

INFLUENCE DE LA VARIABILITE DE LA PLUIE SUR LA PRODUCTION AGRICOLE DANS LE BASSIN DE LA VOLTA : EXEMPLE DU MAÏS



Fabien Langlois

Université Montpellier II, France

2006

Volta Basin Focal Project Report No 1

CGIAR Challenge Program on Water and Food



INFLUENCE DE LA VARIABILITE DE LA PLUIE SUR LA PRODUCTION AGRICOLE DANS LE BASSIN DE LA VOLTA : EXEMPLE DU MAÏS

Fabien Langlois

Université Montpellier II, France

2006

Ce document doit être cité de la façon suivante :

Langlois, F., 2006.- *Influence de la variabilité de la pluie sur la production agricole dans le bassin de la Volta : exemple du maïs*. Volta Basin Focal Project Report No 1. IRD, Montpellier, France, and CPWF, Colombo, Sri Lanka, 51 p.

Remerciement

Je remercie Jacques LEMOALLE et Isabelle TERRASSON pour m'avoir proposé ce stage. Je remercie tous particulièrement Jacques pour tous les renseignements qu'il m'a apportés sur le bassin de la Volta, et Isabelle pour les nombreuses astuces qu'elle m'a apprises sous Word. Je remercie également mon frère Guillaume pour ces magnifiques photos de la Volta. Je remercie aussi toutes les personnes que j'ai oubliées.

Sommaire

Introduction.....	7
I. Prise en main de CropWat.....	8
A. Pourquoi utiliser CropWat ?.....	8
B. Fonctionnement basique du logiciel.....	8
C. Les différents modules et les paramètres qui leur sont associés	9
1. Les données climatiques.....	9
2. Les données pluviométriques	9
3. Les données sur les types de culture.....	9
4. Le module schéma de planification des cultures.....	10
5. Le module des propriétés du sol.....	10
6. Module méthode de calcul	10
D. Affichage des résultats	11
1. Table climatique :.....	11
2. Table des besoins en eaux des cultures	11
3. Table du programme d'irrigation	11
E. Schéma de fonctionnement du logiciel et formules utilisées	12
1. Calcul de l'ETo	12
2. Calcul des pluies efficaces	12
3. Calcul de la crop water requirement (CWR) ou ETm.....	14
4. Calcul de l'irrigation requise.....	14
5. Calcul de l'alimentation en eau du champ (FWS).....	14
6. Calcul de la réserve utile (TAM ou RU).....	14
7. Calcul de la réserve facilement utilisable (RAM).....	14
8. Calcul de l'évapotranspiration réelle de la culture ETc	14
9. Calcul du déficit de la réserve utile dans le sol (SMD).....	15
10. Calcul de la diminution de rendement.....	15
F. Paramètres pouvant être modifiés	16
G. Exemple d'utilisation du logiciel	16
II. Application du logiciel CropWat au bassin de la Volta.....	16
A. Présentation du Bassin de la Volta.....	16
B. Effet d'un stress hydrique sur le rendement d'une culture de maïs	16
C. Rassemblement des données climatiques du Ghana et du Burkina Faso.....	17
D. Paramètre important dans l'utilisation du logiciel.....	17
E. Paramètres ne pouvant pas être modifiés et incohérence du logiciel.....	18
F. Facteurs les plus sensibles.....	18
III. Calcul des rendements.....	19
A. Comparaison des pertes de rendements	19
1. Mode de détermination de la date de plantation	19
2. Comparaison par année	19
3. Comparaison géographique nord/sud.....	20
4. Variation de la diminution de rendement dû à l'intervalle de temps entre deux événements pluvieux.....	21
5. Comparaison des rendements en fonction du type de sol.....	21
B. Calcul de rendement.....	23
Conclusion.....	25
Bibliographie.....	26
Résumé.....	27
Annexe	28

Table des figures

Figure 1 Schéma général du Bilan hydrique d'une nappe	8
Figure 2 Données sur les types de culture.....	9
Figure 3 Schéma de fonctionnement du logiciel.....	13
Figure 4 Comparaison annuelle des diminutions de rendement par année à Kete-Krachi (Ghana).....	19
Figure 5 Comparaison annuelle des diminutions de rendement par année à Tamale (Ghana)	20
Figure 6 Comparaison annuelle des diminutions de rendement par année à Ouagadougou (Burkina Faso).....	20
Figure 7 Comparaison des diminutions de rendements entre le nord et le sud du bassin de la Volta.....	21
Figure 8 Comparaison des diminutions de rendements en fonction de l'intervalle de jours entre deux événements pluvieux	21
Figure 9 Comparaison des diminutions de rendement en fonction de la Réserve Utile Maximale à Tamale (Ghana).....	22
Figure 10 Comparaison des diminutions de rendement en fonction de la Réserve Utile Maximale à Ouagadougou (Burkina Faso)	22
Figure 11 Comparaison des rendements théoriques et réels à Tamale (Ghana)	23
Figure 12 Comparaison des rendements théoriques et réels à Kete-Krachi (Ghana).....	23
Figure 13 Comparaison des rendements théoriques et réels à Ouagadougou (Burkina Faso).	24

Liste des Annexes

Annexe I	28
Contenu des fichiers de sauvegarde	28
Annexe II	30
Exemple d'utilisation du logiciel	30
Annexe III	33
Carte du bassin versant de la Volta	33
Annexe IV	34
Données climatiques de la région de Kete-Krachi (Ghana)	34
Annexe V	39
Données climatiques de la région de Tamale (Ghana)	39
Annexe VI	43
Données climatiques de la région de Ouagadougou (Burkina Faso)	43
Annexe VII	47
Comparaison annuelle des diminutions de rendement dans la région de Kete-Krachi (Ghana)	47
Annexe VIII	47
Comparaison annuelle des diminutions de rendement dans la région de Tamale (Ghana) ..	47
Annexe IX	47
Comparaison annuelle des diminutions de rendement dans la région de Ouagadougou (Burkina Faso)	47
Annexe X	48
Variabilité du rendement en fonction de l'écart en jour entre 2 événements pluvieux	48
Annexe XI	48
Caractéristique des sols	48
Annexe XII	49
Variabilité du rendement en fonction du type de sol région de Tamale (Ghana)	49
Annexe XIII	50
Variabilité du rendement en fonction du type de sol région de Ouagadougou (Burkina Faso)	50
Annexe XIV	51
Comparaison des rendements théorique et réel	51

Introduction

J'ai effectué mon stage de première année de Master, à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de Montpellier, au sein de l'Unité Mixte de Recherche (UMR) G-EAU, qui est localisée en partie à la Maison des Sciences de l'Eau. C'est là que se situe la partie IRD de l'UMR G-EAU.

Ce stage s'inscrit dans le cadre du Bassin Focal Project Volta (BFP Volta), qui est financé par le Challenge Programme on Water and Food. Il s'agit d'un projet de développement visant à fournir une analyse de la pauvreté sur le bassin versant de la Volta, en s'appuyant sur l'étude de la productivité agricole et des relations eau-pauvreté. Il permet une coopération d'organismes du "nord" avec ceux du "sud".

Jacques Lemoalle est le coordonnateur du BFP Volta. Son rôle est d'assurer son orientation scientifique : définition de la méthodologie, formation de l'équipe de recherche /répartition des thèmes de recherche au sein de l'équipe, vue d'ensemble et orientation de la recherche menée, synthèse des travaux des chercheurs, analyse supplémentaire à l'échelle du Bassin Versant.

Dans le BFP Volta, ce stage intervient au début de la phase de traitement de données, et a pour finalité de tester la capacité du logiciel Cropwat de la FAO à déterminer l'impact du stress hydrique sur les rendements agricoles

Nous avons donc procédé à l'étude du logiciel pour en comprendre son fonctionnement, les données utilisées et comment il restitue les résultats.

Puis en rassemblant des données sur le bassin de la Volta et en les utilisant avec le logiciel, nous avons pu déterminer les paramètres qui lui sont importants et les plus sensibles.

Enfin, nous avons utilisé ces données pour le calcul de la productivité agricole sur le bassin versant. Et ainsi déterminer l'opportunité ou non de l'utilisation du logiciel pour la suite du projet.

I. Prise en main de CropWat

A. Pourquoi utiliser CropWat ?

Ce logiciel a été conçu dans le but de calculer l'évapotranspiration, les besoins en eau des cultures et plus particulièrement la conception et la gestion de dispositifs d'irrigation. Il est également utilisé pour déterminer le rendement agricole. Toutefois, il est possible de l'utiliser pour faire des calculs de rendement sans irrigation. Nous pouvons aussi utiliser ce programme pour observer des périodes de déficits en eau dans le sol, donc un stress hydrique pour la plante entraînant une baisse du rendement. L'emploi du logiciel peut être utile pour déterminer le type de culture qui aurait la meilleure productivité en fonction des précipitations et de l'humidité du sol de la période.

B. Fonctionnement basique du logiciel

Le fonctionnement de base du logiciel CropWat repose sur quelques variables. Toutes ces variables s'articulent autour du bilan hydrique qui s'écrit de façon générale sous la forme

$$R_i = R_{i-1} + P_{\text{eff}} + \text{Irr} - D - \text{ETm}$$

R_i	Réserve en eau du sol au jour i (mm)
R_{i-1}	Réserve en eau du sol au jour $i-1$ (mm)
P_{eff}	Précipitation efficace (mm)
Irr	Apport de l'irrigation (mm)
D	Drainage
ETm	ETm évapotranspiration maximale (= Crop Water Requirement (CWR) : besoin en eau des cultures)

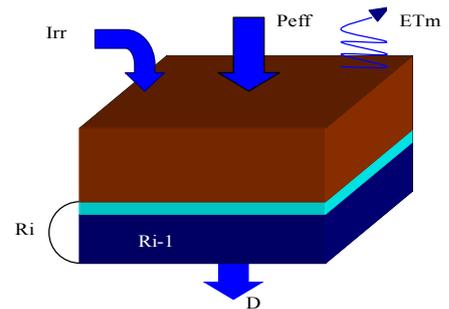


Figure 1 Schéma général du Bilan hydrique d'une nappe

Cette équation regroupe toutes les variables qui sont essentielles au fonctionnement du logiciel.

-Tout d'abord les précipitations efficaces, qui correspondent, en agriculture, à la partie résiduaire de l'eau de pluie qui contribue à reconstituer la réserve du sol en eau, utilisable par les plantes cultivées (granddictionnaire.com). Elles prennent en compte les valeurs de précipitations totales et de ruissellement.

-L'apport de l'irrigation, correspond à l'apport de l'homme pour les cultures.

- ETm correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture donnée. Le logiciel considère que l' ETm est égale à la CWR. En effet, si nous considérons la quantité d'eau stockée dans la plante, celle-ci est très faible par rapport à ce qui est évapotranspiré. Donc si nous faisons l'approximation que l' $\text{ETm} = \text{CWR}$, nous ne faisons pas une grosse erreur.

-Le drainage qui correspond à la quantité d'eau qui sort de notre système en s'infiltrant vers les nappes profondes ou l'eau qui circule par écoulement souterrain. Dans notre programme, cette quantité n'est pas prise en compte donc nous considérerons qu'elle est égale à 0.

Ces variables peuvent être mesurées ou déterminées à des pas de temps différents (journalier, mensuel, etc.). Toutefois, il est bon de noter que CropWat ne prend en compte que des données climatiques mensuelles et qu'il les interpole pour obtenir des valeurs journalières.

C. Les différents modules et les paramètres qui leur sont associés

1. Les données climatiques

Les données climatiques rentrées dans CropWat, permettent au logiciel de calculer l'évapotranspiration théorique ou potentielle (ET_o). Pour cela, le programme utilise la formule de Penman-Monteith. Cette formule prend en compte la pression de vapeur, les radiations solaires nettes, le flux de chaleur du sol, la température, la vitesse du vent, etc.... . Un paragraphe sera consacré à toutes les formules utilisées par le logiciel.

2. Les données pluviométriques

CropWat utilise les données pluviométriques mensuelles pour calculer les précipitations efficaces. Le logiciel ne permet de rentrer que des données pluviométriques mensuelles, il est impossible de rentrer des valeurs journalières dans le logiciel. Le logiciel interpole les valeurs mensuelles pour obtenir des valeurs journalières.

3. Les données sur les types de culture.

Pour pouvoir déterminer les besoins en eau d'une plante, CropWat a besoin de connaître différents paramètres propres à cette dernière. Pour cela, nous entrons les caractéristiques de chaque phase de développement de la plante. Ces caractéristiques étant la durée de chaque phase, paramètre variant suivant le lieu de culture et la période dans l'année. Le logiciel divise la vie de la plante en 4 étapes (initial, développement, mi-saison, et enfin arrière-saison).

