (prés et champs cultivés) ;
- Culture : maïs variété Barka de 80 jours ;
- Superficie de la parcelle : 4.5ha ;
- Types de sols dans la zone : sableux ;
- Infiltration dans le bassin : 10mm/jr ;
- Évaporation de la période : 3mm/jr ;
- Profondeur du sol : 1.10m ;
- Cumul des 3 dernières pluies : 20mm ;
- Proportion d'eau ruisselée collectée dans le BCER : 30% ;
- Hauteur d'eau restant dans le BCER à la fin de la dernière séquence précédente : 0mm ;
- Dimensions du BCER :

	Largeur petite base	Longueur petite base	Largeur grande base	Longueur grande base	Profondeur du bassin
Valeurs (m)	12	13	15.2	16.2	1.40

- Quantités d'eau allouées aux différentes activités

	Consommation humaine	Cheptel	Fabrication de briques	Fosses fumières
Valeurs (m³/j)	0.5	0.4	1.0	0.5

IV.2. Discussion

Plusieurs simulations ont été effectuées surtout pour les cas les plus défavorables (la phase de développement, période pendant laquelle le maïs atteint son pic de consommation (3.9mm/j)).

À la suite de l'introduction des différents paramètres d'entrée conformément aux données ci-dessus, nous obtenons les résultats suivants dans la zone de paramètres de sortie :

PARAMETRES DE SORTIE				
Volume total du bassin (m3)	Volume d'eau ruisselée (m3)	Volume d'eau stockée dans le bassin à la dernière pluie (m3)	Réserve utile RU (mm)	Réserve facilement utilisable RFU (mm)
282	360	108	60,5	40,3
Besoins en eau de la phase BE (mm/j)	Nbre de jours avant déclenchement de l'irrigation	Hauteur totale d'eau infiltrée Hinf(mm)	Hauteur totale d'eau évaporée Hev(mm)	Hauteur d'eau allouée à la consommation humaine (mm)
3,9	10	100	30	24,9
Hauteur d'eau allouée au cheptel (mm)	Hauteur d'eau allouée à la fabrication des briques (mm)	Hauteur d'eau allouée à la fosse fumièr (mm)	Volume disponible pour l'irrigation (m3)	Hauteur d'eau allouée aux plantes Hpl(mm)
19,9	49,7	24,9	62,9	0,0
Autonomie du BCER sous irrigation d'appoint Nirr (jours)	Volume restant à la fin de la séquence sèche (m3)			
bassin n'est pas sous irrigation	57,9			

Figure 23: Étude de cas, résultats

La principale information que nous retenons ici est que, la durée possible sans irrigation d'appoint est de 10 jours. Ceci signifie que la quantité d'eau stockée dans le sol à la fin de la dernière pluie offre une autonomie de 10 jours aux plantes, donc sans apports supplémentaires d'eau par l'exploitant.

IV.2.1. Durée de la séquence sèche inférieure ou égale à 10 jours

S'il s'avère que la durée de la séquence sèche n'excède pas les dix (10) jours, alors M. Boukaré n'aura pas à se servir de l'eau de son bassin pour un quelconque besoin d'irrigation. Le modèle estime que la quantité d'eau présente dans le BCER tourne autour de 58 m³ à la fin de la séquence sèche, si les consommations journalières des diverses activités restent telles qu'insérées dans les paramètres d'entrée. De plus, la somme des différents pourcentages de consommation nous indique que la quantité d'eau consommée au bout de 10 jours vaut 46.4% du volume total stocké, soit environ la moitié du volume d'eau se trouvant dans le bassin. En utilisant le solveur d'Excel, on peut estimer la quantité d'eau allouable à chaque activité, afin d'épuiser totalement le bassin au bout de 10 jours.

Tableau 8: Quantité d'eau allouable aux différents usages

	Consommation humaine	Cheptel	Fabrication de briques	Fosses fumières
Valeurs (m ³ /j)	1.9	1.8	2.4	1.9

À titre d'exemple, d'après les enquêtes de terrain, la construction d'une case familiale consommerait en moyenne 2 m³ d'eau (pour la fabrication de 350 briques de 20 cm d'épaisseur). On peut donc en déduire qu'avec 2.4 m³ d'eau, on pourrait construire une (01) case familiale et fabriquer 140 briques en réserve.

