



**VALIDATION ET CALIBRATION DU LOGICIEL  
AQUACROP POUR L'EVALUATION DES ACTIVITES  
HYDRO-AGRICOLES AU NIVEAU DE LA PARCELLE**

Mémoire pour l'obtention du  
**Master en Ingénierie de l'eau et de l'environnement**  
Option: **Eau**

Présenté et soutenu publiquement le 16 juin 2010 par:

**TRAORE Abdoulaye**

Travaux dirigés par:

**Amadou Keïta**, Enseignant Chercheur UTER GVEA ZiE

**Joost WELLENS**, Conseiller Technique Principal Coopérant APEFE

**Akoly Agblévi MIDEKOR**, Chargé de mission Observatoire de l'Eau AEDE

**Farid TRAORE**, Doctorant à l'ULg

Jury d'évaluation du stage:

Président: **Dr Hamma YACOUBA**

Membres et correcteurs:

**Amadou Keïta**

**Akoly Agblévi MIDEKOR**

**Sewa Da Silveira**



## **REMERCIEMENTS**

---

Ce rapport de mémoire, est le résultat d'un travail d'équipe, celle-ci comprenait un certains nombre d'acteurs dont les noms ne figurent pas sur la couverture. Nous saisissons cette opportunité pour adresser nos sincères remerciements à toutes les personnes qui, au sein du projet GEeau et de l'Observatoire de l'Eau, ont rendu possible ce stage.

Ce rapport a bénéficié des commentaires, des ajouts et des révisions de mes très chers encadreurs : Amadou Keïta, Enseignant Chercheur UTER GVEA 2IE ; Joost WELLENS Conseiller Technique Principal Coopérant APEFE ; Akoly Agblévi MIDEKOR Chargé de mission Observatoire de l'Eau AEDE ; Farid TRAORE Doctorant à l'ULg.

Nos remerciements vont également à l'endroit du corps enseignant de la Fondation 2iE, qui nous encadre depuis le début de cette formation de Master.

## **RESUME**

---

AquaCrop est un outil de bilan d'eau (développé par la FAO) qui permet de gérer l'eau de manière efficiente en irrigation, d'estimer les rendements et d'élaborer des calendriers d'irrigation au niveau de la parcelle. La robustesse du modèle et le degré de précision de ses données de sortie sont étroitement liés à une bonne maîtrise des paramètres et données d'entrée de celui-ci. Durant les saisons culturales 2008 et 2009, des champs de maïs ont été suivis à Diaradougou dans la vallée du Kou située au Sud-ouest du Burkina Faso. Durant cette période les teneurs en eau, les fractions de couvertures vertes ainsi que les rendements à la récolte ont été suivis dans le but de valider et calibrer le modèle pour cas de la vallée du Kou. Sur les deux types profils de sols rencontrés dans la zone, le modèle s'est montré capable de simuler, la teneur en eau (efficience de 0.7 dans les deux cas simulés et des coefficients d'ajustement de 0.74 et 0.77) et la fraction de couverture verte (efficacités de 0.82 et 0.38 pour les deux cas simulés et des coefficients d'ajustement de 0.77 et 0.89) avec une assez bonne précision. Pour le deuxième type de sol (à savoir le HGPE) une modification à la hausse de la conductivité hydraulique à saturation, du fait de la couche intermédiaire d'argile, s'est avérée nécessaire pour venir à bout du calage (efficience de 0.44, un coefficient d'ajustement de 0.76 lors du calage pour la teneur en eau ; une efficience de 0.75 et un coefficient d'ajustement de 0.77 pour la couverture verte). Le modèle s'est montré d'autre part incapable de simuler un cas de stress hydrique sévère (dans la phase de croissance) en particulier pour la couverture verte où l'on a obtenu une efficience de -0.09 et un coefficient d'ajustement de 0.44.

## **ABSTRACT**

---

AquaCrop is a FOA water balance tool (developed by FAO) which efficiently permits to manage water in irrigation, to estimate the yield part and make the irrigation schedule at the field level. The model's robustness and precision's degree of its output data are closely linked to a good parameters's mastery and its entry's piece of information. During the 2008 and 2009 cultural's seasons, some corns's fields was followed in Diaradougou, precisely in the kou valley located in Burkina faso's south-west. During this period the soil water content, the green canopy cover and the graine yield were followed in order to validate and calibrate the model for Kou valley case. On the first kind profil of soil met in the study site (knowing FLTC), the model was able to simulate, the soil water water content with a better precision (coefficient of efficiency of 0.7 in the two simulated cases and some adjustment's coefficients of 0.77 and 0.89). For the second kind of soil (knowing HGPE) a rising transformation of hydraulic's conductivity at saturation, by the fact that the intermediate clay's layer, was necessary to get through calibration (coefficient of efficiency of 0.44, a coefficient of adjustment of 0.79 during the process of calibrating for water content; an coefficient of efficiency of 0.75 and an adjustment coefficient of 0.77 for the green canopy cover). The model was in other hand unable to simulate a severe case of water stress (occured in the growing stage).

## LISTE DES ABREVIATIONS

---

|                             |                                                                                          |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>BUNASOL</b>              | : Bureau National de Sols                                                                |
| <b><math>CC_x</math></b>    | : Maximum Canopy Cover                                                                   |
| <b><math>CGC</math></b>     | : Canopy Growth Coefficient                                                              |
| <b><math>CC_0</math></b>    | : Initial Canopy Cover                                                                   |
| <b><math>CC</math></b>      | : Capacité au Champ                                                                      |
| <b>EF</b>                   | : Efficience du modèle                                                                   |
| <b>FLTC</b>                 | : Sols Ferrugineux Tropicaux Lessivés à Taches et Concrétions                            |
| <b>HGPE</b>                 | : Sol Hydromorphe Peu humifère à pseudoGley d'Ensemble                                   |
| <b>IPTRID</b>               | : Programme international pour la recherche et la technologie en irrigation et drainage. |
| <b><math>K_{sat}</math></b> | : Conductivité hydraulique à Saturation                                                  |
| <b>LAI</b>                  | : Leaf Area Index                                                                        |
| <b>PF</b>                   | : Point de flétrissement                                                                 |
| <b><math>R^2</math></b>     | : Coefficient goodness of fit                                                            |
| <b>RMSE</b>                 | : Root Mean Squared Error                                                                |
| <b>RGB</b>                  | : Red Green Blue                                                                         |

## SOMMAIRE.

---

|                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Remerciements .....</b>                                                       | <b>ii</b>  |
| <b>Résumé .....</b>                                                              | <b>iii</b> |
| <b>Abstract .....</b>                                                            | <b>iv</b>  |
| <b>Liste des abréviations.....</b>                                               | <b>v</b>   |
| <b>sommaire. ....</b>                                                            | <b>1</b>   |
| <b>Liste des tableaux .....</b>                                                  | <b>4</b>   |
| <b>liste des figures.....</b>                                                    | <b>5</b>   |
| <b>I-INTRODUCTION .....</b>                                                      | <b>7</b>   |
| <b>1.1 Contexte et problématique. ....</b>                                       | <b>7</b>   |
| <b>1.2 La structure d'accueil.....</b>                                           | <b>8</b>   |
| <b>1.3 La zone d'intervention.....</b>                                           | <b>8</b>   |
| <b>II-HYPOTHESE ET OBJECTIFS DU TRAVAIL.....</b>                                 | <b>10</b>  |
| <b>2.1 Objectif du travail.....</b>                                              | <b>10</b>  |
| <b>2.2 Hypothèses .....</b>                                                      | <b>10</b>  |
| <b>III-MATERIELS ET METHODES .....</b>                                           | <b>11</b>  |
| <b>3.1 Parcelles expérimentales et Monitoring. ....</b>                          | <b>11</b>  |
| 3.1.1 Protocole de suivi de la teneur en eau.....                                | 12         |
| 3.1.1.1 Méthodes directes .....                                                  | 12         |
| 3.1.1.2 Méthodes indirectes .....                                                | 12         |
| 3.1.1.3 Choix de la méthode de mesure de la teneur en eau. ....                  | 12         |
| 3.1.2 Protocole de suivi de la fraction de couverture verte. ....                | 14         |
| 3.1.2.1 Principe de détermination de la fraction de couverture verte.....        | 15         |
| 3.1.2.2 Méthodologie de détermination de la fraction de couverture verte. ....   | 15         |
| 3.1.3 Protocole de suivi des rendements.....                                     | 18         |
| <b>3.2 Le modèle AquaCrop.....</b>                                               | <b>19</b>  |
| 3.2.1 Paramètres conservatifs. ....                                              | 20         |
| 3.2.2 Paramètres et variables nécessaires à la validation. ....                  | 20         |
| 3.2.2.1 Paramètres climatiques .....                                             | 20         |
| 3.2.2.2 Informations agronomiques et expérimentales relatives à la culture. .... | 22         |
| 3.2.2.3 Propriétés physiques et hydrauliques des sols .....                      | 22         |

|                                                                                                          |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2.4 Paramètres de gestion au niveau de la parcelle.....                                              | 24        |
| 3.2.3 Données de sortie du modèle AquaCrop. ....                                                         | 25        |
| <b>3.3 Validation et Calibration du modèle .....</b>                                                     | <b>25</b> |
| 3.3.1 Principe du calage.....                                                                            | 25        |
| 3.3.2 Méthodologie du calage.....                                                                        | 26        |
| 3.3.2.1 Calage au niveau de la teneur en eau du sol. ....                                                | 27        |
| 3.3.2.2 Calage au niveau de la fraction de couverture verte. ....                                        | 27        |
| 3.3.2.3 Calage au niveau des rendements. ....                                                            | 28        |
| 3.3.3 Vérification du modèle AquaCrop.....                                                               | 28        |
| 3.3.3.1 Principe de la vérification. ....                                                                | 28        |
| 3.3.3.2 Méthodologie de la vérification.....                                                             | 28        |
| <b>IV-RESULTATS .....</b>                                                                                | <b>29</b> |
| <b>4.1 Résultats du calage.....</b>                                                                      | <b>29</b> |
| 4.1.1 Parcelle de Abdoulaye Sanou (Profil FLTC, rive droite). ....                                       | 29        |
| 4.1.1.1 Calage au niveau de la teneur en eau. ....                                                       | 29        |
| 4.1.1.2 Calage au niveau de la fraction de couverture verte. ....                                        | 30        |
| 4.1.1.3 Calage au niveau du rendement. ....                                                              | 31        |
| 4.1.2 Parcelle de SOULEYMANE SANOU 2 (Profil FLTC, rive gauche).....                                     | 31        |
| 4.1.2.1 Calage au niveau de la teneur en eau. ....                                                       | 31        |
| 4.1.2.2 Calage au niveau de la fraction de couverture verte. ....                                        | 32        |
| 4.1.2.3 Calage au niveau du rendement. ....                                                              | 32        |
| <b>4.2 Résultats de validation du calage.....</b>                                                        | <b>33</b> |
| 4.2.1 Parcelle de Lassina Sanou sm (Rive gauche, sol de type fltc et voisin de Souleymane Sanou 1). .... | 33        |
| 4.2.1.1 Résultats de validation au niveau de la teneur en eau. ....                                      | 33        |
| 4.2.1.2 Résultats de validation au niveau de la fraction de couverture verte. ....                       | 33        |
| 4.2.1.3 Résultats de validation au niveau du rendement. ....                                             | 34        |
| 4.2.2 Parcelle d'Adama Sanou (rive droite, sol de type hgpe et voisin de abdoulaye sanou). ....          | 34        |
| 4.2.2.1 Résultats de validation au niveau de la teneur en eau. ....                                      | 34        |
| 4.2.2.2 Résultats de validation au niveau de la fraction de couverture verte. ....                       | 35        |
| 4.2.2.3 Résultats de validation au niveau du rendement. ....                                             | 35        |
| <b>V-ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS .....</b>                                                       | <b>36</b> |
| <b>5.1 Validation et Calibration au niveau de la teneur en eau. ....</b>                                 | <b>36</b> |
| <b>5.2 Validation et calibration au niveau de la couverture verte. ....</b>                              | <b>37</b> |
| <b>5.3 Validation et calibration au niveau du rendement.....</b>                                         | <b>38</b> |
| <b>VI-CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES. ....</b>                                                              | <b>39</b> |
| <b>VII-BIBLIOGRAPHIE.....</b>                                                                            | <b>40</b> |



|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| <b>VIII-ANNEXES .....</b> | <b>41</b> |
|---------------------------|-----------|

## LISTE DES TABLEAUX

---

|                                                                                                                                                       |                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Tableau 1: Tableau de la nomenclature des parcelles expérimentales.....                                                                               | 12                                 |
| Tableau 2: Résultats de traitement d'une même photo à l'aide des deux méthodes citées. ....                                                           | 18                                 |
| Tableau 3: Caractéristiques physiques et hydrauliques des sols .....                                                                                  | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| Tableau 4: Erreurs moyennes quadratiques, efficacités du modèle et coefficients d'ajustements obtenus lors des simulation de teneurs en eau.....      | 37                                 |
| Tableau 5: Erreurs moyennes quadratiques, efficacités du modèle et coefficients d'ajustements obtenus lors des simulation de couvertures vertes. .... | 38                                 |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1: Carte de situation et de présentation de la zone d'étude.....                                                              | 9  |
| Figure 2: Carte de situation des champs d'expérimentation à Diaradougou.....                                                         | 11 |
| Figure 3a: Séance de carottage.....                                                                                                  | 13 |
| Figure 3b: Mode de conservation des échantillons de sol.....                                                                         | 13 |
| Figure 4: Séance de prise de photo de couverture verte.....                                                                          | 15 |
| Figure 5a: Histogramme des couleurs de l'image de la figure 5b.....                                                                  | 16 |
| Figure 5b: Résultat de sélection de couverture verte par seuillage avec la Threshold panel d'ASSESS..                                | 16 |
| Figure 6a: Histogramme de densité des couleurs après sélection du maïs et élimination des mauvaises herbes.....                      | 17 |
| Figure 6b : Résultat de sélection RGB du maïs .....                                                                                  | 17 |
| Figure 6c : Résultat de conversion en nuance de gris .....                                                                           | 17 |
| Figure 6d : Résultats de conversion en binaire .....                                                                                 | 17 |
| Figure 7: Organigramme d'AquaCrop indiquant les principales composantes de la relation sol-eau-plante (P Steduto et Al, 2008). ..... | 19 |
| Figure 8: Pluies journalières de la période du 1er janvier 2008 au 31 décembre 2009 station de Bama.....                             | 20 |
| Figure 9: Valeur journalières de la température de la période du 1er janvier 2008 au 31 décembre 2009 station de Bama. ....          | 21 |
| Figure 10: Valeur journalières de l'évapotranspiration de référence de la zone d'étude.....                                          | 22 |
| Figure 11: Résultat de superposition des parcelles expérimentales sur le BUNASOL et la PVA. ....                                     | 23 |
| Figure 12: Procédure de calage. ....                                                                                                 | 25 |
| Figure 13a: Qualité de l'ajustement pour la teneur en eau (Abdoulaye Sanou) .....                                                    | 30 |
| Figure 13b: Comparaison des teneurs en eau observées et simulées (Abdoulaye Sanou).....                                              | 30 |
| Figure 14a : Qualité de l'ajustement pour la couverture verte (Abdoulaye Sanou).....                                                 | 30 |
| Figure 14b : Comparaison des couvertures vertes observées et simulées (Abdoulaye Sanou).....                                         | 30 |
| Figure 15a : Qualité de l'ajustement pour la teneur en eau (Souleymane Sanou 2). ....                                                | 31 |
| Figure 15b : Comparaison des teneurs en eau observées et simulées (Souleymane Sanou 2).....                                          | 31 |
| Figure 16a : Qualité de l'ajustement pour la couverture verte (Souleymane Sanou 2). ....                                             | 32 |
| Figure 16b : Comparaison des couvertures vertes observées et simulées (Souleymane Sanou 2). ....                                     | 32 |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 17a: Qualité de l'ajustement pour la teneur en eau (Lassina Sanou SM) .....           | 33 |
| Figure 17b: Comparaison des teneurs en eau observées et simulées (Lassina Sanou SM) .....    | 33 |
| Figure 18a: Qualité de l'ajustement pour la couverture verte (Lassina Sanou SM). ....        | 34 |
| Figure 18b: Comparaison des couvertures vertes observées et simulées (Lassina Sanou SM). ... | 34 |
| Figure 19a: Qualité de l'ajustement pour la teneur en eau (Adama Sanou). ....                | 34 |
| Figure 19b: Comparaison des teneurs en eau observées et simulées (Adama Sanou). ....         | 34 |
| Figure 20a: Qualité de l'ajustement pour la couverture verte (Adama Sanou). ....             | 35 |
| Figure 20b: Comparaison des couvertures vertes observées et simulées (Adama Sanou). ....     | 35 |
| Figure 21: Comparaison des rendements observés et simulés. ....                              | 38 |