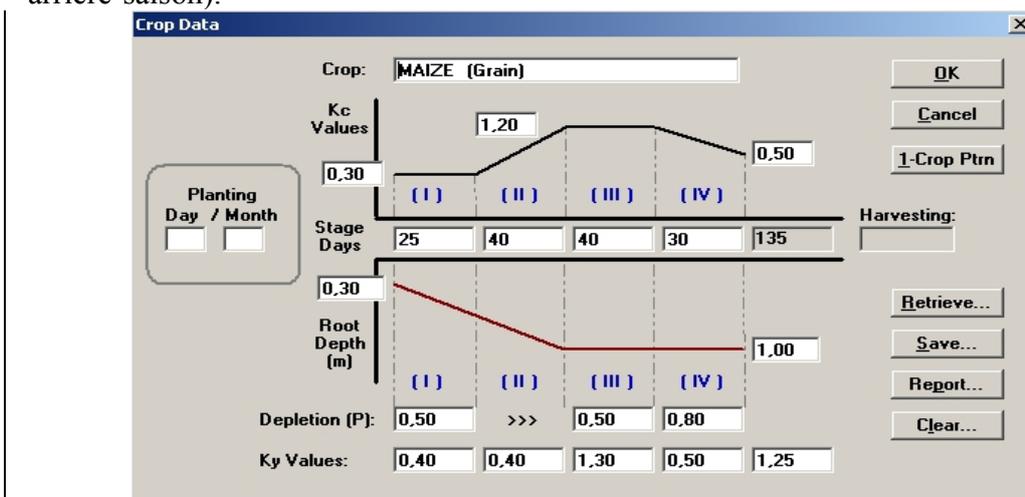


Figure 2 Données sur les types de culture

Le coefficient cultural K_c, qui est le rapport de l'évapotranspiration maximale d'une culture pendant une période déterminé de son cycle végétatif c'est-à-dire dans des conditions optimales, sur l'évapotranspiration potentielle (granddictionnaire.com). Le facteur de réponse du rendement, K_y, qui permet d'estimer les réductions de rendement dues au stress hydrique.

Il lie les pourcentages de rendement actuel et de l'évapotranspiration (pour la formule, se reporter au calcul du rendement). Le logiciel a également besoin de la profondeur des racines, du tarissement admissible (p) qui représente le niveau critique de la réserve à partir de laquelle, le stress dû au manque d'eau se fait sentir. Il est bon de noter que nous trouvons avec le logiciel de nombreux fichiers avec les caractéristiques de certaines plantes.

4. Le module schéma de planification des cultures.

Ce module permet de charger les données sur le type de culture, la date de plantation et la proportion qu'elles occupent sur la parcelle. Il est possible de diviser un type de culture en différents blocs et de préciser l'intervalle de temps, en jour, entre la date de plantation de chaque bloc. Cet intervalle, sera constant entre tous les blocs. Nous pouvons également rentrer des cultures différentes comme par exemple le maïs et le chou. Pour notre étude nous utiliserons toujours une culture de maïs occupant 100% de la surface.

5. Le module des propriétés du sol.

Il rassemble l'ensemble des données qui caractérise le sol. Sa réserve utile maximale, la vitesse maximale d'infiltration qui permet une estimation de l'écoulement de surface (ruissellement) pour le calcul des pluies efficaces. Nous rentrons également la profondeur maximale que peuvent atteindre les racines. Nous pouvons également définir le tarissement initial de la réserve utile et ainsi déterminer le stock initialement disponible dans le sol. Nous trouvons avec le logiciel trois fichiers de sol prédéfinis (light, medium et heavy)

A partir des modules qui viennent d'être brièvement décrits, CropWat est capable de calculer tous les paramètres, si tous les modules sont complètement remplis. En revanche, de nombreux processus ne sont pas pris en compte par le logiciel. En effet, des paramètres comme la quantité d'éléments nutritifs nécessaire à la plante pour son développement, tel que l'azote ou le phosphore, ne sont pas pris en compte. Dans le calcul de l'humidité du sol, ne sont pas pris en compte des paramètres comme l'infiltration vers les nappes profondes et donc la diminution des réserves pour la culture.

6. Module méthode de calcul

Dans ce module, il est possible de paramétrer quatre éléments.

- L'irrigation, que nous ne décrivons pas car nous ne l'utiliserons pas.
- L'ET_o, en modifiant les paramètres a et b (coefficient de Angstrom) qui permettent de calculer le rayonnement solaire. Nous pouvons également déterminer le mode de représentation graphique de l'ET_o.
- Les précipitations : nous pouvons choisir le nombre de jours entre deux événements pluvieux ce qui permet au logiciel d'interpoler les données mensuelles en journalières. En cochant "Rainfed schedule" nous utilisons que les précipitations comme seule origine de l'eau.
- Les précipitations efficaces, nous choisissons leur mode de calcul soit avec un pourcentage fixé des précipitations, avec une formule empirique dont les paramètres sont fixés, la même formule ou nous pouvons modifier les paramètres et enfin l'utilisation des formules du USDA – SCS, méthode que nous utiliserons.

Une fois que toutes ces données sont rentrées dans le logiciel, nous pouvons les sauvegarder sous forme de fichier. Les différents types de fichiers de sauvegarde sont décrits en Annexe I.

Une fois que tous ces paramètres sont rentrés et sauvegardés, nous pouvons regarder les résultats que nous obtenons. Pour cela, il y a deux modes d'affichage, sous forme de table et sous forme de graphe.

D. Affichage des résultats

1. Table climatique :

Cette table rassemble toutes les données climatiques que nous avons rentrées précédemment, plus les valeurs des radiation solaire et de l'ET_o qui ont été calculées par le logiciel. Il est bon de noter qu'une seule valeur par mois est calculée.

2. Table des besoins en eaux des cultures

Cette table regroupe toutes les données concernant les cultures et les pluies. Sur cette table, nous trouvons également reportées les valeurs de l'ET_o, le rappel de la proportion de surface occupée par le type de culture et l'évolution du K_c en fonction de la date (cf. Fig.2) Nous retrouvons les données pluviométriques, ainsi que l'ET_m. Nous observons les quantités d'eau nécessaire à apporter par irrigation. Ce qui permet d'obtenir le field water supply (FWS) qui correspond à l'écoulement continu pour satisfaire les besoins d'irrigation sur la période de l'intervalle considéré.

3. Table du programme d'irrigation

Cette table rassemble toutes les particularités du sol :

- la réserve utile (TAM ou RU) qui correspond à la quantité théorique maximale d'eau à la disposition de la plante.
- la réserve facilement utilisable (RAM ou RFU), qui correspond à la valeur théorique d'eau qui est facilement disponible dans le sol pour la plante.
- la pluviométrie
- l'ET_c qui correspond à l'évapotranspiration réelle de la plante, qui est calculé par le logiciel. Le rapport ET_c /ET_m permet de déterminer si la plante est en stress hydrique. Quand ce rapport est égal à 100%, la plante est dans les conditions optimales de développement. En revanche plus le stress hydrique augmente plus cette valeur diminue.
- le déficit de la réserve utile d'eau dans le sol (SMD).
- la " yield reduction " qui correspond au pourcentage de diminution du rendement sur toute la durée de la vie de la plante par rapport aux conditions optimales de culture, c'est-à-dire sans stress hydrique. Dans les conditions optimales, la diminution de rendement est égale à 0%. Le logiciel détermine également la baisse de rendement pour chaque étape de croissance de la plante, mais pour voir ces pourcentages, il faut consulter le rapport en cliquant sur "report" et en spécifiant un nom de fichier texte pour sauvegarder le rapport, puis en ouvrant ce fichier texte. Dans cette table, par défaut, le programme affiche seulement les jours où il y a des événements pluvieux, dans le cas où il n'y a pas d'irrigation. Si nous considérons l'irrigation, le logiciel rajoute les jours où il y a apport d'eau par irrigation. Pour afficher tous les jours de la période étudiée, il faut cocher "Daily Soil Moisture Balance" dans la partie haute de la table.

Il est possible d'afficher les résultats précédemment décrits sous forme graphique.

E. Schéma de fonctionnement du logiciel et formules utilisées

Schéma de fonctionnement cf. Fig.3

1. Calcul de l'ET_o

Formule de Penman-Monteith :

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

ET _o	Evapotranspiration de référence (mm/j)
R _n	Rayonnement net à la surface de la culture (MJ/m ² /j)
G	Flux de chaleur échangé avec le sol (MJ/m ² /j)
T	Température journalière à 2m d'alt. (°C)
u ₂	Vitesse du vent à 2m d'alt. (m/s)
e _s	Pression de la vapeur à saturation (kPa)
e _a	Pression réelle de la vapeur (kPa)
e _a -e _s	Déficit de la pression de vapeur à saturation (kPa)
Δ	Pente de la courbe des pressions de vapeur (kPa/°C)
γ	Constante psychrométrique (kPa/°C)

Les coefficients d'Angstrom permettent de calculer R_n.

Pour le calcul des différents paramètres de la formule de Penman-Monteith, se reporter au site Internet de la FAO (<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>) Partie A.

2. Calcul des pluies efficaces

Pour calculer les pluies efficace, CropWat utilise la formule du USDA –SCS:

$$P_{eff} = \frac{P_{tot} \times (125 - 0.2 \times P_{tot})}{125}$$

pour des précipitations inférieures à 250mm.

P_{eff} Précipitation efficace (mm)

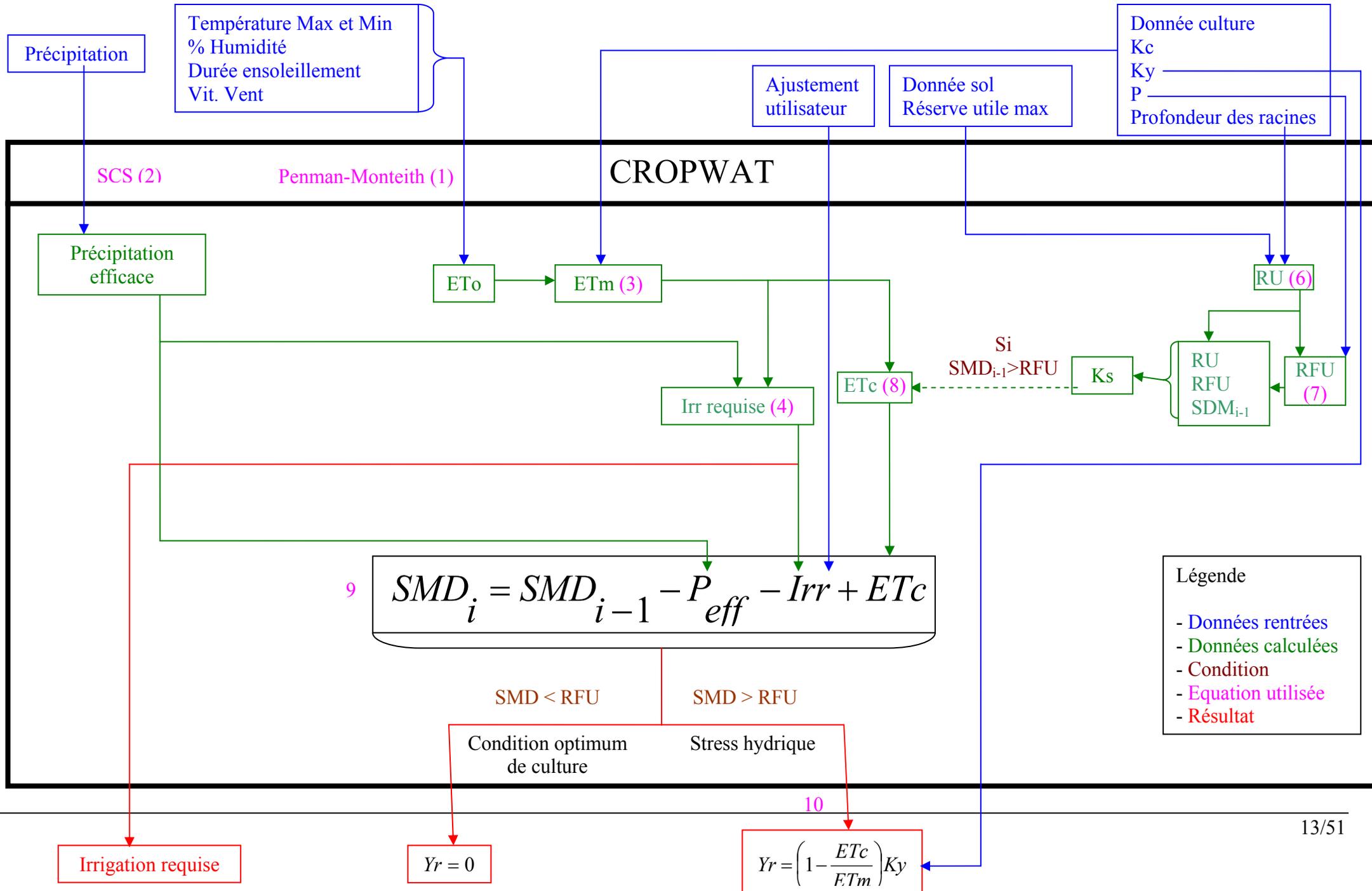
P_{tot} Précipitation totale (mm)

Pour des précipitations supérieures à 250 mm, il utilise la formule

$$P_{eff} = 125 + 0.1P_{tot}$$

Le logiciel possède d'autres méthodes de calcul des précipitations efficaces, mais nous utiliserons surtout celle présentée ci-dessus donc, nous ne présenterons pas les autres.

Figure 3 Schéma de fonctionnement du logiciel



3. Calcul de la crop water requirement (CWR) ou ETm

Pour calculer ces valeurs, le logiciel utilise la formule

$$ETm = ETo \times Kc$$

Kc	Coefficient cultural (sans dimension)
ETm	Evapotranspiration maximale (mm)
ETo	Evapotranspiration potentielle (mm)

4. Calcul de l'irrigation requise

L'irrigation requise correspond à la différence entre l'évapotranspiration réelle et les précipitations efficaces.

$$Irr_{req} = ETm - P_{eff}$$

Irr _{req}	Irrigation requise (mm)
ETm	Evapotranspiration maximale (mm)
P _{eff}	Précipitation efficace (mm)

5. Calcul de l'alimentation en eau du champ (FWS)

$$FWS = 1 \text{hectare} \times Irr_{req} \times (100 \times Irr_{eff}) \text{ en m}^3/\text{per.}/\text{hect (per. = période)}$$

Ensuite, nous ramenons FWS en l/s/ha.