IV.2.2. Durée de la séquence sèche supérieure à 10 jours

Lorsque l'on fait varier la durée de la séquence sèche au-delà de 10 jours, le modèle indique que le nombre de jours d'autonomie du bassin (nombre de jours d'irrigation possible) est nul. Ceci est dû au fait que le volume d'eau stockée dans le bassin à la date de déclenchement de l'irrigation d'appoint ne permet pas d'irriguer toute la superficie emblavée. Nous rappelons que le modèle est programmé de telle sorte qu'une fois que la séquence sèche dépasse le nombre de jours sans irrigation, les besoins en eau du stade végétatif considéré sont pris en compte dans le calcul des consommations totales, ceci sur toute la surface cultivée.

Pour remédier à ce problème, M. Boukaré devrait commencer par réduire les quantités d'eau allouées aux différentes activités autres que l'arrosage des plantes. Si cette réduction ne permet pas d'augmenter de manière significative le nombre de jours d'irrigation possible, alors il se verra dans l'obligation de diminuer la superficie des terres irriguées, afin de sécuriser une partie de sa production.

Dans le présent cas d'étude, nous avons constaté que l'arrêt de toutes les consommations non agricoles n'a aucun impact sur l'autonomie du bassin. Nous avons par la suite déterminé pour diverses tailles de parcelles, l'autonomie maximale possible du bassin (tableau 9). Pour savoir si une parcelle de superficie quelconque peut résister à une durée de séquence sèche donnée, il faut vérifier la valeur de la cellule « *Volume restant à la fin de la séquence sèche* ». Si cette dernière est positive, alors le disponible d'eau dans le BCER peut couvrir la séquence sèche ; sinon il ne peut pas.

Tableau 9: Autonomie maximale du BCER en fonction de la superficie irriguée

Superficies (ha)	Autonomie (jours)
0,25	6
0,5	3
0,75	2
1	1
1,5	1
2	1
3	0

N.B : Les consommations liées aux différentes activités que l'arrosage des plantes sont nulles.

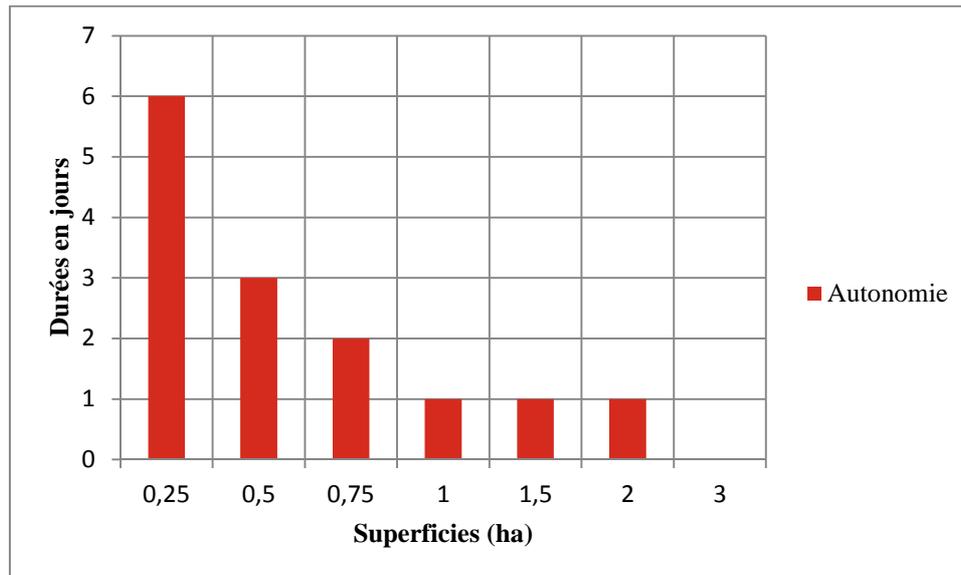


Figure 24: Autonomie maximale du BCER en fonction de la superficie irriguée

La figure 24 montre que plus la superficie irriguée diminue, plus longtemps l'exploitant peut résister à la poche de sécheresse. Cependant, il ne faudrait pas perdre de vue que la réduction de la surface irriguée est synonyme de diminution des récoltes. Sachant que les variétés de maïs extra précoces (cycle inférieur à 85 jours) dont fait partie le maïs Barka ont des rendements assez faibles (moins de 4tonnes à l'hectare), il serait préférable d'éviter de diminuer les superficies à irriguer au-delà d'un certain seuil, sous risque d'avoir des récoltes trop faibles.