## **I-INTRODUCTION**

---

### **1.1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE.**

De nos jours la gestion de l'eau agricole est l'une des préoccupations majeures des acteurs nationaux et internationaux œuvrant dans le domaine de la sécurité alimentaire et dans le cadre de la lutte contre la pauvreté (grid IPTRID, 2007). En effet dans un contexte de changement climatique et particulièrement de rareté de l'eau, l'utilisation inefficace de la ressource dans le domaine de l'agriculture (l'un des plus gros consommateurs d'eau douce) interpelle le monde entier. La recherche et le développement d'outils d'aide à la décision s'avère nécessaire à la régulation des volumes d'eau utilisés en agriculture en vue: d'améliorer la productivité de l'eau, de générer des revenus tant à l'échelle locale que globale et d'établir un équilibre entre l'offre et la demande en nourriture dans le monde.

AquaCrop est un outil de bilan d'eau (développé par la FAO) qui permet de gérer l'eau de manière efficace en irrigation, d'estimer les rendements et d'élaborer des calendriers d'irrigation au niveau de la parcelle. La robustesse du modèle et le degré de précision de ses données de sortie sont étroitement liés à une bonne maîtrise des paramètres et données d'entrée de celui-ci. La FAO s'est fixé comme objectifs de calibrer les paramètres conservatifs du modèle pour les cultures les plus importantes de la planète, et ce pour différents scénarios de stress hydrique, de profils de sol, de pratiques culturales et de gestions au niveau de la parcelle avec comme finalité de rendre AquaCrop accessible à tout profil d'utilisateur et sans calibrations supplémentaires dans l'espace et dans le temps (Hsiao et al., 2009).

Le maïs, représentant 30% de la production céréalière mondiale (FAO, 2003), fut la première culture utilisée pour la calibration et la validation du modèle de base. Les données provenant de 6 saisons culturales, collectés sur des parcelles d'expérimentation à Davis en Californie, ont été dans un premier temps utilisées pour calibrer et valider le modèle (Hsiao et al., 2009). En suite le prototype 2.4 d'AquaCrop ainsi calé a été testé avec des données provenant d'autres régions du monde (Bushland au Texas; Gainesville en Floride et Zaragoza en Espagne) autres que ceux de Davis. Ces trois dernières régions ont été choisies en fonction de conditions climatiques et de sol particulières dans un souci de spatialisation du modèle. Ces études ont montré, qu'avec 19 paramètres maintenus constants AquaCrop est capable de simuler avec une bonne approximation la biomasse, la fraction de couverture verte ainsi que le rendement céréalière. Par contre la simulation des cas de stress hydriques sévères, en particulier lorsque ceux-ci surviennent dans la

phase de maturation, s'avèrent difficiles (Hsiao et al., 2009).

En 2008 et 2009, en saisons sèche, des parcelles expérimentales de maïs ont été suivies dans la vallée du Kou au sud ouest du Burkina Faso. Les données agronomiques et climatiques collectées durant cette période permettront dans un premier temps de valider les paramètres conservatifs que l'on retrouve dans la bibliographie (Hsiao et al 2009) et ensuite de calibrer AquaCrop pour le cas du bassin versant du Kou, pour le maïs.

## **1.2 LA STRUCTURE D'ACCUEIL**

Cette recherche entre dans le cadre du projet GEeau qui œuvre dans le "Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou" ([www.ge-eau.org](http://www.ge-eau.org)). Le projet est une intervention de la Région wallonne de la Belgique en collaboration avec la Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts-Bassins (DRAHRH-HB), l'Association pour l'Eau, le Développement et l'Environnement (AEDE) et l'Université de Liège (ULg). Il s'occupe en général de la gestion intégrée des ressources en eau dans la région et vise à développer des outils d'aide à la décision qui assisteront les services locaux dans leur gestion en eau dans l'agriculture.

## **1.3 LA ZONE D'INTERVENTION**

Le bassin versant du Kou est un sous bassin constitué par la rivière Kou, affluent du fleuve Mouhoun (ex. Volta noire) qui est un des 3 grands cours d'eau du Burkina Faso. Le climat est de type Soudanien et se caractérise par une saison des pluies qui dure 5 à 6 mois et il tombe environ 900 à 1100 mm d'eau par an. Selon les études morpho-pédologiques réalisées dans la zone les sols sont essentiellement de types limono-argileux et argileux.

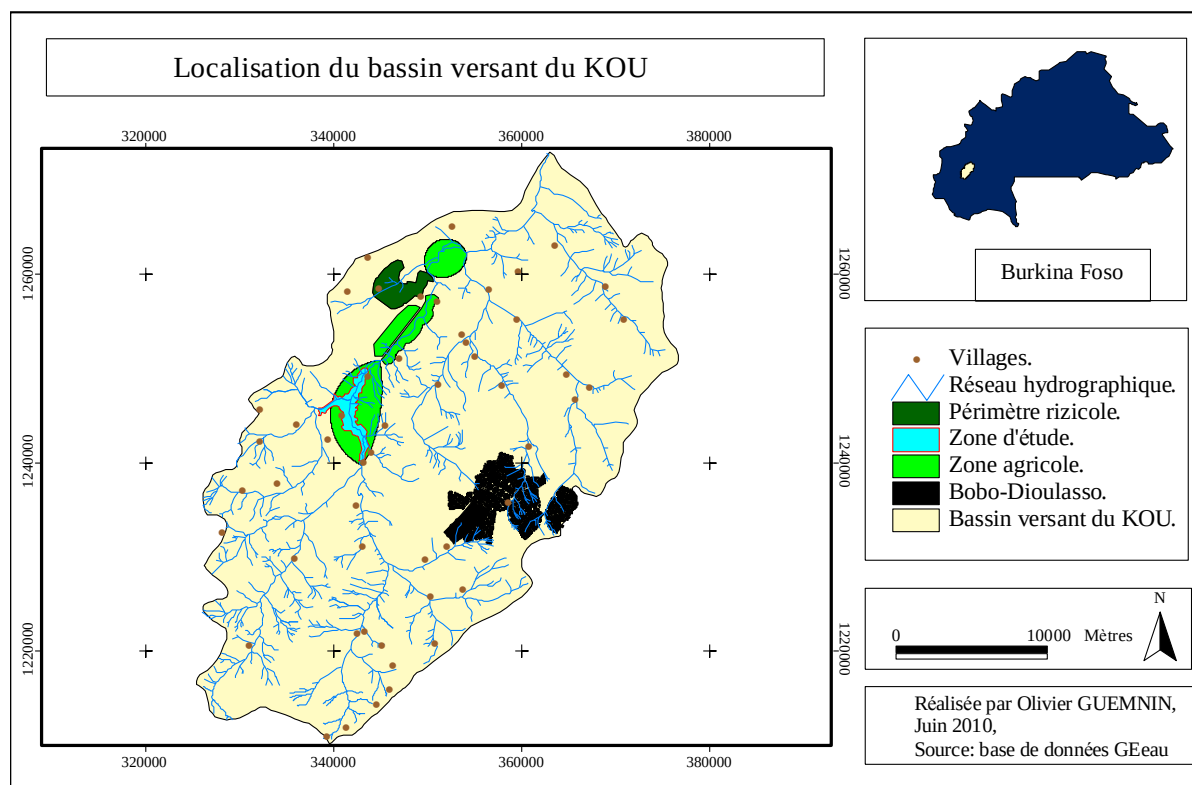


Figure 1: Carte de situation et de présentation de la zone d'étude.

## **II-HYPOTHESE ET OBJECTIFS DU TRAVAIL**

---

### **2.1 OBJECTIF DU TRAVAIL**

L'objectif est de valider et calibrer le logiciel AquaCrop. A partir des données collectées et analysées, le logiciel sera validé et calibré pour le cas de la vallée du Kou en comparant:

- Les teneurs en eau simulées et observées,
- Les fractions de couvertures vertes observées et simulées,
- Les rendements observés et simulés.

### **2.2 HYPOTHESES**

- Les variétés de maïs étudiées diffèrent uniquement dans la phénologie, c'est dire les dates de début et de fin de floraison, la sénescence, la maturité physiologique et la profondeur maximale d'enracinement.
- Nous considérons que les profondeurs maximales d'enracinement sont atteintes au début de la sénescence.
- Les mêmes coefficients de stress seront appliqués quelque soit le type de maïs et quelque soit l'année de culture.
- Les données pédologiques relatives à notre zone d'étude seront fournies par une carte de découpage textural des sols. Ces données sont les résultats issus des études morpho pédologiques menées par une équipe d'experts constituée des chercheurs de l'INERA, de l'EIER et du BUNASOLS. [GEeau, 2004].



### III-MATERIELS ET METHODES

#### 3.1 PARCELLES EXPERIMENTALES ET MONITORING.

Des parcelles expérimentales de maïs ont été suivies durant les saisons agricoles 2008 et 2009 dans des zones agricoles irriguées du bassin versant du Kou, au sud-ouest du Burkina Faso, plus précisément dans le village de Diaradougou (Figure 2). Notre étude porte sur cinq (05) parcelles (voir tableau 1) et concerne la période de saison sèche (maïs de contre saison). La rivière Kou qui serpente entre les parcelles constitue la principale source d'eau d'irrigation.

Durant les deux années d'expérimentation, tout le long du cycle végétatif, les teneurs en eau du sol et les fractions de couvertures ont été suivies une fois par semaine ; et des carrés de rendements ont été réalisés à la récolte pour chaque parcelle expérimentale.

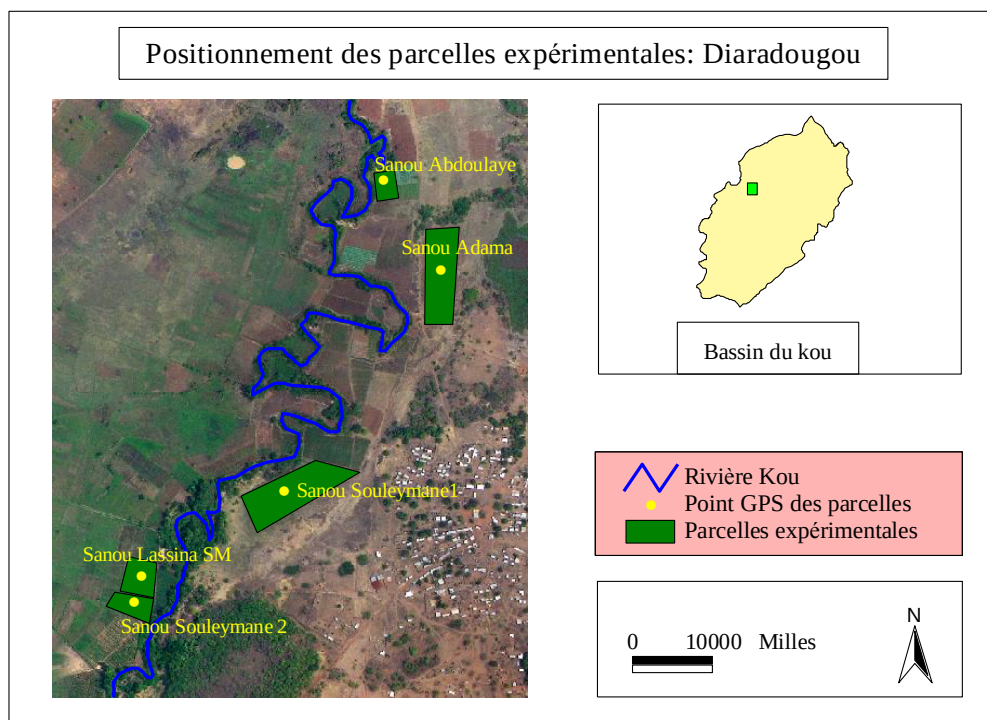


Figure 2: Carte de situation des champs d'expérimentation à Diaradougou.

Tableau 1:Tableau de la nomenclature des parcelles expérimentales.

| Nom                | Latitude | Longitude | Village      | Culture |
|--------------------|----------|-----------|--------------|---------|
| Sanou Abdoulaye    | 11.30312 | 4.43368   | Diaradougou  | Maïs    |
| Sanou Adama        | 11.3006  | 4.43308   | Diaradougou  | Maïs    |
| Sanou Souleymane 1 | 11.29808 | 4.43475   | Diaradougou  | Maïs    |
| Sanou Lassina      | 11.29611 | 4.43771   | Diaradougou  | Maïs    |
| Sanou Souleymane 2 | 11.29548 | 4.4378    | Diarradougou | Maïs    |

### 3.1.1 Protocole de suivi de la teneur en eau.

Les méthodes de détermination de l'humidité du sol sont fort nombreuses. On les sépare habituellement en deux groupes:

- Les méthodes directes effectuées généralement en laboratoire.
- Les méthodes indirectes réalisées sur le terrain.