Irr _{req}	Irrigation requise (m)
Irr _{eff}	Efficacité de l'irrigation (%)

6. Calcul de la réserve utile (TAM ou RU)

$$RU = 1000 \times (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \times z$$

RU	Réserve utile (mm)
θ_{FC}	Eau contenue au maximum dans le champ (m^3/m^3)
θ_{WP}	Eau contenue au point de flétrissement (m^3/m^3)
z	Profondeur des racines (m)

Le point de flétrissement étant la teneur en eau du sol au-dessous de laquelle les plantes se flétrissent.

7. Calcul de la réserve facilement utilisable (RAM)

$$RFU = RU \times P$$

RFU	Réserve utile facilement disponible (mm)
RU	Réserve totale disponible (mm)
P	Tarissement admissible

8. Calcul de l'évapotranspiration réelle de la culture ETc

Quand la réserve facilement utilisable est supérieure au déficit (SMD)

$$ETc = ETm$$

Quand le déficit est supérieur à la réserve facilement utilisable

$$ETc = Ks \times ETm = Ks \times Kc \times ETo$$

ETc	Evapotranspiration réelle (mm)
Ks	Coefficient de stress hydrique (sans dimension)
ETm	Evapotranspiration maximale (mm)
Kc	Coefficient cultural
ETo	Evapotranspiration potentielle

Pour déterminer Ks, nous utilisons la formule

$$Ks = \frac{RU - SDM_{i-1}}{RU - RFU}$$

Ks	Coefficient de stress hydrique (sans dimension)
RU	Réserve utile (mm)
SDM _{i-1}	Déficit de la réserve utile à la date i-1 (mm)
RFU	Réserve utile facilement utilisable

9. Calcul du déficit de la réserve utile dans le sol (SMD)

$$SMD_i = SMD_{i-1} - P_{eff} - Irr + ETc$$

SMD _i	Tarissement de la réserve du sol à la date i (mm)
SMD _{i-1}	Tarissement de la réserve du sol à la date i-1 (mm)
ETc	Evapotranspiration de la culture à la date i (mm)
P _{eff}	Précipitation efficace à la date i (mm)
Irr	Irrigation (mm)

Pour notre étude, nous recherchons le rendement des cultures sans irrigation donc nous prendrons le paramètre Irr = 0.

10. Calcul de la diminution de rendement

Pour calculer la diminution de rendement :

$$Yr = \left(1 - \frac{Ya}{Ym}\right) \times 100$$

Yr	Diminution de rendement par rapport au rendement en condition optimale de culture (%)
Ya	Rendement réel (tonne/an)
Ym	Rendement maximal (tonne/an)

$$Yr = \left(1 - \frac{ETc}{ETm}\right) Ky$$

	Diminution de rendement
Yr	
Ky	Coefficient de réponse du rendement (sans dimension)
ETc	Evapotranspiration réelle (mm)
ETm	Evapotranspiration maximale (mm)

Ky dépend de la période considérée. Si nous voulons calculer Yr sur toute la période de vie de la plante, nous prenons le Ky final. ETc et ETm correspondent au total des évapotranspirations réelles et maximales sur la période considéré.

F. Paramètres pouvant être modifiés

Le logiciel CropWat permet de modifier quelques paramètres.

- les pluies efficaces en modifiant l'équation utilisée.
- Les précipitations en modifiant le nombre de jours entre deux événements pluvieux. Ce paramètre est réglé sur 5 jours par défaut.
- La proportion occupée par la culture et la quantité de cultures différentes sur une parcelle.
- Les propriétés du sol.
- Les paramètres d'irrigation (avec ou sans irrigation, irrigation à des dates fixées etc.....).

G. Exemple d'utilisation du logiciel

Pour l'exemple d'utilisation du logiciel se reporter à l'annexe II

II. Application du logiciel CropWat au bassin de la Volta

A. Présentation du Bassin de la Volta

La Volta est un fleuve transfrontalier d'Afrique de l'Ouest dont le bassin versant s'étend sur 400 000km² répartis sur 6 pays (Ghana, Burkina Faso, Togo, Bénin, Mali et Côte-d'Ivoire). Son embouchure est située au Ghana, dans le golfe de Guinée. Ce fleuve est composé de trois affluents majeurs, le Nakambé (ex-Volta blanche), le Mouhoun (ex-Volta Noire) et l'Oti. Le Nazinon (ex-Volta Rouge) est un affluent du Nakambé. La Volta est localisée entre 5° et 15° de latitude nord. Le fleuve a des climats différents le long de son lit. Au nord, nous avons une zone sahélienne (nord du Burkina Faso) qui est un climat tropical sec à saison sèche longue et où les pluies sont comprises entre 250 et 500mm par an. Plus au sud, dans la partie centrale du Burkina Faso, au Mali, et le nord du Bénin nous avons une zone climatique Sahélo-Soudanienne qui correspond à un climat de transition entre le climat sahélien et le climat soudanien. On y trouve des précipitations entre 500 et 900 mm par an. Plus au sud, dans la partie centrale du bassin versant, nous avons un climat de type soudanien, climat tropical humide avec une saison des pluies qui est plus ou moins longue. Les précipitations se situent entre 900 et 1100 mm par an. Enfin, tout au sud au bord du golfe de Guinée, nous trouvons une zone guinéenne qui est un climat équatorial, toujours humide et où les précipitations sont supérieures à 1100 mm par an. La carte en Annexe III représente le bassin de la Volta.

B. Effet d'un stress hydrique sur le rendement d'une culture de maïs

Avant de parler de l'utilisation du logiciel dans la détermination du rendement pour une culture de maïs, il est important de noter l'effet du stress hydrique sur la culture du maïs.

Après le semis des graines de maïs, la plante commence à se développer même si elle est en stress hydrique. Toutefois, il faut quand même qu'il y ait de l'eau dans le sol. Un stress hydrique pendant la phase de croissance a pour effet de limiter le développement de la plante. L'expansion des tiges et des feuilles sera réduite. Mais cela n'a pas d'effet direct sur le rendement. En revanche, un stress hydrique pendant la phase de pollinisation et de formation des grains peut entraîner une baisse de rendement, de par la difficulté des plantes à développer les soies (récupération du pollen) pendant la phase de pollinisation et par la diminution du temps de remplissage des grains, pendant leur phase de développement. La phase de développement des soies est la phase la plus sensible à un manque d'eau. Un stress hydrique quand les grains sont formés, n'entraînera plus de baisse rendement directement. Toutefois, cela peut entraîner une baisse de rendement par la verse des pieds de maïs.

C. Rassemblement des données climatiques du Ghana et du Burkina Faso

Comme nous l'avons vu précédemment, pour fonctionner, le logiciel CropWat a besoin de nombreuses données climatiques. Nous avons donc cherché des données sur la zone d'étude. Nous nous sommes principalement intéressés au Ghana et au Burkina Faso qui occupent la plus grande surface du bassin versant de la Volta.

Les données que nous avons entrées dans le logiciel ont des sources différentes. Les données de Kete-Krachi et Tamale (Ghana) nous ont été transmises par Winston ANDAH (investigateur principal du projet au Ghana) et elles sont issues de mesures. Pour les données de Ouagadougou, nous les avons trouvées sur le site Internet <http://www.tutiempo.net/en/>.

Ces séries de données ont ensuite été traitées pour obtenir des valeurs mensuelles pour chaque paramètre climatique. (Voir en annexe IV, V et VI)

Dans les séries de données précédemment citées, certains types de données étaient absents, comme les durées d'ensoleillement ou la vitesse du vent. Sachant qu'avoir la totalité des données entraîne une meilleure précision du calcul de l'ET_o, nous avons décidé de remplacer les données manquantes, qui ont la valeur 0 dans le logiciel par défaut, par les valeurs correspondantes que nous avons obtenues dans la base de donnée Climwat de la FAO. Ces valeurs correspondent à la moyenne interannuelle des données climatiques, mais les années utilisées ne sont pas précisées. Ainsi, nous avons effectué les modifications suivantes:

- Pour les fichiers de Ouagadougou trouvés sur [tutiempo.net](http://www.tutiempo.net), nous rentrons les données de durée d'ensoleillement.

- Pour les données de Kete-Krachi, nous rajoutons les valeurs du vent et de l'humidité de l'air pour les années 1991 à 1995 et les données de vent pour les années 1999 et 2000

- Toujours pour les données de Kete-Krachi, pour l'année 1999 nous rajoutons également les durées d'ensoleillement de tous les mois de l'année sauf janvier, novembre et décembre.

- Pour Tamale, nous remplaçons toutes les valeurs de vent par les valeurs de climwat.

D. Paramètre important dans l'utilisation du logiciel

Après l'étude de l'exemple d'utilisation (Annexe II), nous avons remarqué que certains paramètres du logiciel sont importants.

Pour calculer le CWR, deux paramètres sont essentiels, l'ET_o et le schéma de planification des cultures. L'ET_o peut être déterminée grâce aux données climatiques. Si nous connaissons déjà les valeurs de l'ET_o, les données climatiques ne sont plus qu'optionnelles.

Pour le calcul du plan d'irrigation, il faut rajouter aux données précédentes les propriétés du sol et le programme d'irrigation.

E. Paramètres ne pouvant pas être modifiés et incohérence du logiciel

Dans l'utilisation du logiciel, tous les paramètres sont modifiables en début d'étude. Toutefois, certains paramètres sont fixés en début et ne peuvent être modifiés au cours de l'année CropWat (correspond aux 12 mois qui sont affichés dans le logiciel). Nous ne pouvons pas redéfinir le stock d'eau initial qui avait été défini, pour la première culture toutefois, nous pouvons faire un ajustement manuel de cette dernière, mais cela ne prend pas en compte les précipitations et l'évapotranspiration.

Le logiciel ne tient pas compte du stock d'eau en fin de la culture. En effet, dans le cas de deux cultures, A et B, qui se suivent sur la même parcelle et occupant le même rapport de surface, même si à la fin de la culture "A" le stock d'eau n'est pas vide, la culture "B" commencera son développement sur une parcelle avec un déficit de 100%. Alors qu'a priori une partie du stock devrait être disponible pour la culture suivante.

De plus, le logiciel ne prend pas en compte les variations du stock initial dus aux précipitations. En effet une culture qui sera semée après la "saison des pluies", devrait ne pas avoir un stock nul à la date de semis, car les précipitations se sont infiltrées et ont réalimenté la réserve en eau.

Enfin, il est dommage que le logiciel ne permette pas de faire plusieurs calculs en même temps, à des stations ou dates différentes.

Le logiciel a également quelques incohérences. Si nous semons le jour où il interpole les précipitations, nous arrivons dans un cas où le stock initial est non nul, mais en revanche, si nous semons le lendemain, nous revenons dans le cas où la réserve est nulle. Pour des vitesses de vent faibles, de petites variations de l'humidité entraînent des variations anormales de l'ET_o. En effet, pour une vitesse de vent inférieure à 50km/j en moyenne et en faisant augmenter l'humidité de 10 points, nous provoquons une augmentation de l'ET_o, alors qu'une augmentation de l'humidité devrait entraîner une diminution de l'ET_o.

F. Facteurs les plus sensibles

Pour les différents calculs du logiciel, certains paramètres sont plus sensibles que d'autres.

Une variation de 1 mm de pluie pour un mois pendant la culture peut entraîner une variation de 0,1 % du rendement, et cela quelle que soit la station étudiée. La pluie est donc un paramètre très sensible pour le calcul du rendement, et il faut donc que les mesures effectuées soient très précises. Une variation des données climatiques n'entraîne pas directement une modification du rendement. En revanche, une variation même de 0,1 mm de l'ET_o entraîne comme pour la pluie une variation du rendement. Sachant que l'ET_o est calculée à partir des températures max, min, de l'humidité de l'air, de la vitesse du vent et de la durée d'ensoleillement, de petites variations de ces paramètres peuvent entraîner des modifications de l'ET_o. Ainsi, tous les paramètres climatiques ont une sensibilité plus ou moins élevée, et il serait bon de collecter les données avec beaucoup de précision. De plus pour obtenir une meilleure précision pour le calcul de l'ET_o, il est préférable d'avoir toutes les données.

Notons également que la sensibilité est liée au climat. A Ouagadougou, qui est sous un climat plutôt sec, une petite variation de l'ET_o provoque une modification rapide de la

diminution de rendement. Une variation de l'ETo de 0,1 mm entraîne une évolution de rendement de 0,1 point. Alors qu'à Kete-Krachi, une grande modification de l'ETo ne modifie pas le rendement. Il faut une modification de 1mm de l'ETo, pour entraîner une variation de 0,1 point pour le rendement. Nous pouvons donc conclure que les paramètres pour Ouagadougou ont une plus grande sensibilité que ceux de Kete-Krachi. Ceci est dû au stress que subit la plante. En effet à Ouagadougou, la plante est en stress hydrique donc une petite variation de ses conditions de vie va entraîner une réponse rapide. Ce qui est le contraire des plantes de Kete-Krachi qui sont dans les conditions optimales de culture donc, de petites variations de leur environnement n'entraîneront que de faibles conséquences.

Pour notre étude, nous cherchons à calculer l'ordre de grandeur des rendements, donc nous pouvons en conclure que pour notre étude la précision de ces paramètres n'influencera pas les résultats.