V. DISCUSSION

Le MTGE_BCER 2013 connaît certaines limites dans sa conception et dans son fonctionnement, qui réduisent sa performance et sa robustesse.

Le calcul des besoins en eau des plantes a été effectué avec les données climatiques (ETP et pluviométrie) de la station synoptique de Ouahigouya ; ce qui limite l'utilisation du modèle aux régions climatiquement semblables à cette zone. De ce fait, vu la grande variabilité spatiale de la pluviométrie dans le Sahel (figure 25), il serait intéressant d'intégrer au MTGE_BCER 2013 les données pluviométriques de plusieurs stations synoptiques des pays sahéliens, que l'utilisateur aura la possibilité de choisir selon le lieu où il se trouve.

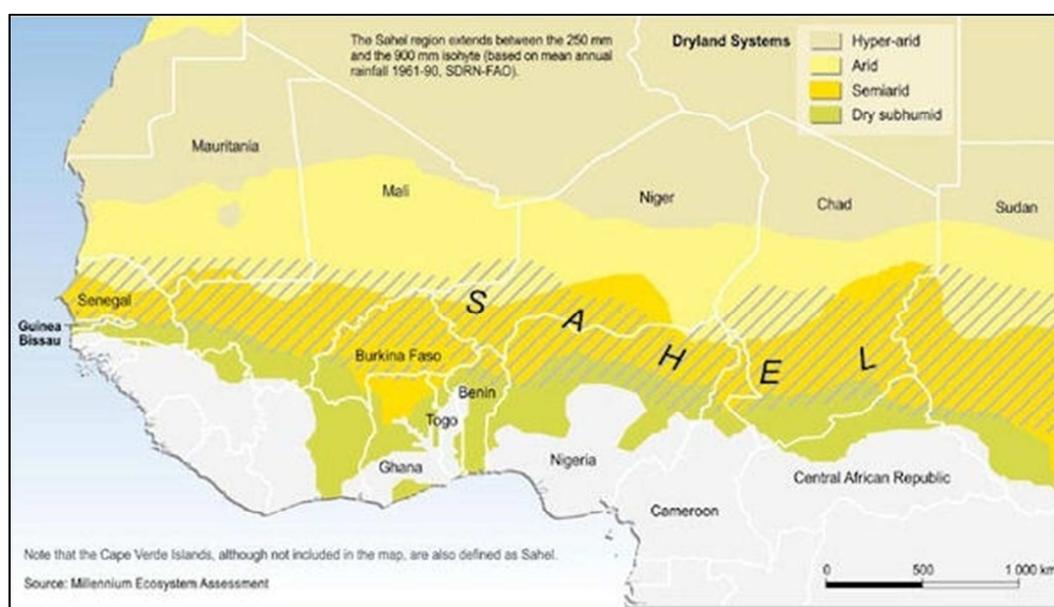


Figure 25: Bande du Sahel en Afrique

Source : (Dembélé, 2009)

Une autre solution serait de laisser la latitude à l'utilisateur d'insérer directement les ETP et pluviométries de sa zone d'intervention. Bien qu'offrant plus de liberté (dans l'actualisation des données climatiques), la seconde option est cependant plus délicate, car une mauvaise manipulation remettrait totalement en cause le calcul des besoins hydriques des cultures. De plus, elle nécessiterait certaines connaissances en traitement de données climatiques, or l'objectif de cette étude est de produire un outil ne demandant pas forcément une expertise de la part de l'utilisateur.