#### 3.1.1.1 Méthodes directes

Ces méthodes consistent à extraire l'eau du sol (étuve, four à micro-onde, extraction par l'alcool, exposition à des rayons infrarouges, etc.) et à déterminer la quantité d'eau extraite par pesage avant et après extraction de l'eau. Dans la méthode traditionnelle (dite gravimétrique), l'extraction de l'eau se fait dans une étuve.

#### 3.1.1.2 Méthodes indirectes

Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques ou chimiques du sol varient avec l'humidité. En mesurant ces propriétés (résistance électrique, thermalisation des neutrons, atténuation des rayons gamma, constante diélectrique, etc.), l'on peut déduire la teneur en eau au moyen de relation d'étalonnage. Parmi ces méthodes indirectes, les techniques les plus utilisées sont les méthodes nucléaires (méthode neutronique ou atténuation gammamétrique) et les méthodes diélectriques (technique TDR, technique capacitives et télédétection micro-onde).

#### 3.1.1.3 Choix de la méthode de mesure de la teneur en eau.

En juillet 2007, une étude comparative des méthodes gravimétrique (directe) et sonde EC H<sub>2</sub>O (méthode indirecte), réalisée par le projet **GEeau** sur notre site d'expérimentation a montré que pour cinq (05) parcelles sur sept (07), il existe une assez bonne corrélation entre les deux méthodes (**Jules Voguelin, 2007**).

La méthode gravimétrique fut celle qui a été retenue pour le suivi de l'évolution de l'eau contenue dans le sol durant notre étude car bien que sa mise en œuvre soit longue elle nécessite un matériel peu coûteux.

Durant les deux années de suivi, chaque semaine, à trois endroits choisis de façon aléatoire sur la parcelle, l'équipe de suivi a réalisé du carottage à différentes profondeurs (voir séance de carottage image 1a). Des échantillons de sol sont prélevés à l'aide d'une tarière à 30, à 60 puis à 90 cm. Ces échantillons sont soigneusement mis dans des récipients de prélèvement (numérotés et de mêmes volumes, 100cm<sup>3</sup>). Ces échantillons sont conservés dans une glacière contenant des gels accumulateurs de froid en vue de maintenir constante leur humidité et de minimiser ainsi l'évaporation jusqu'au laboratoire d'analyse (comme illustré dans l'image 1b).



Figure 3a: Séance de carottage



Figure 3b: dispositif de conservation des échantillons.

Une fois au laboratoire ces échantillons de sols sont immédiatement soumis à la méthode gravimétrique.

L'opération consiste successivement à:

- Peser l'échantillon pour obtenir la masse humide,  $M_h$
- Placer l'échantillon à l'étuve à 105 °C jusqu'à obtention d'une masse constante. Le temps de séchage dépend de la nature du sol, de la taille de l'échantillon et des caractéristiques de l'étuve (en général 24 h)
- Peser à nouveau l'échantillon, ce qui fournit sa masse sèche  $M_s$

La valeur de l'humidité massique  $w$  est obtenue par la formule:

$$w = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

Où:

$w$ : Humidité massique

$M_h$ : Masse de l'échantillon humide

$M_s$ : Masse sèche

Obtention de l'humidité volumique :

$$\theta = w \times \frac{M_s}{V_t \times \rho_w}$$

Où:

$\theta$ : Humidité volumique

$w$ : Humidité massique

$\rho_w$ : Masse volumique de l'eau

$V_t$ : Volume totale de l'échantillon

$M_s$ : Masse sèche

La valeur de la teneur en eau dans le profil du sol a été calculée par intégration de l'humidité volumique en partant de la surface du sol jusqu'à 90 cm de profondeur à l'aide de la méthode des trapèzes:

$$T = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} \frac{\theta_{i+1} + \theta_i}{100} (Z_{i+1} - Z_i) \times 10$$

$T$ : Teneur en eau dans le profil (mm)

$\theta_i$ : Humidité volumique à une profondeur  $z$  donnée en (%)

$Z_i$ : Profondeur (cm)

$i$ : Point de mesure

Pour l'estimation de la teneur eau à la surface nous considérons les trois équations suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{i+1} < \theta_{pf} \text{ alors } \theta_i = \theta_{i+1} \\ \frac{\theta_{i+1}}{2} < \theta_{pf} \text{ alors } \theta_i = \theta_{pf} \\ \frac{\theta_{i+1}}{2} > \theta_{pf} \text{ alors } \theta_i = \frac{\theta_{i+1}}{2} \end{array} \right\}$$

### 3.1.2 Protocole de suivi de la fraction de couverture verte.

Durant tout le cycle du maïs, une fois par semaine, à l'aide d'un dispositif constitué d'un appareil photographique professionnel (à déclencheur à distance) fixé au dessus d'une perche de 3 mètres de hauteur, l'équipe du Projet GEeau a réalisé un suivi de la couverture verte du sol sur l'ensemble des parcelles-test. Le mode opératoire consistait en 15 prises de vue (à la position verticale), en des points aléatoires de la parcelle. Cette opération a été répétée à un pas de temps

hebdomadaire, sur l'ensemble du cycle végétatif de la culture suivie.



Figure 4: Séance de prise de photo de couverture verte.

### 3.1.2.1 Principe de détermination de la fraction de couverture verte.

Le traitement des photos de couverture verte consiste à sélectionner, à l'aide d'un seuillage, la famille de pixels prenant les valeurs de couleurs (entre 0 et 255 pour chaque canal d'une image **RGB en 8 bit**) correspondant au maïs et la fraction de couverture verte est donnée par le rapport du nombre de pixels représentant le maïs, au nombre total de pixels de l'image.

### 3.1.2.2 Méthodologie de détermination de la fraction de couverture verte.

- **Première approche: Logiciel ASSESS**

#### Description de l'outil ASSESS

ASSESS est une application d'algorithme de traitement d'image destiné à la quantification des maladies des plantes. C'est un outil développé par Lakhdar Lamari du Département des Sciences Végétales de l'Université de Manitoba Winnipeg, Canada. ASSESS permet entre autres de mesurer la surface d'une feuille, de mesurer le pourcentage de surface infectée, de compter les lésions et, en ce qui nous concerne, de mesurer la fraction de couverture verte.

#### Méthodologie

##### **Sélection de la plage de couleurs correspondant au maïs.**

Dans cette première approche, il a été suggéré de proche en proche des seuils de couleur au modèle ASSESS pour la détermination de la fraction de couverture. L'utilisateur peut pré-visualiser la sélection et s'arrêter lorsque la plage de couleur est satisfaisante.

L'histogramme de l'image présente alors deux distributions matérialisant le sol nu (en bleu sur la figure 5a) et la verdure. L'on peut cependant remarquer une petite famille de pixels isolés encore appelés bruits au niveau de l'image (non matérialisé sur le graphe de la figure 5a mais visible sur la photo à traiter). Ces bruits sont dus à l'environnement de prise de la photo et de l'équipement d'acquisition de l'image. Ils peuvent être atténués à l'aide de fonctions simple de ''réduction de



bruit'' d'ASSESS.

Fort est de constater (voir figure 5b) qu'en plus du maïs les mauvaises herbes sont également sélectionnées, alors il est indispensable de les effacer à l'aide ''d'outils gomme'' disponibles dans la plupart des applications de traitement d'image.

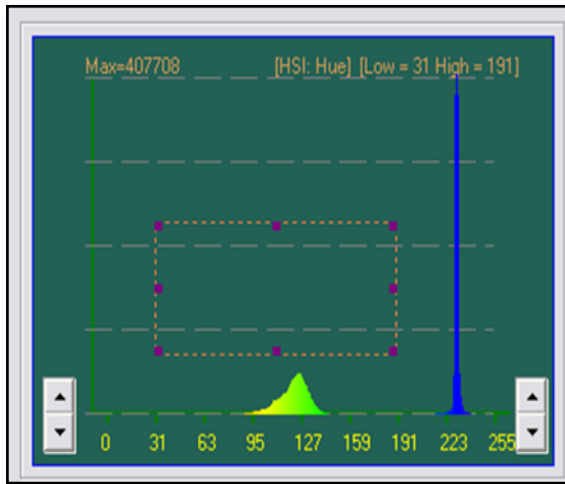


Figure 5a: Histogramme des couleurs de l'image de la figure 5b.



Figure 5b : Résultat de sélection de couverture verte par seuillage avec la Threshold panel d'ASSESS.

### Analyse statistique des pixels

Après la sélection du maïs et l'élimination des mauvaises herbes, la fraction de couverture verte est donnée par un clic sur le bouton ''% Area'' de la palette Threshold d'ASSESS. Vu le nombre important de photos à traiter, il a été enregistré des macros sous ASSESS dans le but d'automatiser les tâches répétitives (voir annexe 1 pour la synthèse des résultats de traitements).

- **Deuxième approche: Photoshop-ImageJ**

### Description des outils Photoshop et ImageJ

#### Adobe Photoshop

Adobe Photoshop est une application de retouche photo développée par la compagnie Adobe. Contrairement aux autres versions du logiciel, son prototype CS3, utilisé dans le cadre de cette étude comporte un menu complet d'analyse d'image.

#### ImageJ

ImageJ (*Image Processing and Analysis in Java*) est un modèle de traitement et d'analyse d'image développé par la NIH (National Institute of Mental Health) Bethesda, Maryland, USA. Son Auteur Wayne Rasband est un volontaire spécial à la NIH. Le modèle est un freeware très

utilisé dans le domaine de l'imagerie médicale.

## **Méthodologie**

### **Sélection de la plage de couleurs correspondant au maïs.**

A l'aide de Photoshop, le traitement débute par une modification des teintes et saturation afin de bien étaler l'histogramme de densité des couleurs et augmenter la visibilité à l'œil. Ensuite dans la palette de sélection de plage de couleur, la plage de couleur souhaitée est directement définie par un clic sur le maïs à l'aide de la pipette de sélection de couleur. Le maïs est sélectionné automatiquement avec une tolérance définie par l'utilisateur ; plus la tolérance est petite plus la sélection des couleurs similaires est sévère (voir résultat de sélection figures 6a et 6b).

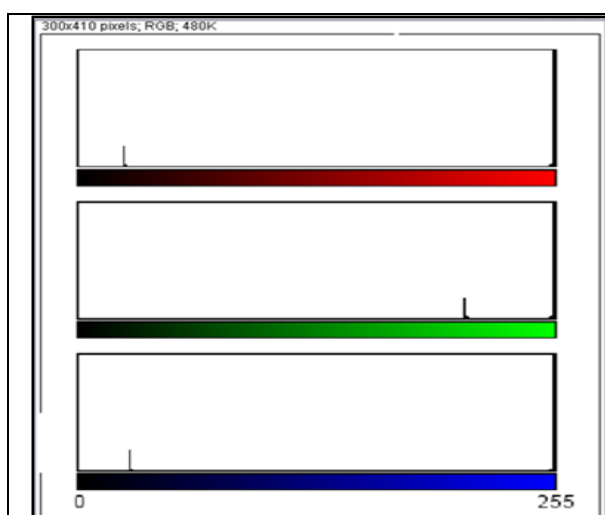


Figure 6a: Histogramme de densité des couleurs après sélection du maïs et élimination des mauvaises herbes

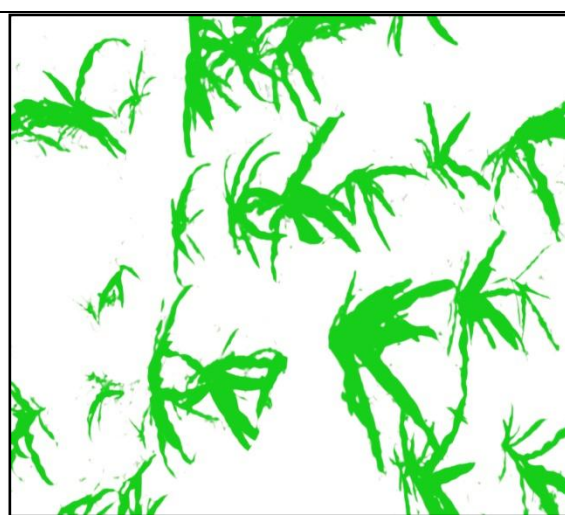


Figure 7b : Résultat de sélection RGB du maïs.

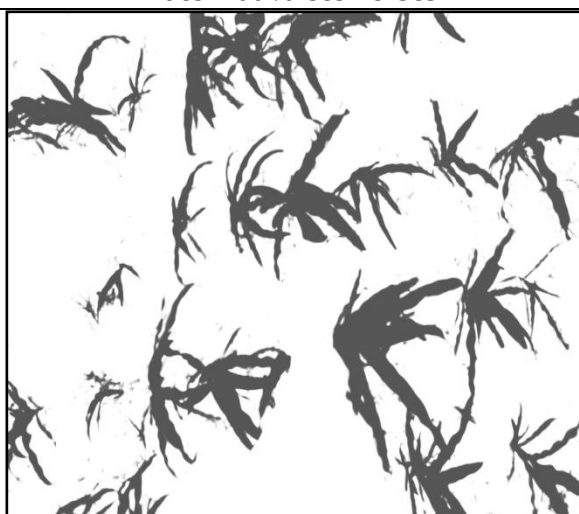


Figure 8c : Résultat de conversion en nuance de gris

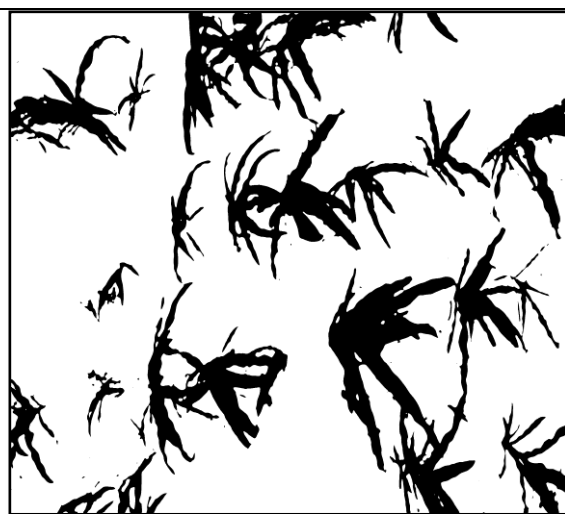


Figure 9d : Résultats de conversion en binaire

## Analyse statistique des pixels

Après la sélection du maïs, l'image est soumise à ImageJ pour la détermination du pourcentage de surface occupée par les feuilles. Pour ce faire, l'image RGB est d'abord convertie en nuance de gris 8 bits (figure 6c) afin de pouvoir la transformer en binaire (Noir et blanc figure 6d). La fraction de couverture verte est donnée grâce aux outils d'analyses statistiques de pixels d'ImageJ. Des scripts ont été également enregistrés pour automatiser les tâches répétitives (voir annexe 1 pour la synthèse des résultats de traitements).