III. Calcul des rendements

A. Comparaison des pertes de rendements

1. Mode de détermination de la date de plantation

La date de plantation est déterminée par les agriculteurs de la Volta comme étant le premier jour de l'année où le cumul des précipitations a dépassé 100mm. Dans la suite de l'exposé, nous appellerons cette méthode "la méthode des 100mm". Si le jour qui est déterminé par cette méthode est le même jour que le jour où le logiciel interpole les pluies, nous prendrons le jour suivant, ceci sera indiqué dans les tableaux par une petite "*". Pour les fichiers de la FAO, nous prendrons comme date de début de culture, le premier jour du mois dont le cumul des précipitations est supérieur à 100 mm car nous n'avons que des données mensuelles.

2. Comparaison par année

Pour faire la comparaison des pertes de rendement interannuelles, nous allons tout d'abord utiliser la station de Kete-Krachi pour différentes années, et pour le fichier fourni par la FAO. Nous prendrons un sol medium avec une réserve utile initiale nulle. Les données utilisées sont reportées en annexe IV

La table regroupant toutes les données climatiques se trouve en Annexe VII

Année	1991	1992	2000	FAO
Précipitation (mm)	2431.5	970.7	1375.6	1406
Yr (%)	0.5	1.4	1.9	1.4
Date de plantation	31 mars	16 mai *	26 mars	15 mars

Figure 4 Comparaison annuelle des diminutions de rendement par année à Kete-Krachi (Ghana)

Au cours de ces différentes années, les paramètres climatiques restent toujours environ constants. Le seul facteur qui varie est les précipitations. Ainsi, nous trouvons des valeurs de diminution de rendement faible. Donc, nous pouvons en conclure que des variations de pluviométrie dans la région de Kete-Krachi n'influencent pas le rendement.

Nous allons appliquer la même méthode à Tamale dont les données sont reportées en Annexe V. La table regroupant les données climatiques et les diminutions de rendement en Annexe VIII.

Année	1992	1993	1999	FAO
Précipitation (mm)	695.3	1000.4	1382.3	1074
Yr (%)	1.9	2.6	2.2	1.7
Date de plantation	5 mai *	30 avril	20 avril	1 avril

Figure 5 Comparaison annuelle des diminutions de rendement par année à Tamale (Ghana)

Comme pour Kete-Krachi, nous trouvons des valeurs de diminution de rendement faible. Ainsi, nous pouvons en conclure que des variations de pluviométrie dans la région de Tamale, n'influencent pas le rendement.

Enfin, nous allons utiliser les données de Ouagadougou qui sont reportées en Annexe VI, et dont la synthèse des données climatiques se trouve en Annexe IX.

Année	2002	2003	2005	FAO
Précipitation (mm)	614.2	1241	857.72	862
Yr (%)	32.3	0.5	7.1	1.4
Date de plantation	2 juillet	9 mai	12 juin	1 juin

Figure 6 Comparaison annuelle des diminutions de rendement par année à Ouagadougou (Burkina Faso)

Pour cette station, nous observons que les années humides et moyennes ont des diminutions de rendement faible alors que l'année sèche a une diminution de 32,3%. Ainsi, nous pouvons conclure que dans la région de Ouagadougou, les précipitations, donc l'apport en eau est le facteur principal influent sur le rendement.

En conclusion, nous pouvons dire que dans des régions à climat Guinéen ou Soudanien (Kete-Krachi et Tamale), de grandes variations de pluviométrie entre année sèche et humide n'entraîneront pas de diminution de rendement importante. En revanche, dans une région comme Ouagadougou, où le climat est plus sec, une variation de pluviométrie entre 2 années peut entraîner de grosses différences de rendement.

3. Comparaison géographique nord/sud

Pour faire cette comparaison, nous allons utiliser les données de la base de données ClimWat (FAO) de quatre stations, les trois précédentes plus la station de Ouahigouya au nord du Burkina Faso.

Pour chaque station, nous allons procéder comme précédemment. Pour déterminer le jour de plantation, nous utilisons la méthode des 100mm. En utilisant cette méthode, nous obtenons des résultats peu logiques. En effet, nous n'observons aucune variation de rendement nord sud, résultat que nous nous attendions à trouver.

Nous avons ensuite testé l'influence des dates de semis, en utilisant les dates fournies sur le site de la FAO pour déterminer le premier jour de culture. En utilisant cette méthode, nous obtenons globalement du nord au sud une réduction de la diminution de rendement. Ainsi, nous obtenons une grande variabilité de rendement entre le nord du bassin versant de la Volta (sec) et le sud (humide).

Stations (N→S)	Ouahigouya	Ouagadougou	Tamale	Kete-Krachi
Date de semis (méthode des 100 mm)	1 juin	1 juin	1 avril	15 mars
Yr (%)	1,8	1,4	1,7	1,4

Date de semis du calendrier FAO	1 avril	1 avril	1 juin	1 mars
Yr (%)	42,6	32,6	0,9	1,2

Figure 7 Comparaison des diminutions de rendements entre le nord et le sud du bassin de la Volta

4. Variation de la diminution de rendement dû à l'intervalle de temps entre deux événements pluvieux.

Utilisation des données de ClimWat et des dates de plantation de la FAO
Les résultats sont reportés en annexe X.

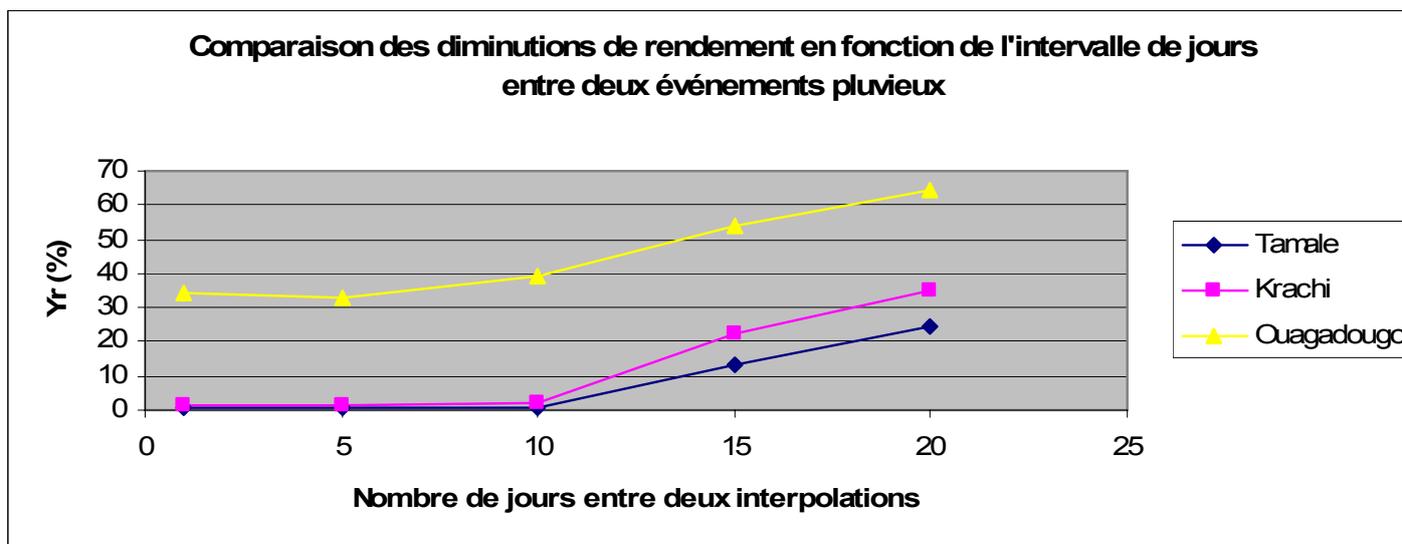


Figure 8 Comparaison des diminutions de rendements en fonction de l'intervalle de jours entre deux événements pluvieux

De façon générale, pour un espacement des épisodes pluvieux inférieur à 10 jours, nous ne trouvons pas de grande différence de rendement. En revanche, entre 10 et 15 jours, il y a une forte augmentation de la diminution de rendement.

Ainsi, nous pouvons conclure qu'avec une interpolation à pas de temps faible même si il y a une erreur de jour entre l'événement réel et celui interpolé, il n'y aura pas de grande variation du rendement. En revanche, un espacement supérieur à 10 jours, ce qui paraît peu probable sur une année, montre qu'une faible erreur dans le jour d'interpolation peut changer considérablement la diminution de rendement. Ainsi, il est préférable de prendre un temps d'interpolation faible, pour le climat que nous avons dans notre zone d'étude. Ainsi, pour notre étude nous utiliserons toujours une interpolation tous les cinq jours, qui paraît compatible avec les distributions observées sur le terrain.

5. Comparaison des rendements en fonction du type de sol.

Pour cela, nous allons utiliser les 3 fichiers "Soil" qui sont fournis avec le logiciel, marqué "*" dans les tableaux, ainsi que 3 fichiers sol que nous avons créés. Le tableau (annexe XI), représente les caractéristiques de ces 6 fichiers.

L'observation de cette table montre que le seul paramètre variant entre les 6 sols est la réserve utile maximale.

Pour comparer l'influence de ces sols sur la diminution de rendement, nous allons prendre, pour commencer, la station de Tamale en utilisant les mêmes années que celles utilisées précédemment. La culture est semée à la date fixée par le calendrier de la FAO (1^{er} juin). Le sol a un stock initial nul.

Nous obtenons les résultats qui sont reportés dans le tableau en Annexe XII, et sous forme de graphique représentant la baisse de rendement en fonction de la réserve utile maximale, ci-dessous.

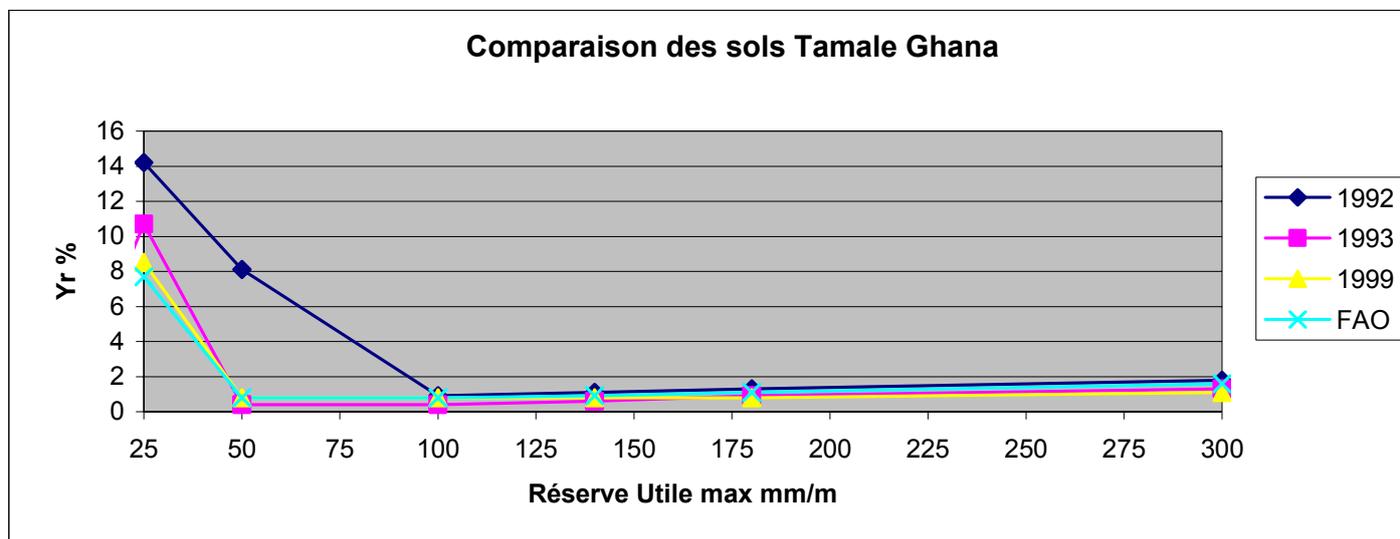


Figure 9 Comparaison des diminutions de rendement en fonction de la Réserve Utile Maximale à Tamale (Ghana)

Pour des valeurs de la réserve utile maximale inférieures à 100mm/m, nous avons de fortes augmentations de la diminution de rendement. Des valeurs supérieures à 100mm/m n'entraînent pas de variation de rendement. Ainsi, nous pouvons dire que pour des sols qui ont une réserve utile faible, il est important que ces valeurs soient très précises. En revanche, pour des réserves utiles élevées, une grosse erreur, aura peu d'influence sur le rendement.