Le MTGE_BCER 2013 n'intègre que six (06) spéculations, à savoir : le maïs, le mil, le sorgho, l'aubergine, le niébé et le piment. L'ajout d'autres types de sols, et d'une gamme de spéculations plus large (selon les habitudes alimentaires et commerciales des populations autres

que celle de la province du BAM) serait aussi un atout à l'élargissement du champ d'utilisation du modèle. Par ailleurs, pendant notre visite de terrain, nous avons constaté que les paysans ne pratiquent pas que des cultures pures (une seule spéculiation à la fois), mais qu'ils ont très souvent recours à des associations de deux cultures (céréale et culture maraîchères sur la même parcelle). Il serait donc très intéressant d'intégrer cet aspect-là dans le modèle.

Concernant l'estimation de la réserve hydrique du sol en début de séquence sèche, la réserve facilement utilisable RFU a été estimée à 2/3 de la réserve utile du sol RU. Cependant, plus rigoureusement, la RFU dépend d'un facteur de déplétion p propre à des groupes de culture. Ce facteur varie entre 0.2 et 0.9, en fonction de l'ETM et du type de culture (tableau 10). Il serait donc intéressant d'intégrer ce tableau dans le modèle, afin d'appliquer un facteur de déplétion plus précis pour mieux estimer ainsi la RFU.

Tableau 10: Facteurs de déplétion

Group	Values of ETM (mm/day)								
	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1	0.500	0.425	0.350	0.300	0.250	0.225	0.200	0.200	0.175
2	0.675	0.575	0.475	0.400	0.350	0.325	0.275	0.250	0.225
3	0.800	0.700	0.600	0.500	0.450	0.425	0.375	0.350	0.300
4	0.875	0.800	0.700	0.600	0.550	0.500	0.450	0.425	0.400
Group	Crops								
1	Onion, pepper, potato								
2	Banana, cabbage, grape, pea, tomato								
3	Alfalfa, bean, citrus, groundnut, pineapple, sunflower, water melon, wheat								
4	Cotton, maize, olive, safflower, sorghum, soybean, sugar beet, sugarcane, tobacco								

Source : (Keïta, 2012)

Lors de notre visite de terrain les BCER n'étaient pas dotés de limnimètres ; mais à ce jour ils sont en cours d'installation par les ingénieurs du PICIC. L'installation de ces limnimètres dans les bassins permettra de simplifier l'utilisation du modèle, en ce sens que l'utilisateur n'aura plus besoin de renseigner sur certaines données (superficie du bassin versant, coefficient de ruissellement, cumul de pluies) pour connaître les apports en eau dans le bassin ; la lecture se fera plutôt de façon directe.

CONCLUSION

L'agriculture occupe une place très importante dans le Sahel, vu les forts revenus qu'elle engendre. Ainsi, assurer un certain degré de stabilité des rendements des récoltes aux agriculteurs doit être une priorité nationale dans les politiques de développement de la plupart des pays en voie de développement. Cependant, maîtriser une ressource aussi aléatoire que la pluie au Sahel a toujours semblé être une gageure, vu la vitesse à laquelle les changements climatiques se produisent. Face à cette difficulté, la modélisation constitue un important moyen dans la prise rapide de décisions. En effet, la promptitude avec laquelle les modèles peuvent présenter les effets à long terme de chacun de nos choix d'utilisation permet d'envisager le maximum de scénarios possibles (aussi bien critiques que favorables), avec comme corollaire une meilleure gestion de l'eau.

Le modèle présenté dans ce document, le MTGE_BCER 2013, se veut comme un outil simple et pouvant aisément se substituer à des modèles plus complexes pour la prise de décisions rapides dans la gestion de l'eau des BCER. Les variétés culturales, les zones climatiques et les types de sols pris en compte lui confèrent une bonne fiabilité dans le pilotage de l'irrigation d'appoint.

Nous pensons cependant que le MTGE_BCER 2013 pourrait être un outil encore plus fiable en intégrant d'autres paramètres tels qu'une plus large gamme de spéculations et l'association de cultures. De plus, la difficulté de modification des données pluviométriques et évaporatives en constitue l'une des faiblesses. Enfin, nous pensons qu'une information climatique suffisamment fiable et solide, notamment une bonne connaissance des probabilités d'apparition de séquences sèches dans les différentes zones d'intervention, serait un atout majeur à l'optimisation de l'utilisation du MTGE_BCER 2013.