- **Comparaison des deux approches**

### En termes de mise en œuvre

En termes de mise en œuvre Photoshop-ImageJ nécessite un temps d'opération plus long comparé à ASSESS car pour deux photos prises un même jour, un seuillage donné peut conduire à des résultats de sélection largement différents. Par contre avec ASSESS, un même seuillage peut servir pour la sélection d'une plage de couleur sur des photos prises à des dates différentes et des stades de croissances différents, rendant ainsi plus facile l'utilisation des macros pour l'automatisation des tâches répétitives.

Du fait de sa simplicité et de sa précision de sélection un peu plus élevée, le logiciel ASSESS sera utilisé pour le traitement des photos de couverture verte dans le cadre de notre étude.

### En termes de précision

Comme l'indique le tableau 2, dans la colonne fraction de couverture (%), qui présente les résultats d'analyse réalisée sur la même photo, ASSESS offre une valeur de la fc supérieures à celle de Photoshop-ImageJ; ce résultat traduit le fait que ASSESS a une précision de sélection relativement meilleure que Photoshop-ImageJ.

Tableau 2: Résultats de traitement d'une même photo à l'aide des deux méthodes citées.

| Méthode          | Fraction de couverture (%) | Mode (DN) |
|------------------|----------------------------|-----------|
| ASSESS           | 22.76                      | 255       |
| Photoshop-ImageJ | 21.2                       | 255       |

Dans ce tableau le mode représente la valeur de pixel la plus rencontrée dans l'image.

### 3.1.3 Protocole de suivi des rendements

Des carrés de rendements (2m X 2m) ont été réalisés à la récolte pour chacune des parcelles tests. Ces rendements pourront être ramenés en tonne par hectare afin de pouvoir les comparer à



ceux fournis par le modèle AquaCrop. Le poids du maïs dégrainé, avec une humidité variant de 10 à 15 %, a été mesuré en kg pour les différents champs tests.

### 3.2 LE MODELE AQUACROP

AquaCrop est un logiciel développé par la FAO pour la simulation de la réponse productive des cultures herbacées à la disponibilité hydrique. « Le contenu d'eau dans la zone des racines est simulé à travers la quantification des flux d'eau en entrée et en sortie du système, considérant le sol comme un réservoir d'eau constitué par plusieurs couches. La réponse de la culture au stress hydrique est modulée par le développement de la couverture foliaire, la conductance stomatique, la sénescence et l'indice de récolte. La simulation de la transpiration détermine l'accumulation journalière de biomasse, au moyen de la productivité de l'eau de la culture. Ce dernier paramètre est normalisé pour l'évapotranspiration de référence et pour le CO<sub>2</sub>, permettant de faire des simulations en zones et périodes différentes, ainsi que pour des scénarios climatiques futures. AquaCrop simule l'agriculture pluviale, l'irrigation supplémentaire, déficitaire et totale » (P Steduto et Al, 2008).

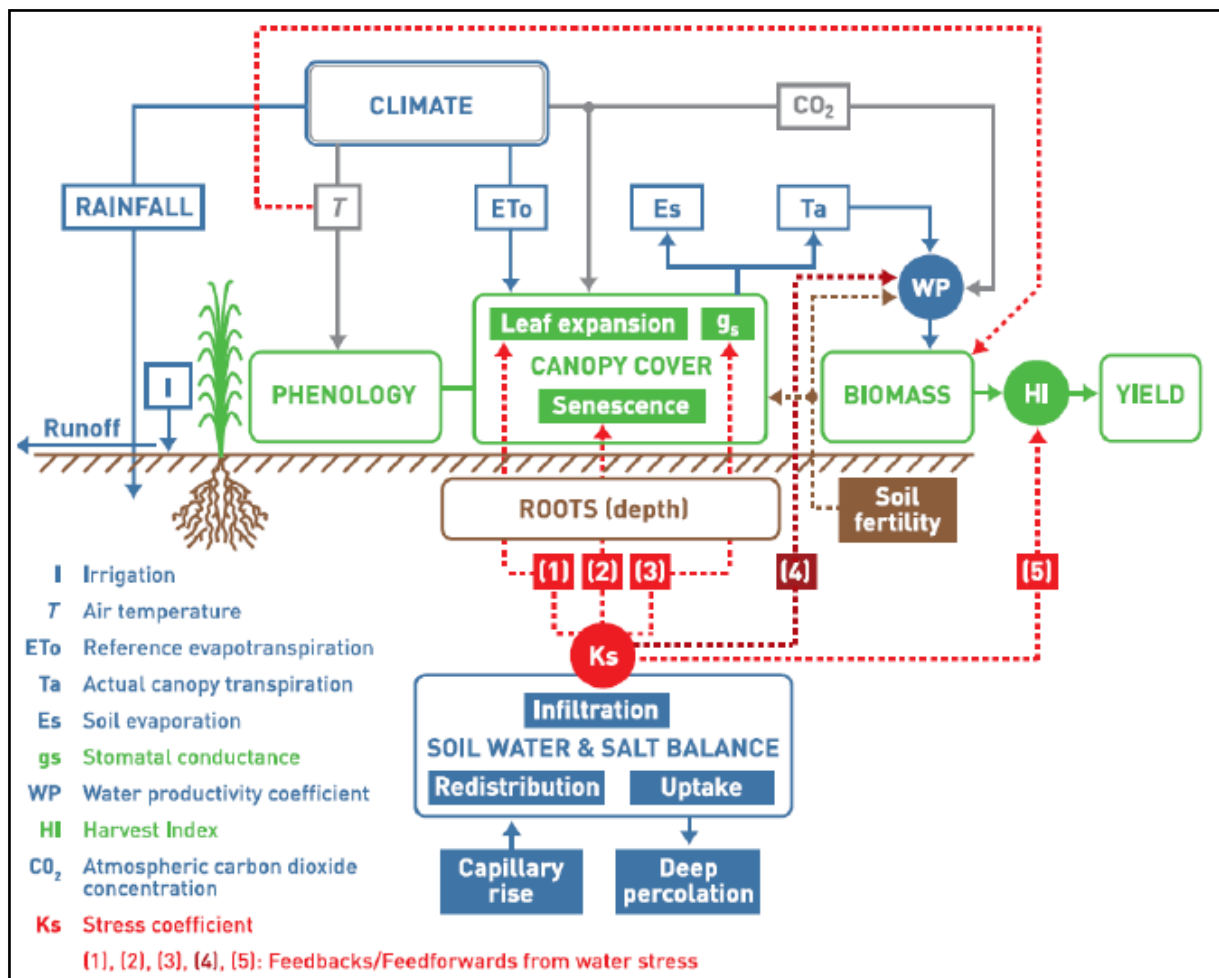


Figure 10: Organigramme d'AquaCrop indiquant les principales composantes de la relation sol-eau-plante (P Steduto et Al, 2008).

### 3.2.1 Paramètres conservatifs.

Des études réalisées par Hsiao et al. en 2009 ont démontré que parmi les paramètres de la culture dans AquaCrop, 21 d'entre eux sont conservatifs (constants). Ils sont supposés être applicables dans une large gamme de conditions et non liés à une variété donnée (voir liste des paramètres conservatifs tirée de Hsiao et al, 2009 en annexe 4).

### 3.2.2 Paramètres et variables nécessaires à la validation.

#### 3.2.2.1 Paramètres climatiques

Les données climatiques utilisées dans cette étude proviennent de la station météorologique de l'INERA qui se trouve à Bama. Ce sont notamment la pluviométrie, les températures maximales et minimales et l'évapotranspiration de référence.

#### La pluie.

Les pluies journalières de la zone d'étude, pour les 2008 et 2009 ont été converties dans le format **.PLU**, exigé par le modèle AquaCrop. La saison sèche à une durée de 6 à 7 mois et concerne la période de novembre à mai comme indiquée sur la figure 8.

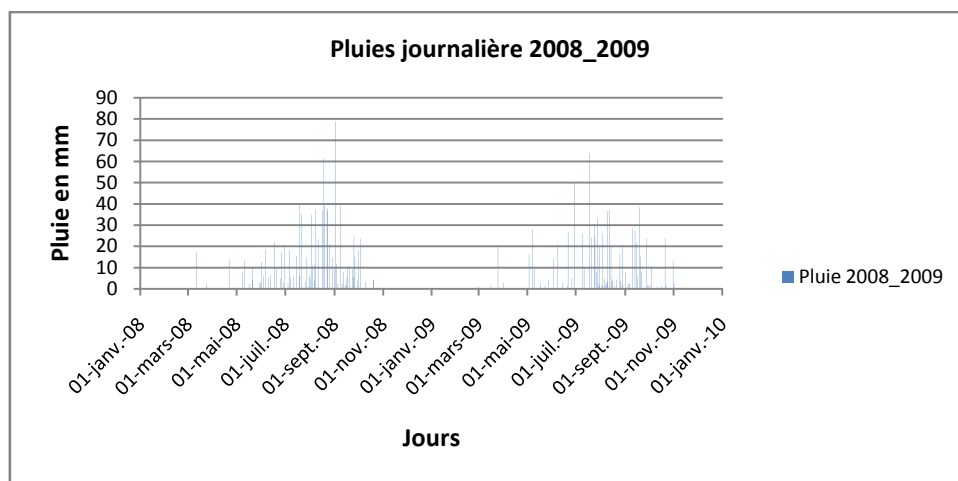


Figure 11: Pluies journalières de la période du 1er janvier 2008 au 31 décembre 2009 station de Bama.

#### Les températures minimales et maximales.

Les températures minimales et maximales pour les années 2008 et 2009 ont été également converties au format **.TMP**, reconnu par le modèle AquaCrop. Les températures de notre site varient majoritairement entre 10 et 40° C (voir température journalière Bama Figure 9)

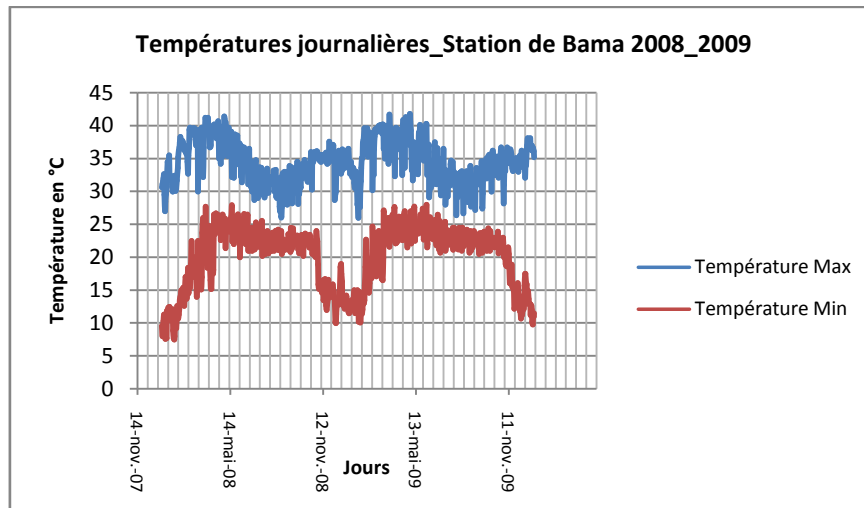


Figure 12: Valeur journalières de la température de la période du 1er janvier 2008 au 31 décembre 2009 station de Bama.

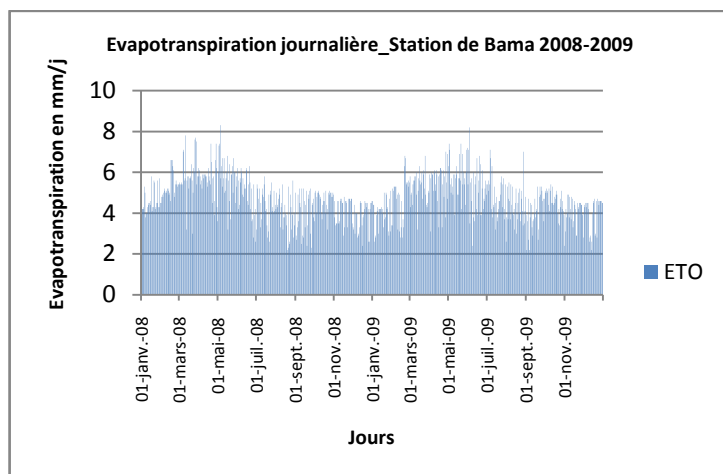
### L'évapotranspiration de référence.

L'évapotranspiration de référence est un facteur clé dans la détermination des besoins de la plante, AquaCrop l'utilise comme donnée d'entrée au format de fichier **.ETo**. La formule FAO Penman-Monteith est retenue comme standard par la FAO depuis 1998 pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence (Allen et al, 1998) car l'utilisation d'une autre méthode pourrait conduire à des écarts entre les valeurs simulées de biomasse, d'autant plus que la biomasse dépend de la transpiration de la culture.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{moy} + 273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.3u_2)} \quad [\text{mm/jour}]$$

- ET<sub>0</sub> : Evapotranspiration de référence [mm j<sup>-1</sup>]
- R<sub>n</sub> : Rayonnement net à la surface de la culture [MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>]
- G : Densité de flux de chaleur dans le sol [MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>]
- T<sub>moy</sub> : Température moyenne mesurée à 2 m du sol [°C]
- u<sub>2</sub> : Vitesse du vent mesurée à 2 m du sol [m s<sup>-1</sup>]
- e<sub>a</sub> : Pression de vapeur de l'air [kPa]
- e<sub>s</sub> : Pression de vapeur saturante de l'air [kPa]
- Δ : Pente de la courbe de pression de vapeur saturante [kPa °C<sup>-1</sup>]
- γ : Constante psychrométrique de l'air [kPa °C<sup>-1</sup>]

A partir du logiciel ETo Calculator développé par Raes (2003) nous avons estimé l'évapotranspiration de référence en fournissant en données d'entrée: l'humidité (minimale et maximale), la température (minimale et maximale), la radiation solaire et la vitesse du vent (à 2 m au dessus du sol).



L'évapotranspiration varie entre 3 et 7 mm/j avec parfois des pics de 8 mm/j

Figure 13: Valeur journalières de l'évapotranspiration de référence de la zone d'étude.

### 3.2.2.2 Informations agronomiques et expérimentales relatives à la culture.

Les informations agronomiques et expérimentales doivent être également fournies au modèle comme données d'entrée (format de fichier **.CROP**). Ce sont notamment pour chaque parcelle: la date de semis, la densité de semis à l'émergence, le nom de l'espèce, les phases végétatives (début floraison, début sénescence) et leurs durées ainsi que la date de récolte. Voir tableau récapitulatif des informations agronomiques des parcelles d'expérimentation annexe 3.