Pour confirmer nos résultats, nous procédons de même sur la station de Ouagadougou et nous obtenons le graphique suivant, la table correspondante est reportée en Annexe XIII

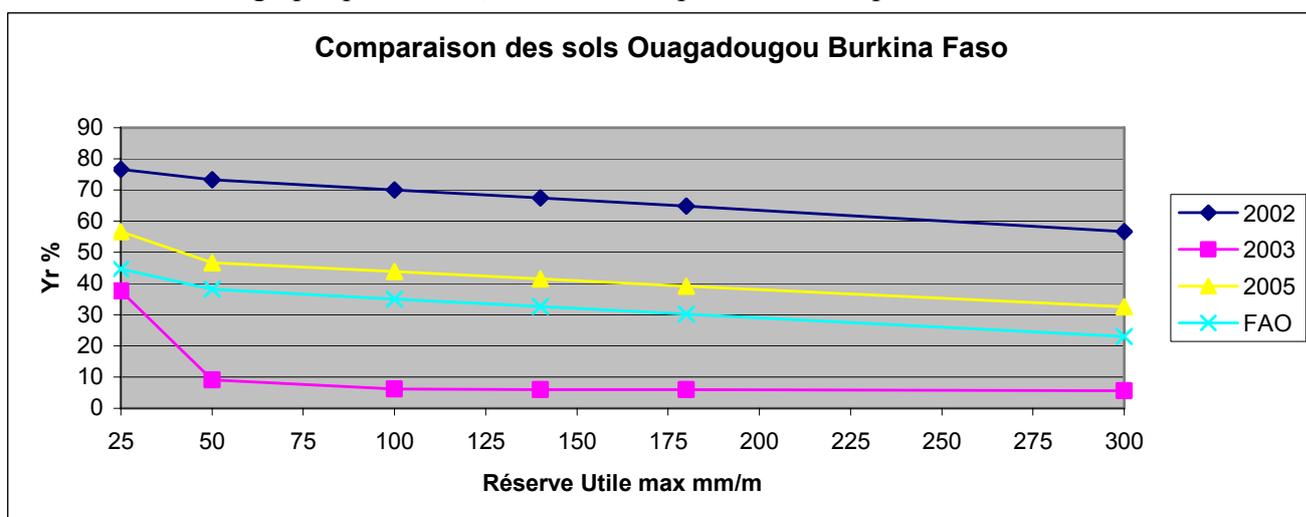


Figure 10 Comparaison des diminutions de rendement en fonction de la Réserve Utile Maximale à Ouagadougou (Burkina Faso)

Nous remarquons que nous obtenons les mêmes résultats que ceux de Tamale, avec une augmentation de rendement avec une augmentation de la réserve utile. Toutefois, il semblerait que pour la région de Ouagadougou, une erreur sur la réserve utile, n'entraînerait pas de grosse erreur sur le rendement sauf pour les années humides où pour une réserve utile inférieure à 50mm/m, la diminution de rendement est importante. Nous pouvons remarquer que sur ce graphique, les courbes se répartissent, suivant le caractère pluvieux de l'année.

B. Calcul de rendement

Pour calculer le rendement du maïs en t/ha, nous supposons que la quantité maximale produite par hectare est de 9 tonnes, qui est la valeur produite dans les conditions optimales de culture. (<http://www.fao.org/ag/AGL/AGLW/cropwater/maize.stm#yield>)

Ainsi, en utilisant la formule de calcul du rendement qui lie le pourcentage de diminution de rendement aux rendements actuel et maximal,

$$Yr = \left(\frac{Ym - Ya}{Ym} \right) \times 100 \text{ nous trouvons que le rendement réel } Ya = Ym \left(1 - \frac{Yr}{100} \right)$$

Ainsi, en utilisant les diminutions de rendement déterminées précédemment, nous allons pouvoir calculer les rendements théoriques qu'il devrait y avoir autour de ces stations. Les résultats des calculs de rendement pour chaque station sont reportés en annexe XIV.

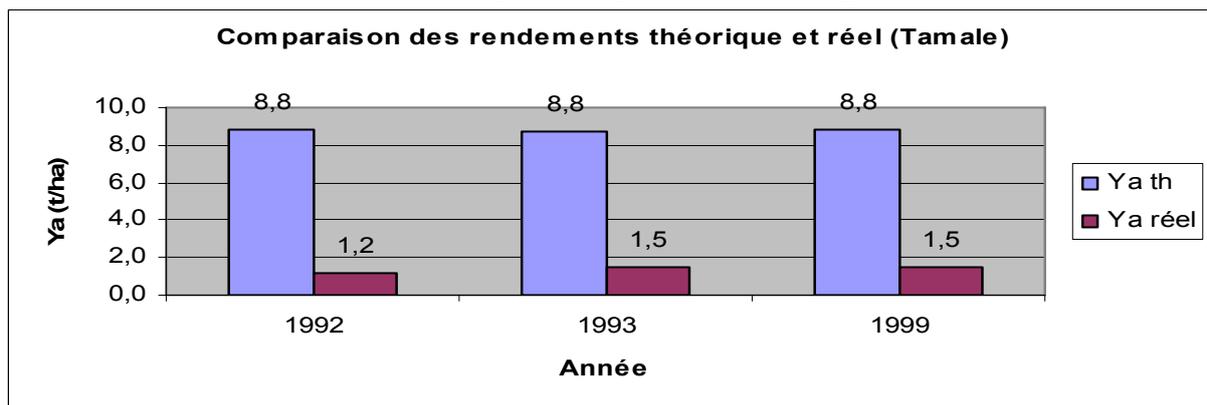


Figure 11 Comparaison des rendements théoriques et réels à Tamale (Ghana)

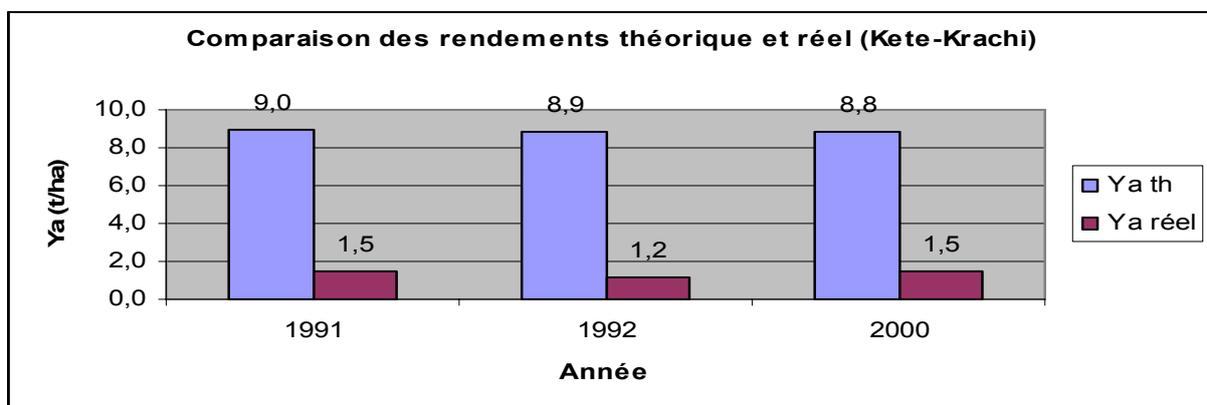


Figure 12 Comparaison des rendements théoriques et réels à Kete-Krachi (Ghana)

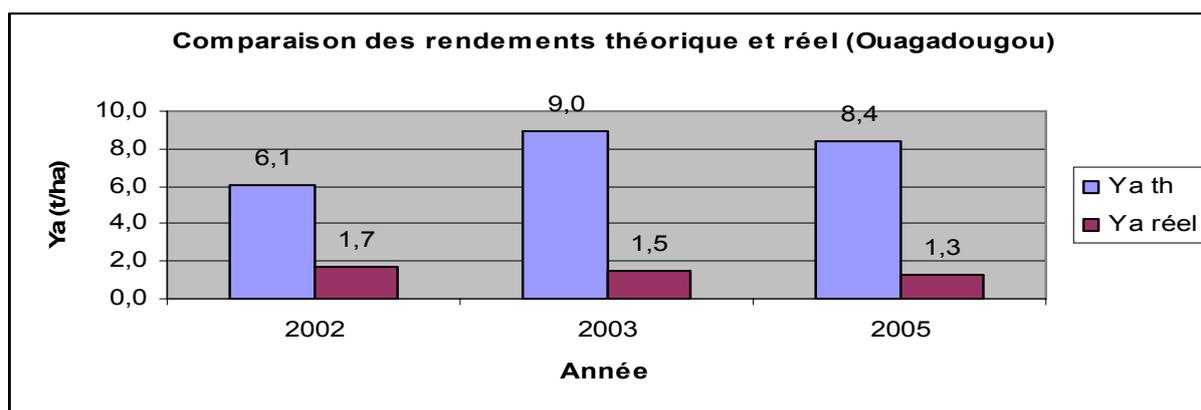


Figure 13 Comparaison des rendements théoriques et réels à Ouagadougou (Burkina Faso)

Après observation des valeurs de rendement calculées, nous voyons une grande différence entre les rendements théoriques définis par l'intermédiaire du logiciel CropWat et les valeurs réelles que nous avons trouvées sur le site de la FAO. Nous pouvons faire plusieurs hypothèses pour expliquer ces variations.

- Tout d'abord, pour calculer les rendements théoriques, nous avons pris un rendement maximal de 9t/ha, or, il est probable que cette valeur ne correspond pas à la valeur maximale des régions étudiées.

- La valeur de rendement réel correspond au rendement de maïs par pays et non pour la région où se trouve la station.

- le logiciel CropWat ne prend en compte que les besoins en eau de la plante. Ainsi, les besoins en nutriments, et autres éléments nécessaires à la croissance de la plante ne sont pas utilisés dans le calcul du rendement.

- il est très probable que les cultures de maïs dans le bassin de la Volta, ne soient pas plantées de façon intensive, faute d'intrants suffisants.

- les cultures étant vivrières, et les rendements peu élevés, les agriculteurs ne peuvent pas se permettre de laisser leur champ en jachère, trop longtemps. Ainsi, il y a un appauvrissement des sols, paramètre qui n'est pas pris en compte par le logiciel. De plus, étant une agriculture vivrière, elle rapporte peu de revenu aux agriculteurs qui ne peuvent pas investir dans des produits phytosanitaires, et ainsi combler le déficit du sol.

- Finalement, dans ce calcul de rendement, ne sont pas pris en compte les paramètres comme les maladies, le fait que les plants de maïs peuvent être mangés par des animaux, ou tous autres paramètres naturels.

Ainsi, nous nous apercevons que le logiciel ne nous permet pas de calculer des rendements théoriques fiables. Mais qu'il nous donne seulement une approximation de ce que serait le rendement si le facteur limitant la croissance de la plante est l'eau.

Conclusion

Le logiciel CropWat, développé par la FAO, a été créé dans le but de dimensionner et mettre en place des systèmes d'irrigation, mais également pour déterminer les rendements agricoles, en fonction de différents paramètres. D'après l'étude qui vient d'être réalisée, il s'avère que le logiciel CropWat est adapté au calcul de rendement agricole dans des conditions bien définies. En particulier, il s'applique mieux aux calculs d'irrigation (pour lesquels il a été initialement réalisé) qu'au rendement en conditions de cultures pluviales

-Toutefois, après avoir utilisé ce logiciel, il nous semble important de donner quelques points qui permettraient d'améliorer le logiciel.

-demander au logiciel de calculer l'ETo en ne prenant pas en compte une valeur de 0 pour une donnée manquante.

-permettre à l'utilisateur de choisir le mode de saisie des données pluviométriques (mensuel ou journalier) puis d'interpoler. En effet, il nous paraît inutile de calculer des données mensuelles de précipitations qui seront rentrées dans le logiciel et interpolées en valeurs journalières.

-permettre au logiciel de pouvoir reconnaître différents types de fichiers et lui permettre de les ouvrir sans avoir à rentrer toutes les données dans le logiciel.

-finalement il serait bon d'accompagner le logiciel d'un document expliquant toutes les formules qu'il utilise.

L'étude de ce logiciel, nous a montré ses limites et les améliorations qu'il serait bon de lui apporter, toutefois, nous savons qu'il existe d'autres logiciels tel SARRA (système d'analyse régionale des risques agroclimatiques), ou DSSAT. Il serait bon de faire l'étude de ces logiciels, de voir les paramètres qui sont pris en compte par ces logiciels, et enfin de voir si il peuvent être utilisé pour le calcul de rendement dans le BFP Volta.

Bibliographie

Livre

CropWat for Windows: Users Guide version 4.2.0013 Octobre 1998
Mémoire de fin d'étude ; Sophie Lardilleux Juin 2000

Site Internet

<http://www.fao.org>

<http://www.fao.org/ag/agl/aglw/cropwat.stm> (logiciel CropWat)

<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>

<http://www.fao.org/ag/AGL/aglw/climwat.stm> (Climwat)

<http://www.fao.org/giews/workstation/page.jspx> (calendrier FAO)

<http://www.granddictionnaire.com>

<http://www.taleo.com>

<http://www.agriculture.gov.bf>

<http://www.tutiempo.net/en/>

<http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub811/3othpro.htm#secheresse>

<http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/field/news/croppest/2005/11cpo05a4.htm>

Résumé

Le Basin Focal Project Volta vise à fournir une analyse de la pauvreté sur le bassin versant de la Volta, en s'appuyant sur l'étude de la productivité agricole et des relations eau-pauvreté.

Le travail effectué dans le cadre de ce projet est de comprendre si le logiciel CropWat est bien adapté pour évaluer l'impact du stress hydrique sur les rendements agricoles de maïs. Ceci passe par la compréhension du logiciel, des paramètres et des formules utilisées, le test de la sensibilité des paramètres dans les plages de valeurs considérées lors de l'application au bassin de la Volta. Enfin, cela nous permet de calculer des diminutions de rendement sur certaines stations du bassin versant dans des conditions climatiques réelles. Les valeurs obtenues, nous permettent de comparer les rendements théoriques aux rendements réels de chaque pays et d'expliquer les différences observées.

Les conclusions nous conduisent, en connaissant mieux CropWat, à définir si son utilisation est intéressante dans le cadre du Basin Focal Project Volta.