BIBLIOGRAPHIE

- Albergel, J., Perez, P., & Vaksman, M. (1991). Amélioration des modèles du bilan hydrique sur parcelle par la prise en considération des états de surface. *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*(199), 483-496.
- Bado, A., & Zongo, I. (2009). *Monographie de la région du Centre-Nord*. (B. C. Recensement, Éd.) Ouagadougou: Ministère de l'Economie et des finances.
- Bathelot, B. (2011, juin). *Définition-modélisation*. Consulté le 20 mai 2013, sur [www.definitions-marketing.com](http://www.definitions-marketing.com/Definition-Modelisation): <http://www.definitions-marketing.com/Definition-Modelisation>
- Beauchamp, J. (2006, Juillet). *Les systèmes aquifères*. Consulté le 25 avril 2013, sur www.u-picardie.fr: <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours.qge/du-7.htm>
- Brouwer, C., & Heibloem, M. (1987). *Gestion des eaux en irrigation* (Vol. N°3). Rome: Edition Française.
- Chetaille, A., & Lagandré, D. (2010). L'assurance indicielle, une réponse face aux risques climatiques. *Grain de sel*(49), 20-21.
- Dembélé, D. (2009, juin). *Campagne Agricole dans le Sahel : Le CilSS prévoit moins de pluies cette année*. Consulté le 04 juin 2013, sur www.journaldumali.com: <http://www.journaldumali.com/article.php?aid=64>
- Doorenbos, J. (1975). *Les besoins en eau des cultures*. Rome, Italie: FAO.
- Hubert, P. (2013, février). *Dictionnaire français d'hydrologie*. (C. N. Hydrologiques, Éditeur) Consulté le 15 mai 2013, sur [www.atilf.atilf.fr](http://atilf.atilf.fr): <http://atilf.atilf.fr/dendien/scripts/tlfiv5/visusel.exe?99;s=2607057015;r=3;nat=;sol=0;>
- Keïta, A. (2012). *Localized irrigation*. Ouagadougou: 2iE.
- LeBissonais, Y., Thorette, J., Bardet, C., & Daroussin, J. (2002). *L'état hydrique des sols en France*. France: INRA.
- Lhomme, J.-P., & Eldin, M. (1984). Un modèle agroclimatologique de simulation du bilan hydrique des cultures. Dans *Besoin en eau des cultures* (pp. 840-852). Paris: ORSTOM.
- Margat, J. (1996, Novembre). *Pluie ou précipitation efficace (ou utile)*. (G. Castany, Éditeur) Consulté le 26 Avril 2013, sur www.webworld.unesco.org: <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/FRDIC/DICPLUIE.HTM>
- Poss, R., Saragoni, H., & Imbernon, J. (1988). Bilan hydrique simulé du maïs au Togo Méridional. *Agriculture tropicale*, 18-29.

- Rodier, M., & Lussigny, D. (1954). Etude de l'évaporation sur les surfaces d'eau libre en Afrique Noire Africaine. Dans ORSTOM (Éd.), *3èmes journées de l'Hydraulique* (pp. 89-99). ORSTOM.
- Sarr, B., Kafando, L., & Atta, S. (2011, Août). Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Services*, 1659-1675.
- Savva, P., & Frenken, K. (2001). *Irrigation manual module 8 : sprinkler irrigation systems, planning, design, operation and maintenance*. FAO Subregional office for East and southern.
- Sidesa. (2012, juillet). *Le coefficient de ruissellement*. Consulté le 03 juin 2013, sur www.sidesa.fr: <http://www.sidesa.fr/fr/ruissellement/le-risque-inondation/1546-le-coefficient-de-ruissellement>
- Watson, R., Zinyowera, M., & Moss, R. (1998). The Regional Impacts of Climatic Change: An Assessment of Vulnerability. Dans B. Sarr, *Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso* (pp. 1659-1675). Niamey: International Formulae Group.
- Xhantoulis, D. (2013). *Les besoins en eau des cultures*. Ouagadougou, Burkina Faso: Programme d'Appui au Développement de l'Irrigation (PADI).