### 3.2.2.3 Propriétés physiques et hydrauliques des sols

Les propriétés hydrauliques de chaque couche de sol sont indispensables à la simulation avec AquaCrop (format de fichier **.SOL**).

En superposant trois couches d'informations que sont les coordonnées GPS des champs tests, une prise de vue aérienne et une carte morpho-pédologique de la zone d'étude (BUNASOL, Juillet 2002), le type, le pourcentage de sable, d'argile et de limon de chaque champ test ont été déterminés (voir Carte de repérage des champs d'expérimentation à Diaradougou, Figure 11).

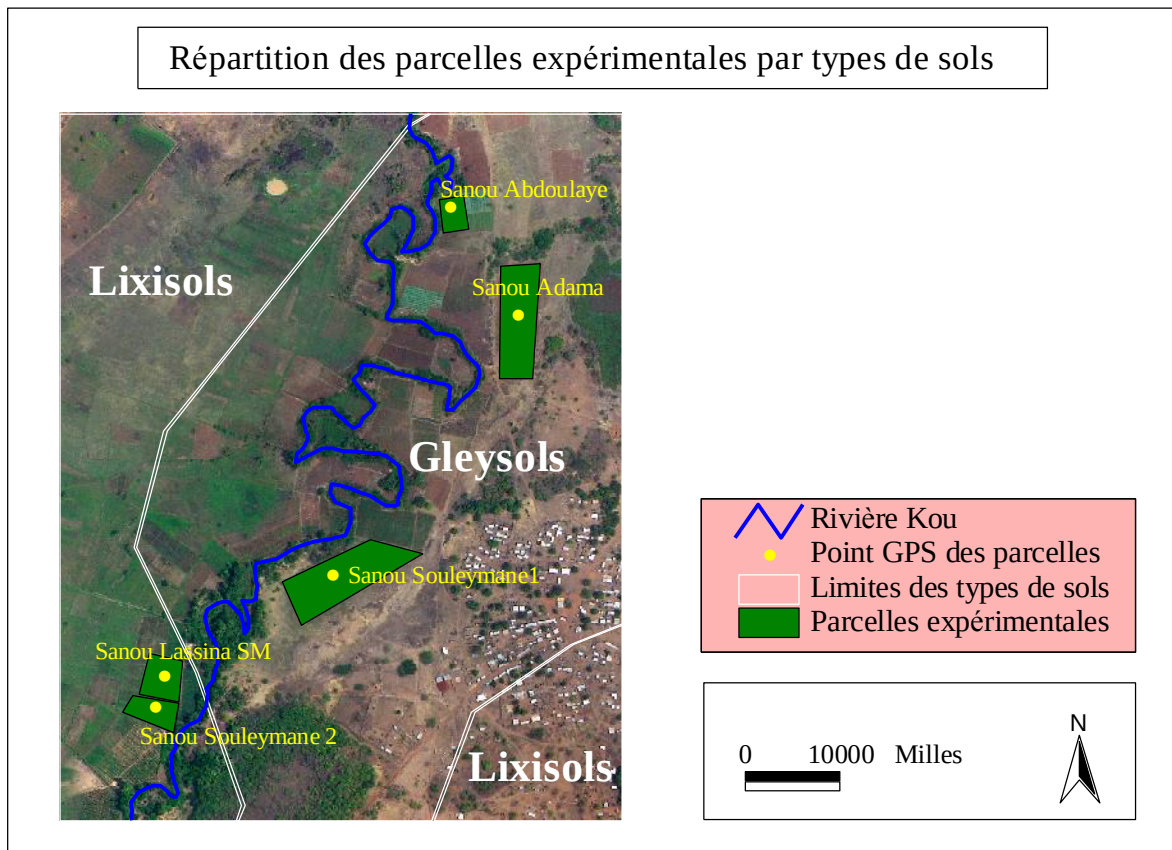


Figure 14: Résultat de superposition des parcelles expérimentales sur le BUNASOL et la PVA.

Selon la classification du BUNASOL, on retrouve deux grands groupes de sols sur notre site d'étude. Ce sont les **Lixisols** de type **FLTC** (Sols Ferrugineux Tropicaux Lessivés à Taches et Concrétions) et les **Gleysols** de type **HGPE** (Sol Hydromorphe Peu humifère à pseudoGley d'Ensemble) dont les caractéristiques sont données par les tableaux 3a et 3b.

En localisant chaque sol sur le triangle de texture, grâce au logiciel de pédotransfert SPAW Hydrology (Saxton et al, 2006), la saturation, la capacité au champ, le point de flétrissement et la conductivité hydraulique à saturation ont été déterminées (voir tableaux 3a et 3b). Le taux de drainage quant à lui sera déduit de la conductivité hydraulique par la formule de (Gonzales, 1999):  $0 \leq 0,0866 * K_{sat}^{0,35} \leq 1$ .

| Tableau 3a: Caractéristiques physiques et hydrauliques de type FLTC FLTC |        |         |         |          |
|--------------------------------------------------------------------------|--------|---------|---------|----------|
| Prof(cm)                                                                 | 0 à 15 | 15 à 54 | 54 à 84 | 84 à 117 |
| Argile                                                                   | 15.7   | 27.5    | 27.5    | 29.4     |
| Limon                                                                    | 62.7   | 43.1    | 29.4    | 39.2     |
| Sable                                                                    | 21.6   | 29.4    | 43.1    | 31.4     |
| Texture                                                                  | LF     | L       | L       | LA       |
|                                                                          |        |         |         |          |
| Pf                                                                       | 10.1   | 16.3    | 16.2    | 17.5     |
| CC                                                                       | 27.2   | 30.5    | 27.9    | 31.0     |
| Saturation                                                               | 37.3   | 39.7    | 38.5    | 40.0     |
| Ksat                                                                     | 87.6   | 53.3    | 75.1    | 47.5     |
|                                                                          |        |         |         |          |
| Drainage                                                                 | 0.41   | 0.35    | 0.39    | 0.33     |

| Tableau 4b : Caractéristiques physiques et hydrauliques de type HGPE HGPE |       |        |         |          |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|--------|---------|----------|
| Prof(cm)                                                                  | 0 à 8 | 8 à 19 | 19 à 49 | 49 à 127 |
| Argile                                                                    | 27.5  | 51.0   | 56.9    | 17.7     |
| Limon                                                                     | 56.9  | 35.3   | 25.5    | 68.6     |
| Sable                                                                     | 15.7  | 13.7   | 17.7    | 13.7     |
| Texture                                                                   | LF    | A      | A       | LF       |
|                                                                           |       |        |         |          |
| Pf                                                                        | 17    | 30     | 33.5    | 11.3     |
| CC                                                                        | 33.3  | 43.0   | 45.6    | 30.7     |
| Saturation                                                                | 41.1  | 49.1   | 50.5    | 38.3     |
| Ksat                                                                      | 35.0  | 13.4   | 7.0     | 51.1     |
|                                                                           |       |        |         |          |
| Drainage                                                                  | 0.30  | 0.22   | 0.17    | 0.34     |

LF : limon ferrugineux ; LA : argile argileux ; A : argile

### 3.2.2.4 Paramètres de gestion au niveau de la parcelle.

Les pratiques culturales comme la fertilisation (qui ne rentre pas dans le cadre de cette étude), les apports d'eau par irrigation (date de début, dates de fin et doses à travers le fichier **.IRR**) et le type ou système d'irrigation sont nécessaires en données d'entrée. Sur la base des caractéristiques des motopompes et des relevés d'événements d'apport d'eau par irrigation sur les deux années de collecte de données, nous avons estimé les doses d'irrigation à partir de la formule:

$$H = \frac{T \times Q}{S \times 10000} \times 3600$$

H: Dose en (mm)

T: Durée d'irrigation (h)

Q:Débit de la motopompe (l/s)

S: Superficie de la parcelle (Ha)

Les calendriers d'irrigation de chaque parcelle sont en annexe 2

### 3.2.3 Données de sortie du modèle AquaCrop.

AquaCrop génère après chaque simulation 5 fichiers de sortie qui sont:

**ProjetRun.OUT:** qui donne le résumé général des résultats de simulation.

**ProjetCrop.OUT:** qui donne le résumé des informations de simulation relatives à la culture.

**ProjetComp.OUT:** qui donne le résumé des résultats de simulation de teneur en eau relatifs aux différents compartiments de sol.

**ProjetProf.OUT:** qui donne le résumé des résultats de simulations relatives à la teneur en eau totale contenue dans le profil à différents états.

**ProjetWabal.OUT:** qui donne le bilan d'eau au niveau de la zone racinaire pour chaque jour de simulation.

## 3.3 VALIDATION ET CALIBRATION DU MODELE

### 3.3.1 Principe du calage

L'opération consiste à fournir des données d'entrée passées et/ou présent tout en maintenant constants les paramètres conservatifs disponibles dans la bibliographie du modèle et de comparer à l'aide de critère statistiques, les résultats simulés et observés afin de juger de l'applicabilité de ces paramètres. En cas de déviation excessive entre valeurs simulés et observées, modifier certains paramètres du modèle et reprendre la simulation jusqu'à des écarts acceptables (voir Procédure de calage figure 12).

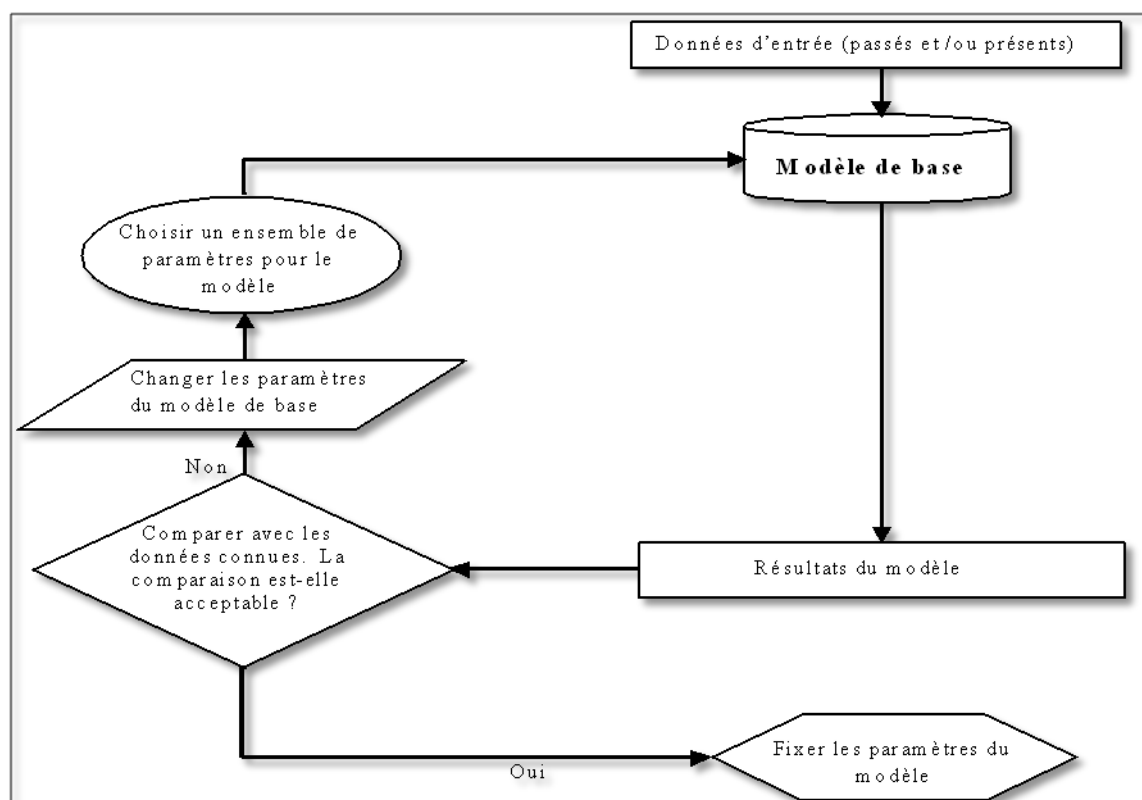


Figure 15: Procédure de calage.

### 3.3.2 Méthodologie du calage

En fonction des types de sols de la zone d'étude et du type de maïs, deux (02) champs ont été retenus pour le calage. Ce sont les parcelles de **Abdoulaye Sanou** (données 2009) et de **Souleymane Sanou 2** (données 2008), situées respectivement en rive droite avec un sol de type HGPE et rive gauche avec un sol de type FLTC (voir figure 11). Les informations agronomiques et relatives à l'irrigation de ces parcelles sont résumées en annexes 2 et 3.

La comparaison des valeurs simulées et observées se fera par calcul d'estimateurs statistiques d'évaluation de la qualité du calage qui sont:

- **Root mean square error (RMSE).**

L'erreur quadratique sur la moyenne un estimateur statistique qui montre comment on peut sous ou surestimer les mesures. Son expression est donnée par:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$$

Avec:

$O_i$ : Valeur observée à la date  $i$

$P_i$ : Valeur simulée à la date  $i$

$n$ : Taille de l'échantillon

Le modèle est d'autant plus robuste que la RMSE est petite (proche de zéro (0))

- **Model efficiency (EF)**

L'efficacité du modèle indique la robustesse du modèle. Si l'efficacité est négative, les résultats de l'observation sont alors meilleurs que ceux de la simulation. Il est exprimé par:

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Avec:

$\bar{O}$ : Moyenne des valeurs observées

Le modèle est d'autant plus robuste que EF est tend vers 1.



- **Goodness of fit ( $R^2$ )**

Le Goodness of fit ( $R^2$ ) permet de voir la qualité de l'ajustement du modèle. Il récapitule sur les anomalies existant entre les valeurs observées et celles simulées.  $R^2$  indique un meilleur accord pour des valeurs voisines de 1. Il est exprimé par:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2$$

### 3.3.2.1 Calage au niveau de la teneur en eau du sol.

Seules les informations morpho-pédologiques fournies par le BUNASOL ont été utilisées pour constituer les dossiers de sol lors des simulations.

Dans le cas du FLTC (parcelle de **Souleymane Sanou**) les caractéristiques fournies par le BUNASOL n'ont pas été modifiées lors de l'opération de calage. Chaque couche a conservé ses teneurs en eau caractéristiques (CC, PF et saturation) et sa conductivité hydraulique à saturation. A défaut d'information, la teneur en eau initiale du profil a été maintenue à la capacité au champ.

Une efficience variant entre 0.6 et 0.8 sera appliquée pour tenir compte des pertes d'eau à travers le système d'irrigation à la raie et faire correspondre les doses d'irrigation aux doses réellement appliquées à la zone racinaire. Aucun paramètre conservatif mentionné dans l'annexe 4 n'a été modifié.