Annexe I

Contenu des fichiers de sauvegarde

Les termes en bleu correspondent aux commentaires rajoutés

.PEM (données climatiques)

CropWat 4 Windows						
	3	0				
Burkina Faso (Pays)						
Ouagadougou (Station)						
316	(Altitude)					
12.35	-1.51	(latitude et longitude)				
				Durée		
Tmax	Tmin	Humidité	Vitesse vent	Ensoleillement	Radiation solaire	ETo
°C	°C	%	km/j	h	MJ/m ² /j	mm/j
34.5	20.8	25.3	237.6	9.2	7.69975	6.08
33.1	18.4	15.8	345.6	9.1	8.390818	8.09
37.9	22.7	12.4	276.0	8.8	9.106636	8.17
40.5	28.9	35.7	278.4	7.9	9.506409	7.28
37.5	27.1	53.9	314.4	8.7	9.508022	6.04
34.5	24.0	65.3	309.6	8.4	9.408638	4.83
31.7	22.6	76.7	280.8	7.6	9.416816	3.62
31.7	22.4	79.6	232.8	6.8	9.446222	3.27
34.2	23.3	69.6	256.8	7.2	9.207531	4.16
35.9	23.7	58.8	211.2	9.0	8.591134	4.42
37.1	21.0	30.4	199.2	9.5	7.832192	5.56
33.5	17.5	24.7	10.7	9.1	7.440371	1.75

.CRM (Données pluviométriques)

CropWat 4 Windows							
Ouagadougou (Station)							
4	3						
80	50	0.5	-5	0.7	-15		
						Pluie totale	Pluie efficace
						mm	mm
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	0.0	0.0
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	0.0	0.0
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	0.0	0.0
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	16.5	16.1
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	43.2	40.2
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	213.9	140.7
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	153.7	115.9
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	122.7	98.6
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	64.0	57.4
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	56.4	51.3
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	0.0	0.0
-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	-99.9	0.0	0.0

.CRO (Données sur la culture)

CROPWAT 7.0	Crop				
data					
MAIZE	(Grain)	Type de culture			
25 40 40 30		Durée de chaque phase de croissance			
Kc	0.30	1.20	0.50		
Profondeur des racines	0.30	1.00			
Tarissement admissible	0.50	0.50	0.80		
Ky	0.40	0.40	1.30	0.50	1.25

.SOI (Propriété du sol)

CROPWAT 7.0	Soil Data
Medium	Type de sol
1.4E+02	Réserve utile max (mm)
40	Vitesse maximale d'infiltration (mm/j)
900	Profondeur max des racines (mm)
0	Réserve utile initial (mm)

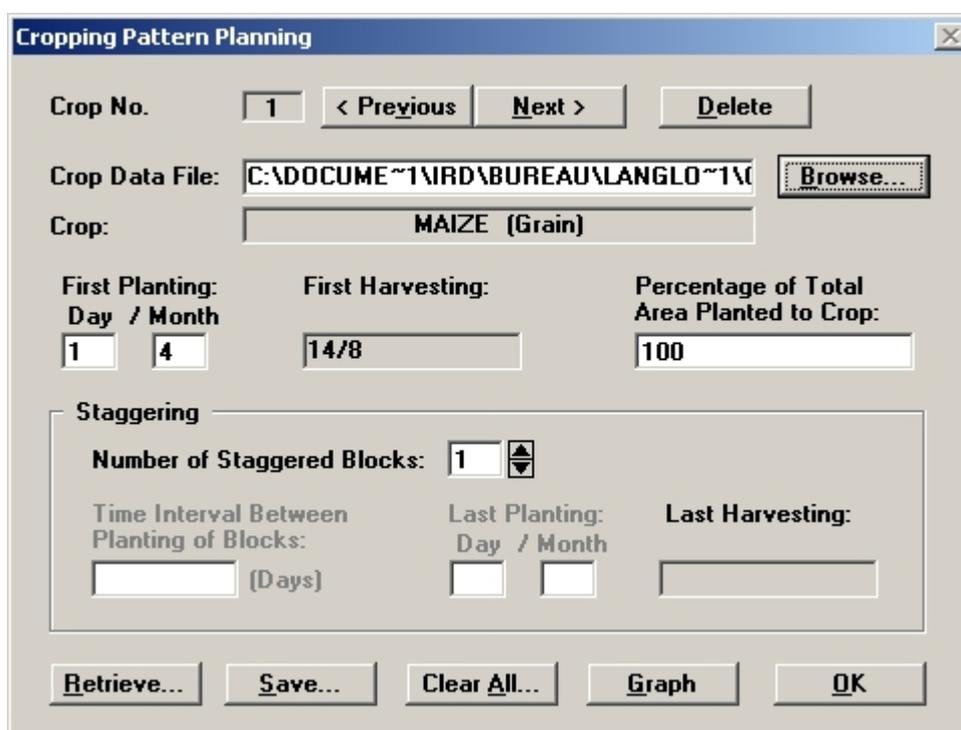
Annexe II

Exemple d'utilisation du logiciel

Pour cet exemple d'utilisation du logiciel, nous allons utiliser les données de Ouagadougou (Burkina Faso) de l'année 2000 que nous avons rentré dans le logiciel. Nous chargeons les données de climat, de précipitation et de sol (medium) dans le logiciel, pour cette station. Nous allons faire un schéma de planification avec seulement un type de culture, du maïs, qui occupera 100% de la parcelle et sera planté le 1 avril et enfin, il n'y aura pas d'irrigation.

Pour charger les données dans le logiciel, cliquer sur "Retrieve", et chercher le fichier à charger sur le disque dur.

Une fois ces données charger, cliquer sur l'icône . Dans la fenêtre qui s'ouvre la remplir comme ci-dessous



Cropping Pattern Planning

Crop No. < Previous Next > Delete

Crop Data File: Browse...

Crop:

First Planting: Day / Month First Harvesting: Percentage of Total Area Planted to Crop:

Staggering

Number of Staggered Blocks: ▲ ▼

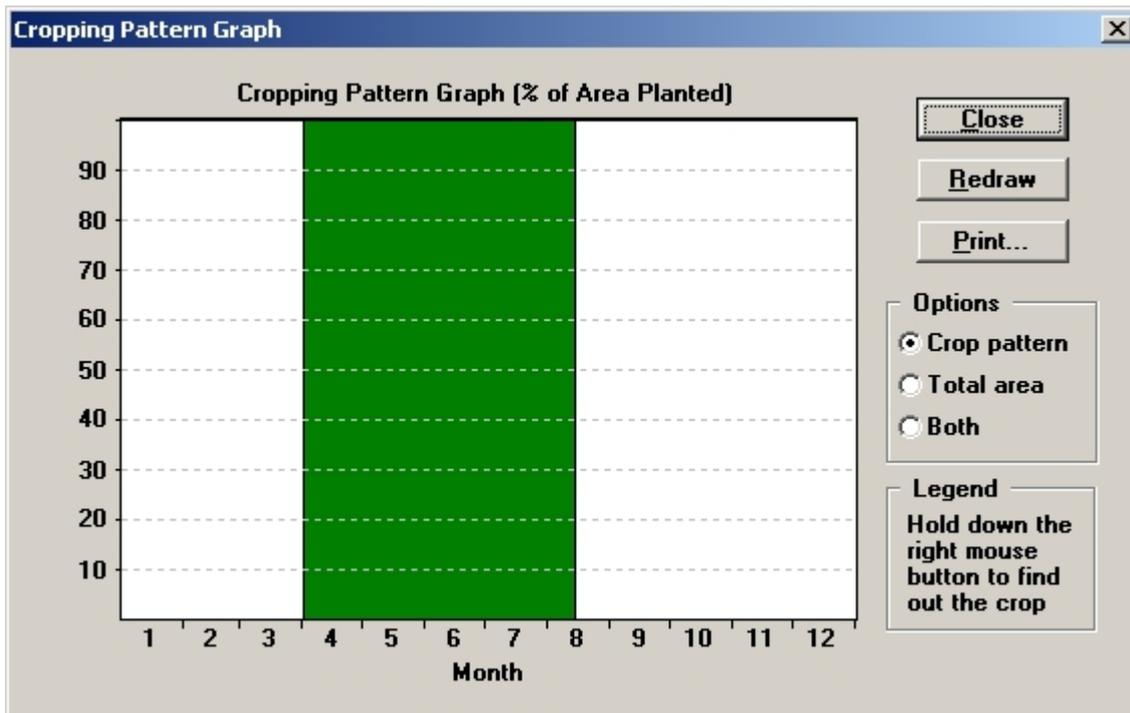
Time Interval Between Planting of Blocks: (Days) Last Planting: Day / Month Last Harvesting:

Retrieve... Save... Clear All... Graph OK

Pour charger le fichier "MAIZE.CRO" cliquer sur **Browse...** et choisir le fichier.

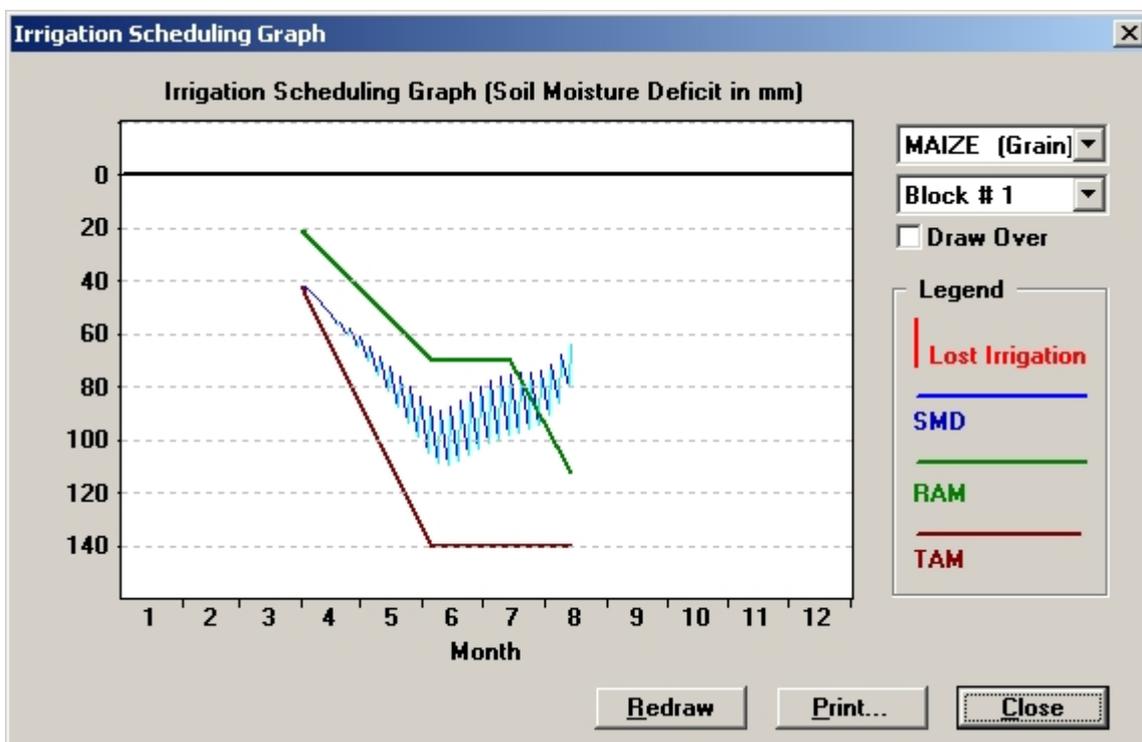
Quand cette fenêtre est remplie, cliquer sur **OK**.

Ainsi, en regardant les résultats sous forme de graphique, nous obtenons le graphique de planification ci-dessous



Sur ce graphique, nous observons bien que la culture de maïs (en vert) occupe 100% de la parcelle et qu'elle a été plantée début avril. De plus, ce graphique montre la surface qu'occupe ce type de culture et la durée de cette occupation (ici 100% de la surface pendant environ 5 mois).

Maintenant, si nous voulons voir le bilan en eau. Nous utilisons ce graphique



Ce graphique correspond à l'évolution de la réserve utile (TAM), de la réserve facilement utilisable (RAM) et du déficit de la réserve utile dans le sol (SMD), en fonction du temps.

Quand le déficit de la réserve du sol est supérieur à la réserve facilement utilisable (SMD>RAM), la plante est en stress hydrique. Ainsi, ce graph. montre que la plante est en stress hydrique depuis la date de semis jusqu'à la fin juillet, quasiment pendant toute sa période de vie. Ceci va peu se répercuter sur le rendement comme le montre la table ci-dessous.

Irrigation Scheduling Table													
MAIZE (Grain) Block # 1		Options <input checked="" type="radio"/> Irrigation Schedule <input type="radio"/> Daily Soil Moisture Balance		Yield Reduction: 36.3%		Close Report...							
Date	Day No.	TAM (mm)	RAM (mm)	Rainfall (mm)	Efct. Rain (mm)	ETc (mm)	ETc/ETm [%]	SMD (mm)	Irr. Interval (Days)	Net Irr. (mm)	Lost Irr. (mm)	User Adjust. (mm)	
15/4	15	63.1	31.6	0.4	0.4	1.0	25.3%	51.8					
20/4	20	70.6	35.3	1.8	1.8	1.2	41.5%	55.5					
25/4	25	78.2	39.1	3.6	3.6	1.4	47.7%	58.1					
30/4	30	85.7	42.9	5.8	5.8	2.2	54.8%	60.9					
5/5	35	93.3	46.6	8.3	8.3	3.0	58.9%	64.5					
10/5	40	100.8	50.4	11.0	11.0	3.7	61.1%	68.3					
15/5	45	108.3	54.2	13.8	13.8	4.5	62.7%	72.2					
20/5	50	115.9	57.9	16.7	16.7	5.2	64.0%	76.0					
25/5	55	123.4	61.7	19.5	19.5	5.9	65.4%	79.7					
30/5	60	131.0	65.5	22.1	22.1	6.6	66.7%	83.4					
4/6	65	138.5	69.2	24.6	24.6	7.3	67.9%	87.2					
9/6	70	140.0	70.0	26.7	26.7	6.9	66.8%	88.8					
14/6	75	140.0	70.0	28.4	28.4	6.9	65.9%	87.4					

Double Click Any Cell in the 'User Adjust.' Column to Adjust the Soil Moisture Balance

Où nous observons la « yield reduction » qui correspond à la diminution de rendement. Ici elle est de 36.3%. Cela veut dire que par rapport aux conditions optimales de cultures, nous aurons un rendement de 63.7%.