Pages web visitées :

- <http://onedd-burkina.info/index.php/component/content/article/11-theme-04/50-indicateur-040202>;
- <http://www.fao.org/docrep/S2022E/s2022e08.htm#TopOfPage>;
- http://www.ecosociosystemes.fr/eau_sol.html;
- <http://office.microsoft.com/fr-fr/excel-help/ajouter-une-case-a-cocher-une-case-doption-ou-un-bouton-bascule-a-une-feuille-de-calcul-HP010236677.aspx>;
- <http://www.ngara.org/french/bukinafaso.html>;
- <http://rhone-alpes.synagri.com/portail/calculer-son-bilan-hydrique-pour-optimiser-son-irrigation-avec-le-bulletin-d-alerte-hebdomadaire>.

ANNEXES

Annexe 1 : Questionnaire 1

PROJET IRRIGATION DE COMPLÉMENT ET INFORMATION CLIMATIQUE

QUESTIONNAIRE ADRESSÉ AUX PAYSANS

I. Informations générales

Date de l'entretien :.....

Région : CENTRE NORD

Province : BAM

Commune :.....

Village/Secteur :.....

II. Questions

Nom et Prénoms :

1. Quelle est la superficie de terre que vous exploitez ?

.....
.....

2. Quels types de sols rencontre-t-on ici ?

.....
.....
.....

3. Techniques utilisées en fonction du lieu de culture

	Bas-fonds	Plaines	Pied de colline	
Maïs				
Mil				
Sorgho				
Aubergine				
Piment				
Niébé				

Autres :

4. Quelles sont les spéculations que vous avez l'habitude de produire ? Pourquoi ?

.....
.....
.....
5. Et pour cette saison qu'est-ce que vous envisagez de produire ? Pourquoi ?

.....
.....
.....
6. Quel est le cycle des différentes cultures que vous produirez ?

Cultures						
Cycle (jours)						

7. À quel moment avez-vous l'habitude de semer ? Qu'est-ce qui vous guide sur le choix des dates de semis ?

Cultures						
Date de semis						

.....
.....
.....
8. Quelle est la date au plus tôt/plus tard à laquelle vous avez déjà semé ? Pourquoi ?

	Date	Raisons
Au plus tôt		
Au plus tard		

9. Comment ont été les récoltes ces années ?

	Appréciation de la récolte	Rendement approximatif
Mise en terre précoce		
Semis tardif		

10. Y a-t-il des structures ou des personnes particulières qui vous fournissent des informations sur les prévisions de la campagne agricole ? OUI : ; NON :

Si oui, lesquelles ?

.....
.....
.....

Si non, aimeriez-vous en avoir, et de quels types ?

.....
.....

11. Ces informations influencent-elles le choix de vos cultures ou encore les dates de semis ?

OUI : ; NON :

Si oui, de quelle manière ?

12. Quelle est la plus longue période sans pluie durant la saison des pluies, que vous avez vécue durant ces cinq dernières années ? Selon vous qu'est ce qui a causé cela ?

.....
.....
.....

13. Étiez-vous informer à l'avance qu'il y allait avoir ce manque de pluie ?

OUI : ; NON :

Si oui comment l'avez-vous su ?

.....
.....
.....
.....

Comment avez-vous comblé ce manque d'eau ?

.....
.....
.....

14. Pendant une campagne, combien de fois avez-vous de périodes sans pluies ?

.....
.....

15. Entre le mil, le maïs et le sorgho, quelle est la spéculation qui résiste le mieux sans pluies ?

Maïs : ; Mil : ; Sorgho :

16. Quelle est la longueur maximale de séquence sèche que chacune de ces cultures peut supporter ?

Maïs	Mil	Sorgho

17. Qu'est-ce qui vous indique qu'il faut irriguer ou non ?

.....
.....
.....

18. Avez-vous un BCER ?

OUI : ; NON :

Si non, aimeriez-vous en avoir ?

19. Lorsque le BCER contient de l'eau, quels sont les raisons qui vous amènent à vous en servir ?

.....
.....
.....