Pour le HGPE (parcelle de **Abdoulaye Sanou**) les mêmes conditions de simulation ont été appliquées par contre avec une variation de la conductivité hydraulique à saturation ( $K_{sat}$ ) en faisant une restriction du profil à la dernière couche, plus conductrice. La profondeur d'enracinement maximale pour les deux champs simulés a été supposée atteinte au début de la sénescence.

### 3.3.2.2 Calage au niveau de la fraction de couverture verte.

AquaCrop utilise le concept Green Canopy Cover (GCC) au lieu de l'indice foliaire LAI pour simuler le développement foliaire. La relation liant ces deux grandeurs est la suivante:

$$CC = 1.005 \times [1 - \exp(-0.6LAI)]^{1.2}$$

$$CC = CC_X - (CC_X - CC_0) \times e^{-GCC \times t}$$

Où:

CC: La fraction de couverture verte

$CC_X$ : Valeur maximale de la fraction de couverture

$CC_0$ : Valeur initiale de la fraction de couverture (dépendant de la densité de semis)

$CGC$ : Coefficient de croissance de la couverture verte

$t$ : Le temps

Les valeurs de  $CC_X$ , et  $CGC$  prescrites dans (Hsiao et al., 2009) ont été maintenues constantes. Seul  $CC_0$  (non conservatif) sera au besoin varié à travers les densités de semis.

### 3.3.2.3 Calage au niveau des rendements.

Le rendement représente le produit de la biomasse finale par l'indice de récolte HI. La valeur de référence  $H_{I0}$  de l'indice de récolte (valeur maximale atteinte par HI dans les meilleures conditions hydriques), supposée constant (48% dans Hsia et al., 2009) mais variable selon les conditions hydriques, sera soumise à un réajustement.

### 3.3.3 Vérification du calage.

#### 3.3.3.1 Principe de la vérification.

Il consiste à fournir des données d'entrée au modèle (autres que ceux ayant servis au calibrage) afin de vérifier en sortie que celui-ci est encore capable de simuler la réalité (passé ou présent).

#### 3.3.3.2 Méthodologie de la vérification

Les données issues d'observation (suivi 2008) des parcelles de **Lassina Sanou SM** (située en rive gauche du Kou sol de type FLTC) et celle de **Adama Sanou** (située en rive droite du Kou sol de type HGPE) ont été utilisées pour réaliser cette étude de validation. Les données culturales et calendriers d'irrigations relatifs à ces champs d'expérimentation sont résumés en annexe 2.

Dans cette phase de vérification les données climatiques et les données du sol sont inchangées. Les parcelles de vérification fourniront en données d'entrée:

- Un nouveau type de maïs (date de semi, cycle végétatif, et autres information)
- Un nouveau calendrier d'irrigation
- Le type de sol auquel il appartient dans la classification du BUNASOL

## IV-RESULTATS

---

### 4.1 RESULTATS DU CALAGE

Les simulations ont été faites en maintenant constants 20 paramètres sur les 21 paramètres conservatifs se trouvant dans la bibliographie d'AquaCrop (Hsiao et al, 2009). Les résultats sont présentés par comparaison des valeurs observées et simulées et par parcelle tout le long du cycle végétatif de la culture:

#### 4.1.1 Parcelle de Abdoulaye Sanou (Profil HGPE, rive droite).

##### 4.1.1.1 Calage au niveau de la teneur en eau.

La simulation s'est réalisée dans les conditions suivantes :

- Le profil (argile intercalé entre deux couches limono-argileuses) prédit par le BUNASOL fut remplacé par la troisième couche du dit profil (plus conductrice).
- La teneur en eau initiale du profil a été supposée à la capacité aux champs,  $\theta_{initial} = CC$ .
- Les doses d'irrigation ont été ajustées pour tenir compte de l'efficacité réelle du système et des erreurs de report d'événement d'irrigation.

Le nuage de point de la **figure 13a** matérialise la confrontation des valeurs observées lors des 12 dates de prise d'échantillons et des valeurs simulées correspondants à ces dates.

La confrontation des valeurs observées et simulées donne un coefficient d'ajustement de **0,76** jugée assez bon. Le nuage est bien repartis de par et d'autre de la première bissectrice (matérialisée par la droite linéaire rouge). Une valeur positive d'efficacité (EF) de **0.44** a été obtenue lors de cette simulation, avec une erreur moyenne quadratique (RMSE) de **22.84 mm**.

La **figure 13b** donne une comparaison graphique de l'évolution de l'eau dans le profil. L'on peut remarquer qu'entre les dates du 13/02/2009 au 03/04/2009, Les teneurs en eau observées (courbe bleue) oscillent avec un écart acceptable autour des valeurs simulées (courbe rouge), par contre à partir du 10/04/2009 l'on remarque une hausse des valeurs observées.

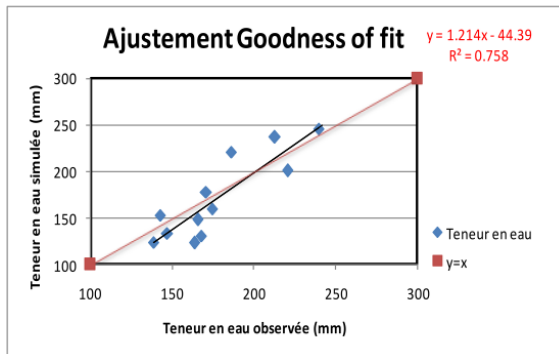


Figure 16a: Qualité de l'ajustement pour la teneur en eau (Abdoulaye Sanou)

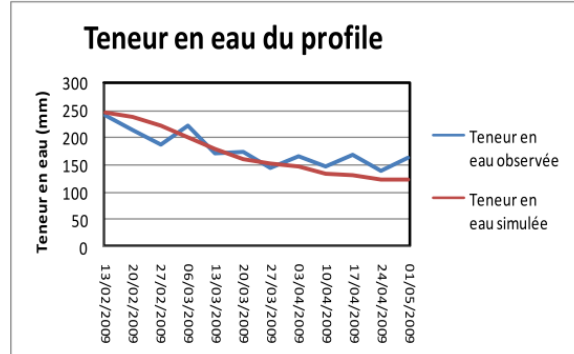


Figure 13b : Comparaison des teneurs eau observées et simulées (Abdoulaye Sanou)

#### 4.1.1.2 Calage au niveau de la fraction de couverture verte.

Au niveau de la fraction de couverture verte le rythme de décroissance a été réglé à la valeur "very slow decline".

L'ajustement (goodness of fit) donne une valeur de **0.88** reflétant une bonne corrélation entre Les couvertures vertes observées et simulées. Six (06) observations sur neuf (09) se retrouvent sur plus ou moins bien alignées sur la première bissectrice (**figure 14a**).

L'on remarque cependant une sous-estimation de la fraction de couverture, matérialisée sur la **figure 2a** par une inclinaison de la droite de tendance vers le bas par rapport à la première bissectrice. Cet état de fait se remarque également à partir du 06/03/2009 sur la **figure 14b**.

L'erreur moyenne quadratique RMSE est de 10.84% et l'efficacité du modèle EF est de  $0.75 > 0$  ce qui signifierait que les résultats de simulation sont meilleurs que ceux des observations. Alors la sous-estimation mise sur le compte du modèle plus haut pourrait donc bien être aussi une surestimation des mesures d'observation de terrain.

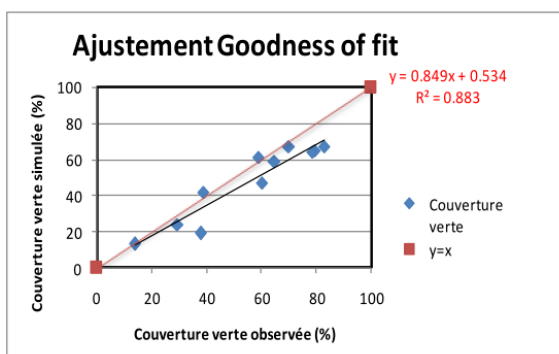


Figure 17a : Qualité de l'ajustement pour la couverture verte (Abdoulaye Sanou)

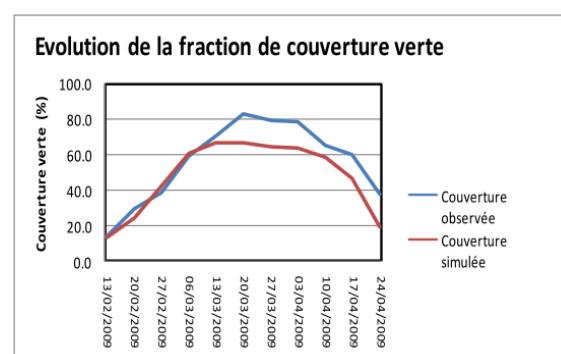


Figure 18b : Comparaison des couvertures vertes observées et simulées (Abdoulaye Sanou)

#### 4.1.1.3 Calage au niveau du rendement.

Conditions de simulation: L'indice de récolte de référence  $H_{Io}$  a été revu à la baisse (à 31%) par rapport à sa valeur prescrite qui est de 48% (Hsiao et al, 2009).

Le rendement observé pour un carré de rendement, de dimension 2m X 2m, réalisé au niveau de la parcelle était de **1.5 kg** soit **3.75 tonnes/ha**. Le modèle, quant à lui, renvoi un rendement de **4.3 tonnes/ha** soit un écart observé de **0.28 tonne/ha**. Une synthèse des résultats de rendement sera faite plus loin pour l'ensemble des parcelles concernant cette étude.

#### 4.1.2 Parcelle de Souleymane Sanou 2 (Profil FLTC, rive gauche)

##### 4.1.2.1 Calage au niveau de la teneur en eau.

La simulation s'est réalisée dans les conditions suivantes :

- Le profil limono-argileux prédit par le BUNASOL a conservé ces propriétés.
- La teneur en eau initiale du profil a été supposée à la capacité aux champs,  $\theta_{initial} = CC$ .
- Les doses d'irrigation ont également été ajustées pour tenir compte de l'efficacité réelle du système et des erreurs de report d'événement d'irrigation.

L'on remarque un assez bon ajustement caractérisé par un coefficient  $R^2 = 0.77$  et un nuage de point bien reparti autour de la première bissectrice (voir **figure 15a**). L'on peut cependant constater une déviation remarquable entre valeurs observée et simulée à la date du 04/04/2008 (**figure 15b**). Une erreur moyenne quadratique de **RMSE=21.5 mm** et une efficacité de **EF=0.7** ont été obtenus.

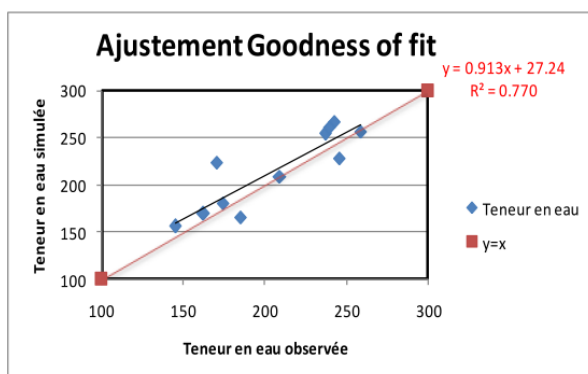


Figure 19a : Qualité de l'ajustement pour la teneur en eau (Souleymane Sanou 2).

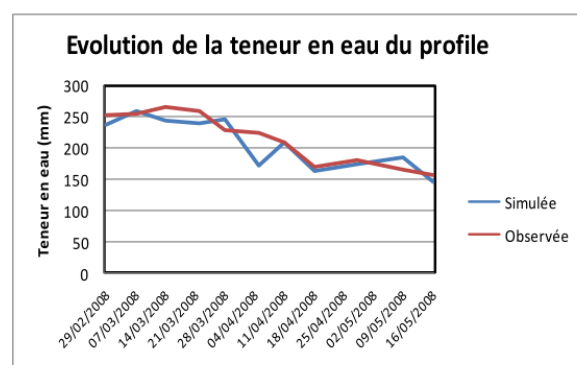


Figure 15b : Comparaison des teneurs eau observées et simulées (Souleymane Sanou 2).

#### 4.1.2.2 Calage au niveau de la fraction de couverture verte.

Au niveau de la fraction de couverture verte le rythme de décroissance a été réglé à la valeur ''very slow decline''.

Les courbes d'évolution de la fraction de couvertures vertes observées et simulées ont quasiment la même allure (**figure 16a**), cela se caractérise également par une droite de régression ayant à peu près la même pente que la première bissectrice. Cependant cette droite de tendance se trouve au dessus de la bissectrice, le modèle semble surestimer la fraction de couverture dans la phase de développement. Le goodness of fit donne une valeur de **0.89** et l'efficacité du modèle est de **EF=0.82** proches de 1.

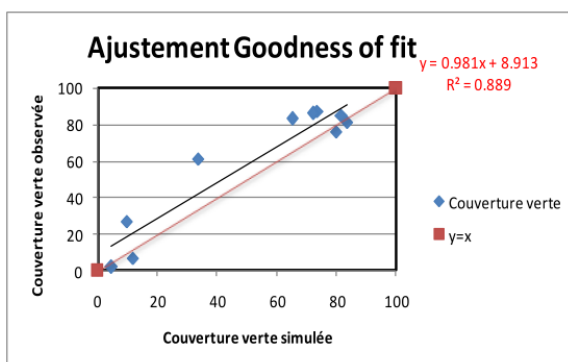


Figure 20a : Qualité de l'ajustement pour la couverture verte (Souleymane Sanou 2).

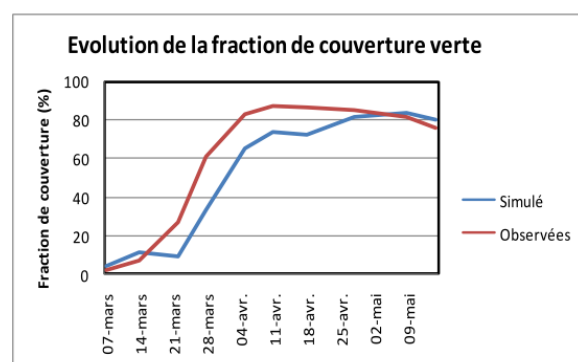


Figure 16b : Comparaison des couvertures vertes observées et simulées (Souleymane Sanou 2).

#### 4.1.2.3 Calage au niveau du rendement.

L'indice de récolte de référence **H<sub>Io</sub>** a été revu à la baisse à **31%** par rapport à sa valeur prescrite qui est de 48% (Hsiao et al, 2009).

Le rendement observé pour un carré de rendement, de dimension 2m X 2m, réalisé au niveau de la parcelle était de **2 kg** soit **5 tonnes/ha**. Le modèle a renvoyé en sortie un rendement de **4.996tonnes/ha** soit un écart observé de **0.004 tonne/ha**, pratiquement négligeable car de l'ordre du kg.