Annexe III

Carte du bassin versant de la Volta



Annexe IV

Données climatiques de la région de Kete-Krachi (Ghana)

Année 91					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	7,4	34,1	21,3	
2	65,7	8,0	35,4	24,5	
3	61,3	7,5	34,7	25,3	
4	245,6	8,1	32,4	24,4	
5	398,6	7,0	31,3	24,2	
6	113,6	7,6	31,1	24,1	
7	498,1	4,9	29,4	22,9	
8	319,6	7,0	29,1	22,7	
9	275,0	8,4			
10	440,7	6,7	31,2	29,2	
11	7,5		32,9	22,8	
12	5,8		32,8	20,3	

Année 92					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	5,3	33,6	19,5	
2	0,0	8,0	36,4	23,2	
3	0,0	6,4	36,1	26,2	
4	58,9	7,8	34,4	25,7	
5	127,3	7,7	32,5	24,5	
6	257,4	7,1	30,4	23,3	
7	159,8	3,8	28,8	23,0	
8	81,1	4,6	28,7	22,6	
9	206,4	4,9	29,3	22,3	
10	56,6	8,6	31,9	23,4	
11	23,2	8,2	21,9	21,9	
12	0,0	7,6	33,6	20,8	

Année 93					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	6,9	34,2	19,5	
2	0,0	8,7	36,2	23,7	
3	37,0	7,8	35,0	24,2	
4	52,5	8,6	34,5	25,5	
5	112,8	8,6	33,3	25,0	
6	122,3	7,6	31,5	23,8	
7	122,2	4,1	29,2	23,4	
8	188,1	4,6	29,4	23,1	
9	316,3	5,5	29,9	22,4	
10	13,1	8,2	32,6	23,4	
11	32,7	9,9	33,9	24,1	
12	6,2		33,2	21,2	

Année 94					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0		34,0	21,1	
2	0,0		36,0	24,1	
3	3,4	8,3	36,5	26,0	
4	85,7	7,8	34,3	25,8	
5	164,0	7,7	33,2	24,6	
6	164,2	6,7	30,3	23,7	
7	147,9	5,0	29,6	23,1	
8	226,9	5,3	29,7	22,8	
9	198,9	5,0	30,2	22,8	
10	205,0	6,4	31,2	22,4	
11	3,6	9,2	33,6	21,4	
12		7,3	33,7	18,1	

Année 95					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	6,9	34,7	18,7	
2	0,0	7,8	36,7	22,6	
3	35,5	7,8	36,4	25,7	
4	189,9				
5	237,6	8,8	32,6	24,2	
6	147,2	7,4	31,4	23,8	
7	273,0	5,0	29,8	23,4	
8	350,4	3,6	29,3	23,0	
9	274,9	5,1	30,7	22,9	
10	144,0	7,4	31,9	23,2	
11	12,4		33,5	22,3	
12	15,9		33,3	21,6	

Année 96					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,7				
2	2,4				
3	1,7				
4	231,3				
5	112,1				
6	274,6				
7	231,2				
8	265,5				
9	186,1				
10	232,4				
11	0,0				
12	0,0				

Année 97					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	31,2				
2	0,0				
3	117,3				
4	52,2				
5	49,9				
6	260,2				
7	204,2				
8	277,2				
9	248,6				
10	143,2				
11	3,9				
12	0,0				

Année 98					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	31,2				
2	0,0				
3	117,3				
4	52,2				
5	49,9				
6	260,2				
7	204,2				
8	277,2				
9	248,6				
10	143,2				
11	3,9				
12	0,0				

Année 99					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	6,2	5,2	35,4	22,4	63,7
2	53,1		35,3	23,2	59,3
3	53,6		36,1	25,6	65,0
4	76,1		34,6	24,8	69,7
5	23,1		34,1	25,0	70,3
6	101,7		32,5	24,4	76,9
7	277,0		29,8	23,3	82,9
8	260,4		29,9	22,9	82,4
9	394,4		30,5	22,9	83,8
10	330,2		31,4	22,5	81,2
11	5,0	8,8	35,7	23,5	74,5
12	0,0	7,9	35,7	20,5	64,3

Année 00					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	16,2	7,2	35,4	23,1	66,0
2	0,0		35,3	21,6	42,9
3	84,5	7,2	36,1	24,8	62,7
4	85,5	8,7	34,6	25,2	72,7
5	66,3	8,2	34,1	25,1	73,2
6	293,2	6,7	32,5	23,7	80,4
7	199,6	5,6	29,8	23,0	83,5
8	259,2	4,6	29,9	22,6	84,9
9	251,3	5,2	30,5	23,1	84,1
10	118,9	7,9	31,4	23,3	79,3
11	0,9	8,9	35,7	23,8	73,1
12	0,0	7,5	35,7	20,1	64,8

Année 01					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0				58,3
2	0,0				50,3
3	0,0				61,8
4	64,0				69,1
5	47,5				71,8
6	291,8				77,5
7	235,7				81,6
8	79,7				84,5
9	160,4				82,3
10	29,8				75,6
11	4,1				70,4
12	2,6				67,5

Année 02					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0				51,7
2	0,0				59,3
3	71,1				64,7
4	158,8				73,0
5	208,0				80,0
6	232,9				81,1
7	180,4				84,1
8	151,3				84,4
9	199,8				82,2
10	240,7				81,5
11	10,8				74,8
12	0,0				63,7

Année 03					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,7				59,8
2	18,6				63,4
3	35,2				60,8
4	87,6				75,1
5	70,2				73,8
6	300,3				81,6
7	105,6				81,9
8	242,7				83,8
9	314,0				83,9
10	135,5				81,6
11	102,4				77,9
12	10,7				67,9

Source: Andah winston

Annexe V

Données climatiques de la région de Tamale (Ghana)

Année 91					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	8,4	36,2	19,6	28,3
2	38,0	9,2	38,6	23,9	41,0
3	49,2	7,5	37,7	25,9	55,0
4	92,3	7,4	35,8	25,1	66,1
5	351,8	6,2	32,1	23,7	79,3
6	79,0	7,2	32,1	23,9	79,1
7	190,0	5,8	30,3	22,9	82,8
8	401,3	5,2	30,1	22,5	84,6
9	222,4	6,1	32,1	22,6	82,0
10	155,8	7,5	33,7	22,1	77,1
11	0,0	8,2	35,8	20,9	62,9
12	0,0	7,1	34,9	18,2	43,3

Année 92					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	5,6	34,2	19,1	24,3
2	0,0	7,0	38,0	22,4	22,2
3	35,0	6,4	38,7	25,8	35,9
4	44,4	7,6	37,3	25,9	58,8
5	68,4	7,0	34,5	24,7	67,7
6	141,9	6,7	31,9	23,0	75,5
7	116,7	5,4	29,8	22,5	81,9
8	45,2	3,7	30,4	22,5	78,3
9	186,1	5,8	31,4	22,1	79,7
10	34,7	8,8	34,7	22,6	72,4
11	22,9	7,1	35,2	20,9	54,0
12	0,0	8,1	36,4	18,8	32,6

Année 93					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	7,1	34,7	18,3	20,5
2	22,4	8,0	38,0	22,8	31,1
3	22,6	7,6	37,8	24,9	44,8
4	55,9	8,0	38,2	26,3	54,3
5	30,1	8,2	34,8	25,2	67,6
6	112,8	8,7	33,0	23,6	73,7
7	272,3	5,5	30,2	22,5	81,6
8	209,5	6,0	30,2	22,8	82,8
9	196,4	5,9	30,9	22,1	82,5
10	48,2	8,0	34,5	22,8	75,0
11	30,2	8,5	36,7	23,6	64,5
12	0,0	7,4	35,1	19,4	38,2

Année 94					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	7,2	35,4	19,6	25,3
2	0,0	6,6	37,8	22,6	25,6
3	73,1	7,0	38,7	26,2	43,0
4	43,3	7,7	37,4	25,9	57,4
5	201,6	7,8	34,6	24,4	70,6
6	148,8	7,6	31,4	23,1	79,0
7	191,6	5,6	30,4	22,9	81,4
8	143,7	4,5	30,5	22,8	80,6
9	200,8	5,6	31,3	23,0	81,7
10	156,0	7,5	32,7	22,4	80,3
11	0,0	9,8	35,5	18,7	60,4
12	0,0	7,1	34,7	16,7	33,2

Année 95					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	8,5	34,9	16,5	23,4
2	1,8	8,9	37,4	20,0	18,4
3	2,9	7,8	38,6	25,6	46,6
4	30,2	7,7	37,5	26,2	58,0
5	121,8	7,9	34,9	24,8	65,9
6	107,2	7,9	32,3	23,9	73,5
7	83,8	5,6	31,1	23,4	78,5
8	331,6	4,6	29,8	22,9	85,2
9	140,1	6,4	31,4	22,8	80,8
10	172,1	8,1	33,1	23,0	76,2
11	3,2	8,9	35,6	21,1	54,7
12	1,4	8,6	35,7	21,2	47,6

Année 96					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,000	9,5	37,4	20,1	30,6
2	23,000	8,9	38,5	25,0	38,9
3	7,000	7,3	38,7	27,1	44,2
4	114,000	7,5		25,5	62,6
5	103,000	8,4		25,2	70,4
6	220,000	7,1		23,2	79,0
7	86,000	6,5		22,7	81,2
8	226,000	5,1	29,9	22,2	82,6
9	228,000	5,1	31,0	21,9	81,8
10	139,000	8,4	33,3	22,1	75,4
11	0,000	9,1	35,8	18,6	51,3
12	11,000	9,2	36,3	19,4	43,2

Correction des précipitations d'un facteur 10

Année 97					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	8,4	36,8	21,1	30,0
2	0,0	5,6	36,9	21,5	15,7
3	62,0	6,0	38,2	24,9	32,6
4	226,0	8,4	35,5	25,1	62,6
5	148,0	8,5	32,8	23,7	74,3
6	205,0	7,0	31,2	23,0	80,8
7	150,0	6,0	30,1	22,5	82,0
8	123,0	5,8	31,2	23,0	80,7
9	199,0	6,2	32,1	22,9	81,1
10	121,0	7,3	33,8	23,0	75,5
11	0,0	9,1	36,2	22,1	60,9
12	0,0	8,5	36,4	19,8	38,6

Correction des précipitations d'un facteur 10

Année 98					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	0,0	6,5	36,3	19,5	24,1
2	23,0		39,3	24,1	31,1
3	0,0	6,7	39,9	26,0	21,0
4	34,0	7,2	38,9	27,6	55,3
5	145,0		35,1	25,7	67,5
6	87,0		32,0	24,1	78,2
7	125,0		31,1	23,6	78,5
8	96,0		30,1	23,3	81,3
9	243,0	5,4	30,8	22,7	82,3
10	188,0	7,8	33,6	23,1	76,6
11	3,0		36,9	21,9	58,1
12	16,0		35,6	20,3	45,8

Correction des précipitations d'un facteur 10

Année 99					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	4,2		36,6	20,2	30,0
2	12,2		37,1	22,2	30,6
3	20,7	8,4	39,5	26,7	47,4
4	81,3	7,1	36,5	25,6	60,3
5	136,8		35,3	25,0	66,5
6	146,0		33,0	23,6	72,8
7	365,5		30,6	22,8	80,2
8	200,4		29,8	23,0	81,8
9	226,5	5,2	30,4	22,2	81,8
10	187,0	7,1	32,0	22,3	77,7
11	1,7	9,6	36,3	22,7	58,2
12	0,0	8,2	35,6	18,6	31,6

Année 00					
Mois	Pluie (mm)	Durée Jour (h)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	%humidité
1	60,0	7,8	35,7	22,4	42,8
2	0,0	8,7	35,9	19,8	22,5
3	38,5	6,6	38,0	24,5	35,5
4	46,0	8,5	37,3	26,2	58,9
5	147,4	8,0	35,0	25,1	66,4
6	238,3	7,0	31,0	23,0	80,2
7	54,1	5,9	30,5	23,1	79,8
8	119,1	5,6	30,4	22,8	81,0
9	256,3	5,7	30,6	22,5	81,9
10	64,3	8,1	33,1	22,9	76,3
11	0,0	9,2	36,6	22,6	59,4
12	0,0	8,3	36,1	18,6	31,1

Source:Andah Winston

Annexe VI

Données climatiques de la région de Ouagadougou (Burkina Faso)

Année 94					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	30,0	17,4	21,9	7,7
2	102,9	36,2	19,4	15,6	6,9
3	40,9	39,0	24,5	21,2	5,9
4	0,3	39,9	26,9	24,3	5,9
5	15,3	38,7	26,9	45,8	9,2
6	98,6	34,4	24,4	60,4	9,3
7	112,3	32,4	23,2	69,8	7,9
8	300,0	30,3	22,5	81,0	6,4
9	593,4	32,3	22,7	75,4	4,7
10	62,5	33,5	22,9	69,9	5,6
11	0,0	35,0	19,5	37,0	5,4
12	0,0	32,4	16,4	24,6	9,6