20. Quel est votre moyen d'exhaure ? Pourquoi ?

.....
.....
.....

21. Avez-vous choisi de construire les BCER par nécessité ?

OUI : ; NON :

Si oui, à quelles fins ?

.....
.....
.....

22. En quoi ces bassins sont-ils avantageux ?

Annexe 2 : Questionnaire 2

PROJET D'IRRIGATION DE COMPLÉMENT ET INFORMATION CLIMATIQUE

QUESTIONNAIRE

Nom de la structure :

Commune :

Village :

1. Quelles sont les structures qui interviennent dans le domaine de l'agriculture dans la région ?

2. Y a-t-il des services spécialisés dans l'information climatique dans la région ?

OUI : NON :

2.1. Si oui, lesquels ?

2.2. Sont-ils chargés de suivre les paysans pendant les campagnes agricoles ?

OUI : NON :

Si oui, de quelle manière ?

3. Quel est votre rôle en matière d'agriculture ici ?

4. Diffusez-vous une information climatique sur les campagnes agricoles à venir ?

OUI : NON :

4.1. Si Oui, lesquelles ?

4.2. Par quels moyens de diffusion ?

Annexe 3 : Valeurs par défaut du modèle

1. Renseignements :

- Pays : **Burkina Faso** ;
- Région : **Centre-Nord** ;
- Province : **BAM** ;
- Village : **Sandouré** ;

2. Infos climat et caractéristiques de la surface d'apport :

- Type de climat : **sahélien** ;
- Surface micro bassin versant : **10ha** ;
- Coefficient de ruissellement : **70%** ;
- Nombre de jours depuis la dernière pluie : **05 jours** ;
- Cumul des 3 dernières pluies : **20mm** ;
- Pourcentage de ruissellement dévié : **50%** ;
- Évaporation : **1mm/j.**

3. Données agricoles :

- Spéculation : **maïs** ;
- Longueur de cycle : **85 jours** ;
- Stade végétatif : **maturation** ;
- Type + texture de sol : **sablo-argileux** ;
- Profondeur de sol arable : **1.05m** ;
- Superficie cultivée : **0.5ha** ;

4. Conso diverses activités :

- Eau de consommation humaine : **0.2 m³/j** ;
- Eau de cheptel : **0.05 m³/j** ;
- Eau de fabrication de briques : **0.1 m³/j** ;
- Eau pour fosses fumières : **0.05 m³/j.**

5. Infos BCER

- Largeur petite base : **12.00m** ;
- Longueur petite base : **13.00m** ;
- Largeur grande base : **15.20m** ;
- Longueur grande base : **16.20m** ;
- Hauteur totale du bassin : **1.40m** ;
- Infiltration : **3mm/j.**

Annexe 4 : Macro d'affichage des besoins en eau : « Watercrop »

Option Explicit

```
Private Function getCropCol(crop As String) As Integer
    Dim i As Integer
    For i = 3 To 8
        If Worksheets("besoins_phases").Cells(11, i).Value = crop Then
            getCropCol = i
            Exit Function
        End If
    Next i
    getCropCol = -1
End Function
```

```
Private Function getPhase(phase As String) As Integer
    Dim i As Integer
    For i = 12 To 15
        If Worksheets("besoins_phases").Cells(i, 2).Value = phase Then
            getPhase = i
            Exit Function
        End If
    Next i
    getPhase = -1
End Function
```

```
Function WaterReq(crop As String, stade As String) As Double
    WaterReq = Worksheets("besoins_phases").Cells(getPhase(stade), getCropCol(crop)).Value
End Function
```

Annexe 5 : Macros des messages d'ouverture et de fermeture

```
Private Sub Workbook_BeforeClose(Cancel As Boolean)
    MsgBox ("Merci d'avoir utilisé le MTGE_BCER, au revoir!")
End Sub
```

```
Private Sub Workbook_Open()
    MsgBox ("Bienvenue dans ce modèle technique de gestion de l'eau des _
bassins de collecte des eaux de ruissellement (MTGE_BCER). Veuillez _
remplir correctement la zone de renseignement et les paramètres d'entrée _
conformément à votre zone d'étude.")
End Sub
```