## 4.2 RESULTATS DE VALIDATION DU CALAGE.

Nous avons simulé deux nouveaux cas de maïs avec les deux types de sols rencontrés dans la zone d'expérimentation tout en maintenant constant les conditions de simulation utilisée pour le calage. Les résultats suivant ont été obtenus:

### 4.2.1 Parcelle de Lassina Sanou SM (Rive gauche, sol de type FLTC et voisin de Souleymane Sanou 1).

#### 4.2.1.1 Résultats de validation au niveau de la teneur en eau.

Les figures 17a et 17b montrent un assez bon ajustement de la teneur en eau. La droite de tendance épouse l'allure de la première bissectrice. Avec un changement de calendrier d'irrigation, de date de semis et de cas de maïs la simulation avec le profil FLTC conduite à un coefficient goodness of fit  $R^2=0.74$ , valeur relativement proche de celle obtenue lors du calage avec ce profil. L'erreur moyenne quadratique est RMSE de 9.37mm, nettement inférieur à la valeur obtenue lors du calage. L'efficacité du modèle obtenue, de 0.69, bien que petite que la valeur obtenue lors du calage reste toute fois assez bonne et positive.

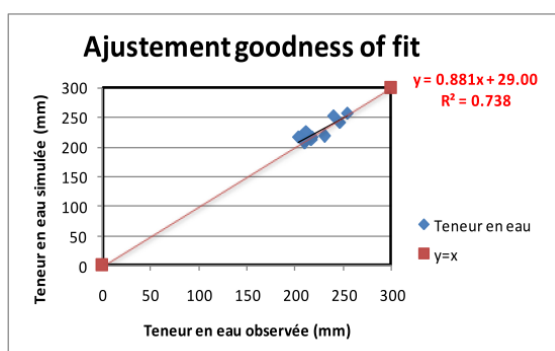


Figure 21a: Qualité de l'ajustement pour la teneur en eau (Lassina Sanou SM)

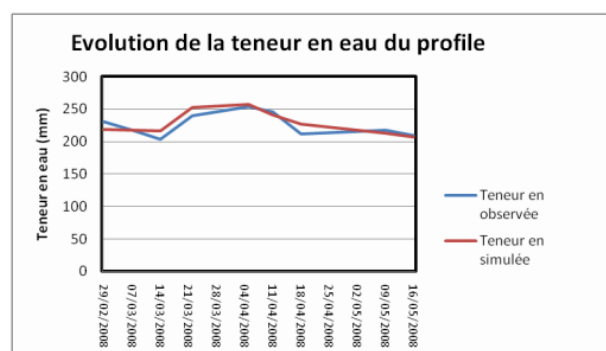


Figure 17b : Comparaison des teneurs en eau observées et simulées (Lassina Sanou SM)

#### 4.2.1.2 Résultats de validation au niveau de la fraction de couverture verte.

Le coefficient d'ajustement de 0.77 obtenu indique à priori une bonne corrélation entre les couvertures vertes simulées et observées. La droite de tendance (figure 18a) bien qu'ayant une pente proche de celle de la première bissectrice, indique de par sa position une sous-estimation de la fraction de couverture verte. Cette sous-estimation est perceptible sur la figure 18b où la courbe de couverture simulée, malgré son allure similaire aux valeurs d'observation, est décalée vers le bas. La RMSE et l'efficacité EF pour cette simulation sont respectivement de 20.11 et de 0.38.

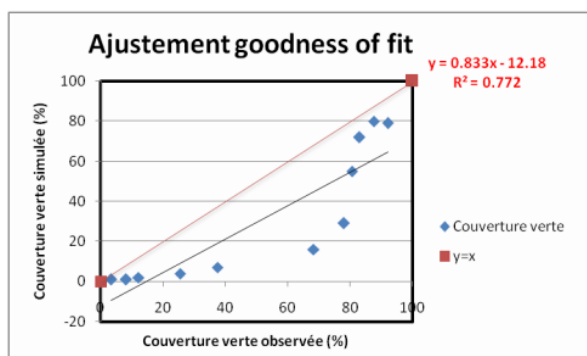


Figure 22a: Qualité de l'ajustement pour la couverture verte (Lassina Sanou SM).

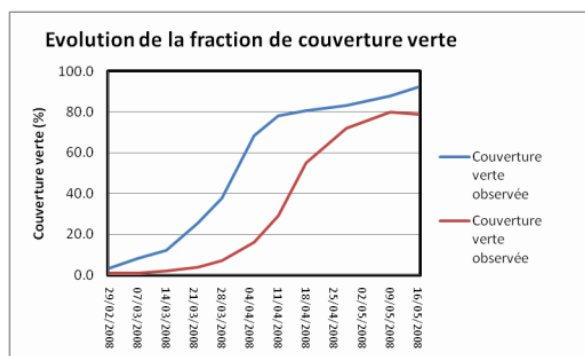


Figure 18b : Comparaison des couvertures vertes observées et simulées (Lassina Sanou SM).

#### 4.2.1.3 Résultats de validation au niveau du rendement.

Le rendement obtenu pour **Sanou Lassina SM** étant non dégrainé (7.5kg/2mx2m), ne sera pas pris en compte dans cette étude. Le modèle a néanmoins renvoyé un rendement de **5.6 tonnes/ha**. Une comparaison de l'ensemble des rendements simulés et observés pour l'ensemble des parcelles sera faite.

#### 4.2.2 Parcelle d'Adama Sanou (rive droite, sol de type HGPE et voisin de Abdoulaye Sanou).

##### 4.2.2.1 Résultats de validation au niveau de la teneur en eau.

Le nuage de point est bien reparti de part et d'autre de la première bissectrice, cependant le coefficient goodness of fit reste faible  $R^2=0.58$  (figure 19a). La figure 19b montre une tendance globalement satisfaisante mais des incohérences sont notées aux dates d'observations **14, 21 et 28 mars 2008**. L'erreur moyenne quadratique et l'efficacité obtenues lors de cette vérification sont respectivement de **16.2 mm** et **0.6**.

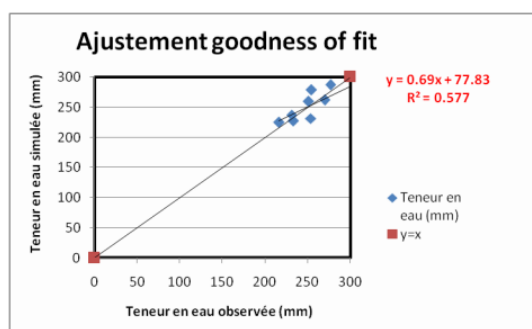


Figure 23a: Qualité de l'ajustement pour la teneur en eau (Adama Sanou).

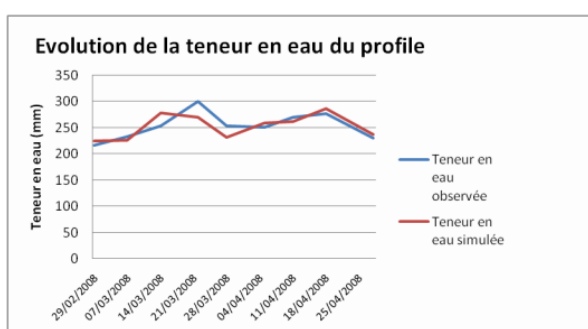


Figure 19b : Comparaison des teneurs en eau observées et simulées (Adama Sanou).



#### 4.2.2.2 Résultats de validation au niveau de la fraction de couverture verte.

Le nuage de point (figure 20a) ne suit pas une forme particulière cet état de fait est caractérisé par un coefficient goodness of fit faible  $R^2=0.44$ . L'erreur moyenne quadratique est la plus élevée  $RMSE=22.9$  et l'obtient une efficacité négative  $EF= -0.1$ . Il est important de souligner que pour ce champ test, l'écart observé entre la date de la première irrigation et la date de semis (13/01/2008) est d'un peu plus d'un (01) mois.

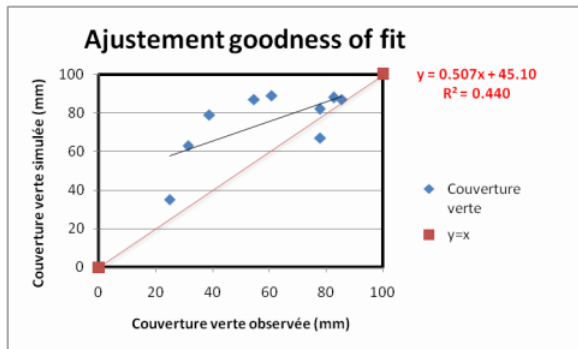


Figure 24a: Qualité de l'ajustement pour la couverture verte (Adama Sanou).

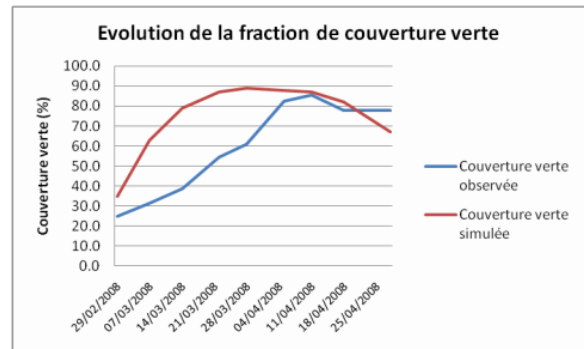


Figure 20b : Comparaison des couvertures vertes observées et simulées (Adama Sanou).

#### 4.2.2.3 Résultats de validation au niveau du rendement.

Le rendement observé pour un carré de rendement, de dimension 2m X 2m, réalisé au niveau de la parcelle de Adama Sanou était de **2 kg** soit **5 tonnes/ha**. Le modèle a renvoyé en sortie un rendement de **6.7tonnes/ha** soit un écart observé de **1.7tonne/ha**.

## V-ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

---

### 5.1 VALIDATION ET CALIBRATION AU NIVEAU DE LA TENEUR EN EAU.

Sur la parcelle d'Abdoulaye Sanou, dont le profil est de type HGPE (Limono-argileux), la simulation de la teneur en eau précision s'est avérée difficile du fait de la couche argileuse que l'on rencontre à 30 cm de profondeur. Cette couche est caractérisée par une basse conductivité hydraulique à saturation, donc un taux de drainage faible, rendant presque impossible l'infiltration.

Afin de contourner les erreurs de détermination de  $K_{sat}$  et de permettre au modèle de mieux approcher les teneurs en eau observées, le profil HGPE a été substitué par sa quatrième couche ayant une conductivité à saturation plus élevée. Bien qu'étant petite l'efficacité positive  $EF=0.44$  obtenue lors de la simulation de ce champ montre que les valeurs observées ne sont pas meilleures que les résultats du modèle. Les sous-estimations de teneurs en eau observées au 03/04/2009 jusqu'à la fin du cycle, contribuant fortement à la RMSE de 22.8 mm ici (voir tableau 6), pourraient être le résultat de remontées de la nappe phréatique (pas pris en charge lors des simulations). Cette sous-estimation pourrait être encore, rares dans notre cas mais à ne pas exclure, des erreurs d'estimation des teneurs en eau observées lors de l'exécution du protocole. Le coefficient d'ajustement goodness of fit de 0.76 obtenu, jugé assez bon, montre que le modèle simule assez bien l'allure de l'évolution de l'eau dans le profil.

Sur la parcelle de Souleymane Sanou 2, profil FLTC (limoneux), en conservant la conductivité hydraulique à saturation obtenue, grâce aux textures fournies par le BUNASOLS, AquaCrop est parvenu à simuler la teneur en eau avec une efficacité assez bonne de 0.69 et un coefficient d'ajustement de 0.77, également jugé assez bon. L'erreur moyenne quadratique, de 21,5 mm, reste dans le même ordre de grandeur que celui du profil HGPE.

La parcelle d'Adama Sanou, dont le profil est de type HGPE, utilisée ici comme une parcelle de vérification des résultats obtenus sur celle d'Abdoulaye Sanou a effectivement révélé une difficulté de simulation de la teneur en eau avec ce profil. Le profil a été également remplacé par sa troisième couche. Les résultats de simulation en termes d'efficacité et d'erreur fournies par le modèle ( $EF=0.55$  et  $RMSE=16.2mm$ ) dans ce deuxième cas de HGPE sont relativement meilleurs comparés à ceux de la parcelle de Abdoulaye Sanou. D'autre part l'ajustement de goodness of fit obtenu ( $R^2=0.44$ ) reflète une faible corrélation des valeurs observées et simulées

en certaines dates d'observation.

Avec une erreur moyenne quadratique  $RMSE=9.4$ , une efficacité  $EF=0.69$  et un coefficient d'ajustement  $R^2=0.74$ , la parcelle de Lassina Sanou SM (profil de type FLTC), en plus de confirmer les résultats obtenus avec le profil FLTC, est celle où la simulation de la teneur en eau est la meilleure de l'ensemble des parcelles simulées.

Dans la procédure de calage, sur les deux profils (HGPE et FLTC), en maintenant 20 paramètres conservatifs à leur valeur prescrite, AquaCrop s'est montré capable de simuler la teneur en eau avec une assez bonne précision (Tableau 6).

Tableau 5 : Erreurs moyennes quadratiques, efficacités du modèle et coefficients d'ajustements obtenus lors des simulations de teneurs en eau.

|                           | Teneur en eau |      |       |
|---------------------------|---------------|------|-------|
| Champs                    | RMSE (mm)     | EF   | $R^2$ |
| <b>Abdoulaye Sanou</b>    | 22.8          | 0.44 | 0.76  |
| <b>Adama Sanou</b>        | 16.2          | 0.55 | 0.58  |
| <b>Souleymane Sanou 2</b> | 21.5          | 0.69 | 0.77  |
| <b>Lassina Sanou SM</b>   | 9.4           | 0.69 | 0.74  |

## 5.2 VALIDATION ET CALIBRATION AU NIVEAU DE LA COUVERTURE VERTE.

Dans la procédure de calage (parcelle d'Abdoulaye et de Souleymane 2), sur l'ensemble des deux profils (HGPE et FLTC), la fraction de couverture vert est simulée avec une bonne précision (voir Tableau 5). Ceci se caractérise par une bonne efficacité  $EF=0.82$ , un bon coefficient d'ajustement  $R=0.89$  sur la parcelle de Souleymane et une efficacité  $EF=0.75$  et un coefficient  $R^2=0.77$ . Les erreurs moyennes quadratiques sont du même ordre de grandeur ( $RMSE=10$ ).