Année 95					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	31,8	16,0	19,5	9,0
2	0,0	34,6	17,8	17,5	8,0
3	0,0	39,4	25,7	23,9	8,2
4	105,2	39,7	28,1	38,3	9,0
5	25,1	38,2	27,7	48,1	9,9
6	112,8	35,5	24,7	58,8	10,8
7	105,4	32,4	23,4	70,3	8,3
8	185,7	31,1	22,4	77,7	7,0
9	135,6	33,4	22,9	71,6	6,6
10	13,2	35,9	23,6	56,2	6,7
11	0,5	36,2	19,9	29,7	5,9
12	0,0	35,0	19,5	23,6	7,4

Année 96					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	36,1	18,3	22,3	6,2
2	0,0	37,9	21,4	18,8	6,9
3	0,0	39,1	25,8	17,8	7,9
4	10,9	39,0	26,9	36,5	6,8
5	43,7	38,4	26,5	46,5	10,0
6	26,9	35,1	25,2	58,6	10,9
7	131,6	33,6	24,1	65,0	10,7
8	99,6	31,3	23,4	73,5	11,6
9	63,3	32,1	23,5	73,0	8,6
10	20,1	35,6	24,2	52,1	8,2
11	0,0	35,0	18,6	26,7	7,4
12	0,0	35,3	18,3	21,8	6,9

Année 97					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	35,1	19,1	22,0	8,0
2	0,0	34,0	18,5	15,0	12,0
3	49,3	36,6	23,8	24,1	10,6
4	58,9	37,5	26,0	41,8	8,3
5	37,1	37,0	26,3	52,6	10,5
6	72,9	34,6	24,9	61,5	11,9
7	63,3	33,4	24,0	66,2	13,3
8	126,5	32,3	23,1	74,6	7,2
9	83,8	33,7	23,6	69,3	6,8
10	48,0	36,6	24,8	55,6	7,3
11	0,0	37,6	22,2	29,3	5,3
12	0,0	34,0	18,4	22,9	7,3

Année 98					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	33,5	18,4	21,3	8,1
2	0,0	37,5	22,0	18,0	9,1
3	0,0	38,1	23,1	15,3	10,4
4	10,9	40,6	29,3	34,8	9,6
5	33,8	38,1	27,8	51,7	9,7
6	42,7	35,3	25,4	59,9	9,0
7	185,4	33,0	24,2	68,9	9,3
8	204,7	31,0	23,4	76,8	8,3
9	196,1	32,2	23,3	76,9	6,3
10	0,0	34,7	24,2	64,0	3,7
11					
12	0,0	31,0	23,4	31,5	7,1

Année 99					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	33,0	19,7	23,0	12,1
2	0,0	34,8	20,2	19,4	9,9
3	0,0	39,5	25,3	21,4	10,7
4	0,0	39,4	26,7	34,6	11,9
5	0,0	37,4	26,5	53,5	12,9
6	0,0	36,7	25,6	56,8	13,6
7	0,0	31,7	23,3	75,1	10,6
8	0,0	29,3	22,7	78,8	8,4
9	3,8	31,0	22,0	76,4	7,7
10	109,2	35,2	23,4	54,5	8,9
11	0,0	35,9	21,1	31,3	7,4
12	0,0	32,6	17,1	24,9	10,1

Année 00					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	34,5	20,8	25,3	9,9
2	0,0	33,1	18,4	15,8	14,4
3	0,0	37,9	22,7	12,4	11,5
4	16,5	40,5	28,9	35,7	11,6
5	43,2	37,5	27,1	53,9	13,1
6	213,9	34,5	24,0	65,3	12,9
7	153,7	31,7	22,6	76,7	11,7
8	122,7	31,7	22,4	79,6	9,7
9	64,0	34,2	23,3	69,6	10,7
10	56,4	35,9	23,7	58,8	8,8
11	0,0	37,1	21,0	30,4	8,3
12	0,0	33,5	17,5	24,7	10,7

Année 01					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	33,6	16,4	19,3	10,9
2	0,0	34,9	18,6	15,8	13,6
3	0,0	39,8	23,3	17,1	10,1
4	0,0	40,9	28,2	29,3	11,7
5	50,8	38,4	27,2	52,2	13,8
6	105,4	34,8	25,0	62,1	13,1
7	173,7	32,2	23,1	76,8	11,6
8	177,8	31,3	23,1	81,4	10,2
9	105,7	32,2	22,6	75,8	9,5
10	15,8	36,6	23,5	40,7	8,9
11	61,0	36,6	20,6	21,8	9,6
12	0,0	35,4	18,8	18,0	11,9

Année 02					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	32,2	17,8	15,2	14,1
2	0,0	35,3	18,8	12,3	12,1
3	0,0	39,8	25,3	18,5	9,2
4	3,3	40,1	28,0	33,8	11,0
5	21,6	39,3	28,1	45,4	12,4
6	64,0	36,7	25,5	56,8	14,5
7	169,7	33,7	24,1	65,7	11,8
8	183,9	31,5	22,9	75,5	9,9
9	133,4	32,4	22,6	75,1	10,0
10	38,4	34,7	23,4	61,3	8,3
11	0,0	36,2	20,5	32,2	8,6
12	0,0	33,6	18,6	28,1	11,6

Année 03					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	33,9	17,9	22,0	10,2
2	2,0	37,6	21,9	25,5	9,9
3	4,1	38,1	23,3	21,9	11,5
4	23,9	40,1	27,4	40,4	11,5
5	197,1	39,0	27,2	48,0	12,1
6	318,3	33,5	23,6	71,4	10,2
7	241,8	31,8	22,6	78,7	10,1
8	178,6	31,4	22,3	82,4	8,8
9	160,0	32,4	22,9	80,1	7,2
10	54,4	36,5	24,1	65,2	8,0
11	61,0	36,8	21,5	41,1	7,5
12	0,0	34,1	17,4	28,8	9,8

Année 04					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	33,9	18,4	23,8	9,8
2	0,0	36,2	20,7	22,5	10,0
3	0,0	37,7	23,7	20,5	10,7
4	48,0	38,8	26,8	46,0	11,4
5	62,0	37,5	26,2	59,0	13,2
6	32,3	35,7	25,0	62,5	13,3
7	265,7	32,0	22,9	74,5	9,2
8	212,6	31,9	22,7	79,9	8,9
9	170,5	32,7	23,0	77,9	8,2
10	16,8	37,4	23,7	52,7	8,3
11	9,9	36,4	21,6	32,5	8,3
12	0,0	36,1	19,6	23,4	7,6

Année 05					
mois	Pluie (mm)	Tmax (°)	Tmin (°)	Humidité (%)	Vit. vent (km/h)
1	0,0	31,8	18,3	18,4	12,3
2	0,0	37,3	24,0	19,9	12,4
3	0,0	40,1	27,2	22,4	9,5
4	31,2	40,4	28,5	33,2	10,7
5	50,5	38,1	26,7	48,9	12,3
6	95,8	35,0	25,0	62,3	12,0
7	272,3	31,8	23,1	73,3	9,9
8	262,6	30,9	22,5	79,0	8,8
9	123,4	33,0	23,4	76,0	7,5
10	21,8	36,2	23,3	54,6	7,9
11	0,0	37,0	20,0	30,3	6,0
12	0,0	35,0	18,1	22,2	9,4

Les données pluviométriques en rouge correspondent au mois où il y a plus de 5 jours d'absence de données
Source:www.tutiempo.net

Annexe VII

Comparaison annuelle des diminutions de rendement dans la région de Kete-Krachi (Ghana)

Année	1991	1992	2000	FAO
Tmax (mm)	32.2	31.5	33.4	33
Tmin (mm)	23.8	23	23.3	22
Humidité (%)	76.4	76.4	72.3	76.4
Durée ensoleillement (h)	7.3	6.7	7.1	6.8
Précipitation (mm)	2431.5	970.7	1375.6	1406
Yr (%)	0.5	1.4	1.9	1.4
Date de plantation	31 mars	16 mai *	26 mars	15 mars

Nous ne reportons pas les vitesses de vents car elles sont absentes des données sources.

Annexe VIII

Comparaison annuelle des diminutions de rendement dans la région de Tamale (Ghana)

Année	1992	1993	1999	FAO
Tmax (mm)	34.4	34.5	34.4	33.4
Tmin (mm)	22.5	22.9	22.9	22.2
Humidité (%)	56.9	59.7	59.9	63.8
Vit. vent (km/j)	102.3	102.3	102.3	101.4
Durée ensoleillement (h)	6.6	7.4	7.2	7.2
Précipitation (mm)	695.3	1000.4	1382.3	1074
Yr (%)	1.9	2.6	2.2	1.7
Date de plantation	5 mai *	30 avril	20 avril	1 avril

Les Valeurs de Tmax, Tmin, humidité, de vitesse du vent et de durée d'ensoleillement sont des moyennes sur l'année. Les précipitations correspondent à la somme des précipitations de l'année.

Année FAO correspond au fichier moyen trouvé dans la base de donnée climwat.

Annexe IX

Comparaison annuelle des diminutions de rendement dans la région de Ouagadougou (Burkina Faso)

Année	2002	2003	2005	FAO
Tmax (mm)	35.5	35.4	35.6	34.8
Tmin (mm)	23	22.7	23.3	21.6
Humidité (%)	43.3	50.5	45	51.2
Vit. vent (km/j)	267	233.6	238.4	196.5
Durée ensoleillement (h)	8.4	8.4	8.4	8.4
Précipitation (mm)	614.2	1241	857.72	862
Yr (%)	32.3	0.5	7.1	1.4
Date de plantation	2 juillet	9 mai	12 juin	1 juin

Annexe X

Variabilité du rendement en fonction de l'écart en jour entre 2 événements pluvieux

Delta J	1	5	10	15	20
Tamale Yr (%)	0,8	0,9	0,8	13	24,6
Krachi Yr (%)	1,5	1,2	2,4	22,2	35,3
Ouagadougou Yr (%)	34,3	32,6	39,5	53,6	64,6

Annexe XI

Caractéristique des sols

Type de sol	Super heavy	Heavy*	Medium*	Light*	Medium Light	Super Light
Réserve utile maximal (mm/m)	300	180	140	100	50	25
Vitesse maximale d'infiltration (mm/j)	40	40	40	40	40	40
Profondeur maximale des racines (m)	9	9	9	9	9	9
Tarissement initial (%)	0 à 100	0 à 100	0 à 100	0 à 100	0 à 100	0 à 100
Réserve utile initial (mm/m)	0 à 300	0 à 180	0 à 140	0 à 180	0 à 50	0 à 25

Annexe XII

Variabilité du rendement en fonction du type de sol région de Tamale (Ghana)

Type de sol	Super heavy	Heavy*	Medium*	Light*	Medium Light	Super Light
Réserve utile maximal (mm/m)	300	180	140	100	50	25
Vitesse maximale d'infiltration (mm/j)	40	40	40	40	40	40
Profondeur maximale des racines (m)	9	9	9	9	9	9
Tarissement initial (%)	0 à 100	0 à 100	0 à 100	0 à 100	0 à 100	0 à 100
Réserve utile initial (mm/m)	0 à 300	0 à 180	0 à 140	0 à 180	0 à 50	0 à 25
Année 1992 Yr (%)	1,8	1,3	1,1	0,9	8,1	14,2
Année 1993 Yr (%)	1,3	0,9	0,6	0,4	0,4	10,7
Année 1999 Yr (%)	1,1	0,8	0,8	0,8	0,8	8,5
Année FAO Yr (%)	1,6	1,1	0,9	0,8	0,8	7,7

Annexe XIII

Variabilité du rendement en fonction du type de sol région de Ouagadougou (Burkina Faso)

Type de sol	Super heavy	Heavy*	Medium*	Light*	Medium Light	Super Light
Réserve utile maximal (mm/m)	300	180	140	100	50	25
Vitesse maximale d'infiltration (mm/j)	40	40	40	40	40	40
Profondeur maximale des racines (m)	9	9	9	9	9	9
Tarissement initial (%)	0 à 100	0 à 100	0 à 100	0 à 100	0 à 100	0 à 100
Réserve utile initial (mm/m)	0 à 300	0 à 180	0 à 140	0 à 180	0 à 50	0 à 25
Année 2002 Yr (%)	56,7	64,9	67,5	70	73,3	76,6
Année 2003 Yr (%)	5,6	5,9	6	6,2	9,1	37,6
Année 2005 Yr (%)	32,5	39,2	41,5	43,9	46,7	56,7
Année FAO Yr (%)	23	30,2	32,6	35	38,2	44,7

Annexe XIV

Comparaison des rendements théorique et réel

Tamale			
Année	Yr (%)	Ya th (t/ha)	Ya réel (t/ha)
1992	1.9	8.829	1,2040
1993	2.6	8.766	1,5092
1999	2.2	8.802	1,4557
FAO	1.7	8.847	×

Kete-Krachi			
Année	Yr (%)	Ya th (t/ha)	Ya réel (t/ha)
1991	0.5	8.955	1,5260
1992	1.4	8.874	1,2040
2000	1.9	8.829	1,4578
FAO	1.4	8.874	×

Ouagadougou			
Année	Yr (%)	Ya th (t/ha)	Ya réel (t/ha)
2002	32.2	6.102	1,7381
2003	0.5	8.955	1,5284
2005	7.1	8.361	1,2666
FAO	1.4	8.874	×

Source des Ya réel: <http://faostat.fao.org>

Les valeurs de la FAO non pas de valeur de rendement réel car nous ne connaissons pas les années utilisées pour faire les valeurs interannuelles donc nous n'avons pas pu déterminer leur rendement réel moyen.