Les résultats de vérification obtenus avec le FLTC sont moins bons que ceux du calage. En effet pour la parcelle de Lassina Sanou, témoin de Souleymane Sanou, la RMSE a doublé et l'efficacité du modèle s'est réduite de moitié. La corrélation entre les allures d'évolution des fractions de couvertures observées et simulées restent néanmoins assez bien corrélées ( $R^2=0.77$ ). Avec le profil FLTC, AquaCrop simule avec une assez bonne précision la couverture verte (avec une efficacité allant de 0.38 à 0.82 et un coefficient d'ajustement allant de 0.77 à 0.89).

L'efficacité négative obtenue en simulant la parcelle d'Adama Sanou (HGPE) témoigne de la mauvaise qualité des valeurs simulées par rapport aux valeurs observées. Il est important de mentionner que l'intervalle de temps observé entre la date de semis et la première date d'irrigation, pour cette parcelle correspond à environ un mois. Dans un contexte de saison sèche, l'obtention d'un tel résultat serait peut-être liée aux difficultés que rencontre le modèle AquaCrop à simuler les cas de stress sévère mentionnés par Lee et al., 2009.

Tableau 6 : Erreurs moyennes quadratiques, efficacités du modèle et coefficients d'ajustements obtenus lors des simulations de couvertures vertes.

|                           | Couverture verte |       |                |
|---------------------------|------------------|-------|----------------|
| Champs                    | RMSE             | EF    | R <sup>2</sup> |
| <b>Abdoulaye Sanou</b>    | 10.8             | 0.75  | 0.77           |
| <b>Adama Sanou</b>        | 22.9             | -0.09 | 0.44           |
| <b>Souleymane Sanou 2</b> | 12.8             | 0.82  | 0.89           |
| <b>Lassina Sanou</b>      | 20.1             | 0.38  | 0.77           |

### 5.3 VALIDATION ET CALIBRATION AU NIVEAU DU RENDEMENT.

Le faible nombre de données de rendement (03) observations, ne nous permet pas de réaliser une analyse de régression objective entre nos simulations et les observations de rendements. En toute rigueur, il aurait fallu pour ce type d'analyse, un nombre appréciable de données.

Toutefois, en comparant nos données simulées de rendement avec les données observées de rendement, nous constatons que le nuage se situe au-dessus de la première bissectrice (voir Figure 21).

Il serait cependant risqué sur la base de ces observations de conclure sur le fait que le modèle aurait tendance à surestimer les rendements (bien que ce soit constat qui se dégage de la Figure 21) ; une fois de plus, Il faudrait encore plus de points d'observations pour pouvoir se prononcer de façon objective sur les rendements.

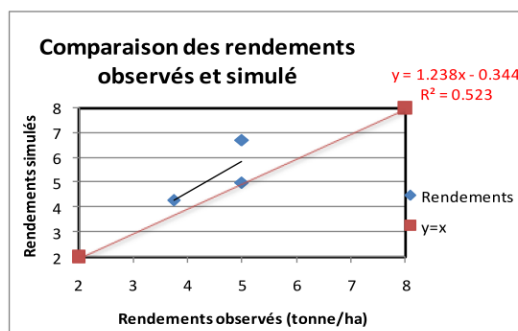


Figure 25: Comparaison des rendements observés et simulés.

## **VI-CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.**

---

Aux termes de cette étude de validation et de calibration d'AquaCrop pour évaluer les activités hydro agricoles au niveau de la parcelle, nous pouvons retenir qu'avec 20 paramètres conservatifs maintenus constants, le modèle AquaCrop s'est montré capable de simuler avec une précision assez bonne, la fraction de couverture verte, la teneur en eau et le rendement pour les sols Ferrugineux Tropicaux Lessivés à Taches et Concrétions (FLTC). La calibration du modèle pour les champs se trouvant sur le second profil retrouvé dans la zone d'étude (à savoir sols Hydromorphes Peu humifères à pseudoGley d'Ensemble) s'avère complexe du fait du pourcentage d'argile très élevé dans ces sols. Néanmoins une étude locale sur la parcelle pourrait révéler les conductivités à saturation réelles de ces sols en vue d'une calibration plus précise pour ce type de sol. Le modèle s'est montré incapable de simuler les stress hydriques sévères survenus sur la parcelle d'Adama Sanou durant la phase de croissance.

## **VII-BIBLIOGRAPHIE.**

---

### **Ouvrages et articles**

- Anne V. (2008), Outils de mesure de l'humidité du sol : comparaison
- Dirk R. et al. (2009), AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: Main Algorithms and Software Description.
- Dirk R. et al. (2010), Chapter 1 AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water.
- Dirk R. et al (2010), Chapter 2, Users guide.
- Dirk R. (2010), Chapter 3, Calculation procedures.
- Dirk RAES. (2010), Annexes, Reference Manuel, 50p.
- GEeau (2004), Rapport annuel N°3, 183 p.
- Grid Numéro 26 (2007), Le magazine du réseau de l'IPTRID.
- Wellens J. (2007), Etude de compatibilité et sensibilité des paramètres de sol mesurés et bibliographiques du logiciel BUDGET.
- Wellens J. (2007), Le périmètre irrigué de la Vallée du Kou : Diagnostic des efficacités hydro-agricole & élaboration des calendriers d'irrigation à l'aide de SIMIS (étude de cas).
- Lee K. (2009), Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize.
- Mariama S. (2008), Analyse de la sensibilité du logiciel BUDGET pour l'évaluation et la gestion de l'irrigation au niveau de la parcelle.
- Steduto P. (2009), AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles.
- Rapport Technique N°126 du BUNASOL (2002), Etude morpho-pédologique des provinces du Houet et du Tuy.
- Sam G. (2003), Analyse des risques, amélioration des rendements et validation du modèle du bilan d'eau BUDGET pour l'agriculture pluviale dans le Sud-ouest du Burkina Faso.
- Saxton et al. (1986), Estimating generalized soil–water characteristics from texture.
- Version 1.43 (March 2010), The ImageJ User Guide.
- Hsiao et al. (2009), AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize.

## **VIII-ANNEXES**

---

Annexe 1 : Synthèse de résultats de traitement des photos de couvertures verts.

Annexe 2 : calendriers d'irrigation

Annexe 3 : Information informations culturelles.

Annexe 4. Paramètres conservatifs rencontrés dans la littérature (Hsiao et al., 2009)

**Annexe 1 : Synthèse de résultats de traitement des photos de couverture vert.**

| 2008           |                           |         |          |          | 2009           |                           |
|----------------|---------------------------|---------|----------|----------|----------------|---------------------------|
|                | Couverture verte_2008 (%) |         |          |          |                | Couverture verte_2009 (%) |
| Date du cliché | Adama                     | Lassina | Souley 1 | Souley 2 | Date du cliché | Abdoulaye                 |
| 29/02/2008     | 24.9                      | 3.3     |          |          | 13/02/2009     | 13.98                     |
| 07/03/2008     | 31.4                      | 8.1     | 2.4      | 4.5      | 20/02/2009     | 29.34                     |
| 14/03/2008     | 38.9                      | 12.1    | 6.5      | 11.6     | 27/02/2009     | 38.62                     |
| 22/03/2008     | 54.6                      | 25.5    | 14.0     | 9.7      | 06/03/2009     | 58.9                      |
| 28/03/2008     | 60.9                      | 37.4    | 22.1     | 33.6     | 13/03/2009     | 70                        |
| 05/04/2008     | 82.7                      | 68.3    | 41.2     | 65.2     | 20/03/2009     | 82.9                      |
| 11/04/2008     | 85.6                      | 78.0    | 65.6     | 73.6     | 27/03/2009     | 79.4                      |
| 18/04/2008     | 77.8                      | 80.6    | 85.9     | 72.2     | 03/04/2009     | 78.6                      |
| 28/04/2008     | 77.9                      | 83.0    | 91.0     | 81.7     | 10/04/2009     | 64.8                      |
| 09/05/2008     |                           | 87.6    | 87.8     | 83.6     | 17/04/2009     | 60.2                      |
| 16/05/2008     |                           | 92.1    | 90.5     | 79.8     | 24/04/2009     | 37.9                      |



Annexe 2 : calendriers d'irrigation

| Adama           |            |           | Lassina SM      |            |           |
|-----------------|------------|-----------|-----------------|------------|-----------|
| Date de semis   | 13/01/2008 |           | Date de semis   | 12/02/2008 |           |
| Superficie (ha) | 0.5        |           | Superficie (ha) | 0.5        |           |
| Débit (l/s)     | 9          |           | Débit (l/s)     | 8          |           |
| Date            | Durée (h)  | Dose (mm) | Date            | Durée (h)  | Dose (mm) |
| 13/01/2008      | 11         | 65.0      | 23/02/2008      | 4          | 23.0      |
| 11/02/2008      | 8          | 47.0      | 02/03/2008      | 3          | 17.0      |
| 02/03/2008      | 8          | 47.0      | 21/03/2008      | 9          | 51.0      |
| 09/03/2008      | 8          | 47.0      | 01/04/2008      | 8          | 46.0      |
| 14/03/2008      | 8          | 47.0      | 14/04/2008      | 3          | 17.0      |
| 22/03/2008      | 8          | 47.0      | 28/04/2008      | 10         | 57.0      |
| 29/03/2008      | 5          | 28.0      | 06/05/2008      | 6          | 34.0      |
| 03/04/2008      | 5          | 28.0      | 15/05/2008      | 4          | 23.0      |
| 07/04/2008      | 5          | 28.0      |                 |            |           |
| 12/04/2008      | 5          | 28.0      |                 |            |           |
| 16/04/2008      | 5          | 28.0      |                 |            |           |

| Souleymane 2    |            |           | Abdoulaye       |            |           |
|-----------------|------------|-----------|-----------------|------------|-----------|
| Date de semis   | 21/02/2008 |           | Date de semis   | 02/01/2009 |           |
| Superficie (ha) | 0.5        |           | Superficie (ha) | 0.25       |           |
| Débit (l/s)     | 5          |           | Débit (l/s)     | 4          |           |
| Date            | Durée (h)  | Dose (mm) | Date            | Durée (h)  | Dose (mm) |
| 21/02/2008      | 4          | 22.0      | 11/02/2009      | 2          | 11.0      |
| 05/03/2008      | 4          | 22.0      | 24/02/2009      | 2          | 11.0      |
| 13/03/2008      | 4          | 22.0      | 30/02/2009      | 2          | 11.0      |
| 21/03/2008      | 4          | 22.0      | 08/03/2009      | 2          | 11.0      |
| 29/03/2008      | 4          | 22.0      | 18/03/2009      | 2          | 11.0      |
| 04/04/2008      | 4          | 22.0      | 28/03/2009      | 2          | 11.0      |
| 11/04/2008      | 4          | 22.0      | 01/04/2009      | 2          | 11.0      |
| 24/04/2008      | 4          | 22.0      | 07/04/2009      | 2          | 11.0      |
| 28/04/2008      | 4          | 22.0      | 16/04/2009      | 2          | 11.0      |
| 06/05/2008      |            | 22.0      |                 |            |           |

Annexe 3 : Informations culturelles.

| Année                                      | 2008       |            |              | 2009       |
|--------------------------------------------|------------|------------|--------------|------------|
| Parcelle                                   | Adama      | Lassina SM | Souleymane 2 | Abdoulaye  |
| Superficie (ha)                            | 0.5        | 0.5        | 0.5          | 0.25       |
| Date de semis                              | 13/01/2008 | 12/02/2008 | 21/02/2008   | 02/01/2009 |
| Date de récolte                            | 01/05/2008 | 07/06/2008 | 25/05/2008   | 01/05/2009 |
| Durée du cycle (jour)                      | 110        | 117        | 95           | 120        |
|                                            |            |            |              |            |
| Densité de semis (plantes/m <sup>2</sup> ) | 7.5        | 7.5        | 7.5          | 8          |
|                                            |            |            |              |            |
| Emergence (DAP)                            | 8          | 15         | 6            | 8          |
| Temps pour atteindre la couverture max     | 77         | 90         | 54           | 90         |
| Sénescence (DAP)                           | 87         | 29         | 79           | 100        |
| Maturité (DAP)                             | 110        | 117        | 95           | 120        |
|                                            |            |            |              |            |
| Début floraison (DAP)                      | 69         | 97         | 40           | 70         |
| Durée de floraison (jour)                  | 16         | 75         | 28           | 39         |
|                                            |            |            |              |            |
| Profondeur d'enracinement (m)              | 0.9        | 0.9        | 0.9          | 0.9        |

**Annexe 4. Paramètres conservatifs rencontrés dans la littérature (Hsiao et al., 2009)**

| Description                                                              | Value | Units or meaning                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>Conservative (generally applicable)</b>                               |       |                                                                        |
| Base temperature                                                         | 8     | °C                                                                     |
| Cut-off temperature                                                      | 30    | °C                                                                     |
| Canopy cover per seedling at 90% emergence (cco)                         | 6.5   | cm <sup>2</sup>                                                        |
| Canopy growth coefficient (CGC)                                          | 1.30% | increase in CC relative to existing CC per GDD†                        |
| Maximum canopy cover (CCx)                                               |       | function of plant density                                              |
| Crop coefficient for transpiration at CC = 100%                          | 1.03  | full canopy transpiration relative to ETo                              |
| Decline in crop coef. after reaching CCx                                 | 0.30% | decline per day due to leaf aging                                      |
| Canopy decline coefficient (CDC) at senescence                           | 1.06% | decrease in CC relative to CCx per GDD                                 |
| Water productivity, normalized to year 2000 (WP*)                        | 33.7  | gm (biomass) m <sup>-2</sup> , function of atmospheric CO <sub>2</sub> |
| Leaf growth threshold (pupper)                                           | 0.14  | as fraction of TAW, above this leaf growth is inhibited                |
| Leaf growth threshold (plower)                                           | 0.72  | leaf growth stops completely at this p                                 |
| Leaf growth stress coefficient curve shape                               | 2.9   | moderately convex curve                                                |
| Stomatal conductance threshold (pupper)                                  | 0.69  | above this stomata begin to close                                      |
| Stomata stress coefficient curve shape                                   | 6     | highly convex curve                                                    |
| Senescence stress coefficient (pupper)                                   | 0.69  | above this early canopy senescence begins                              |
| Senescence stress coefficient curve shape                                | 2.7   | moderately convex curve                                                |
| <b>Considered to be conservative but can or may be cultivar-specific</b> |       |                                                                        |
| Reference harvest index (HIo)                                            | 48%   | common for good conditions                                             |
| GDD from 90% emergence to start of anthesis                              | 800   | would be earlier for short season cultivars                            |
| Duration of anthesis, in GDD                                             | 190   |                                                                        |
| Coefficient, inhibition of leaf growth on HI                             | 7     | HI increased by inhibition of leaf growth at anthesis                  |
| Coefficient, inhibition of stomata on HI                                 | 3     | HI reduced by inhibition of stomata at anthesis                        |