

Simulation du rendement en maïs grain à Lubumbashi, République Démocratique du Congo

Auteur : Banza Mukalay, John

Promoteur(s) : Tychon, Bernard

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10090>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative" (BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCLouvain - Faculté des Bioingénieurs

Simulation du rendement en maïs grain à Lubumbashi, République Démocratique du Congo

John BANZA MUKALAY

**MEMOIRE REDIGÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES PAYS EN
DÉVELOPPEMENT**

FILIÈRE : EAU ET SOL

ANNÉE ACADEMIQUE 2019-2020

PROMOTEUR Pr Bernard TYCHON (Université de Liège, Campus Arlon, Belgique)

COMITÉ DE LECTURE :

Pr Charles BIELDERS (Université Catholique de Louvain, Faculté des Bioingénieurs, Belgique)

Pr Gilles COLINET (Université de Liège, Campus Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique)

©Copyright : « Toute reproduction du présent document, par quelques procédés que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège et de l'Université Catholique de Louvain. * L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULg et/ou de l'UCL ».

"Le présent document n'engage que son auteur."

Auteur du présent document : **John BANZA MUKALAY**

e-mail de l'auteur : mukalayjohn@gmail.com

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCLouvain - Faculté des Bioingénieurs

Simulation du rendement en maïs grain à Lubumbashi, République Démocratique du Congo

John BANZA MUKALAY

**MEMOIRE REDIGÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES PAYS EN
DÉVELOPPEMENT**

FILIÈRE : EAU ET SOL

ANNÉE ACADEMIQUE 2019-2020

PROMOTEUR Pr Bernard TYCHON (Université de Liège, Campus d'Arlon, Belgique)

COMITÉ DE LECTURE :

Pr Charles BIELDERS (Université Catholique de Louvain, Faculté des Bioingénieurs, Belgique)

Pr Gilles COLINET (Université de Liège, Campus Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique)

Dédicace

Au Professeur **Emery KASONGO LENGE MUKONZO**, d'avoir réveillé en moi le goût de la recherche.

Remerciements

Ce document est le fruit d'un travail qui n'aurait été possible sans l'intervention de plusieurs personnes que je souhaite remercier vivement :

- A l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur - Commission de la Coopération au Développement (ARES-CCD) de la Belgique, pour m'avoir octroyé la bourse de Master de Spécialisation en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les Pays En Développement ;
- Au **Pr Bernard TYCHON**, promoteur de ce mémoire de Master, pour avoir accepté de diriger cette étude et d'avoir couvert les dépenses allouées à la collète des données. Et pour sa rigueur scientifique, sa disponibilité et son accueil, qu'il trouve ici le mérite et l'expression de notre profonde gratitude ;
- Aux **Pr Bernard TYCHON, Charles BIELDERS et Gilles COLINET**, Coordonnateurs du Master de Spécialisation en Sciences et Gestion de l'Environnement dans les PED qui, malgré la situation sanitaire (COVID-19) qui terrifie le monde ont fourni autant d'effort pour que la formation se déroule correctement ;
- Au **Dr Antoine DENIS**, Assistant du Master, pour les conseils et orientations ;
- A l'**Université de Liège** et l'**Université Catholique de Louvain**, notamment tout le corps enseignant de ce Master, pour cette formation de haute qualité ;
- Au **Pr Emery KASONGO LENGE MUKONZO**, pour les encouragements, le soutien et conseils qui me forgent ;
- Aux **Pr Yannick USENI SIKUZANI et Michel MAZINGA KWEY** pour leurs conseils et remarques constructifs ;
- Au **CT Deo MWAMBA MULOY**, pour sa collaboration dans la récolte des données ;
- A **Ir Guylain YUMBA KABANGE et Mr Huguette NGOIE ILUNGA BANZA**, pour leur hospitalité et prière ;
- A mes parents **Jules MBUYU KINEKINDA et Llyl ILUNGA WA KAYUMBA**, pour leurs amour et contributions spirituel ;
- A mes frères et sœurs, ma reconnaissance est très grande envers vous ;
- A **Franck KANYENGA**, l'ami de lutte, pour le soutien moral.

Je ne saurais pas terminer sans exprimer ma profonde gratitude aux compagnons de la promotion (année 2019-2020), notamment : Nancy Ines, Richesse, Khadidiatou, Bella, Sarindranavalona, Abdou, Oumarou, Sessou, Kocou, Enrico et Habumugisha.

Résumé

Face à l'insécurité alimentaire et la démographie galopante, la production agricole doit augmenter de manière significative pour combler les besoins alimentaires des populations. Le recours aux modèles de prédition de rendement agricole à l'échelle locale ou nationale constitue actuellement une stratégie et garantie pour la sécurité alimentaire. Dans cette étude, le modèle AquaCrop de la FAO a été utilisé pour simuler le rendement en maïs grain dans le contexte agroécologique de Lubumbashi, République Démocratique du Congo. Il s'agit d'un modèle basé sur la productivité eau-sol-plante nécessitant des données météorologiques, culturelles et de sol. L'étude a été menée à la ferme Ubuntu pour la campagne agricole 2016-2017. Les données climatiques de la base des données satellitaires de la NASA, les fonctions de pédotransfert (FPT) pour les données manquantes du sol et les données de trois variétés de maïs réparties dans 7 blocs ont été utilisées dans le modèle. L'indice de végétation NDVI a été effectué pour apprécier la couverture végétale des blocs.

Les résultats montrent, sur la description climatique du site pour les années 2016 et 2017, des valeurs qui sont restées dans la gamme enregistrée dans la région de Lubumbashi pour toutes les variables observées. L'évaporation de référence montre une moyenne de 6,35 mm/jour au cours des années 2016 et 2017 avec un maximum de 8,73 mm/jour et un minimum de 1,29 mm/jour. Néanmoins, aucun stress hydrique n'a été observé sur les plantes au cours de la culture. Les rendements en maïs grains dans le site ont varié entre 4,1 et 9,73 t/ha. Le bloc F avec la variété SC719 a donné le rendement le plus élevé et le bloc I avec la variété PAN 53 le plus faible. Ces rendements augmentent relativement avec la teneur en matière organique du sol. Les résultats de FPT révèlent une densité apparente des sols variant entre 1,42 et 1,58 g/cm³ et la réserve en eau utile entre 1,06 à 1,57 mm/cm dans les blocs. L'analyse de NDVI a révélé la couverture végétale de chaque bloc au cours de la culture. La fonction logarithmique de stress de fertilité développée en fonction de la matière organique montre, un coefficient de corrélation faible ce qui implique une étude expérimentale ultérieure qui permettrait mieux de clarifier cette observation. Les résultats des simulations des rendements en maïs grain avec AquaCrop montrent des valeurs très proches entre les rendements mesurés et simulés ($R^2 = 0,94$ et l'erreur moyenne de prédition $Pe = 14\%$). Les rendements potentiels varient entre 13,17 et 14,6 t/ha. Le stress de fertilité de sol est à la base des faibles rendements obtenus.

Cette étude constitue une approche robuste pour accroître le rendement et pour optimiser les stratégies des gestions des champs à l'échelle locale ou nationale.

Mots-clés : AquaCrop, maïs (*Zea mays* L.), prévision de rendement, NDVI, Lubumbashi

Abstract

Because of food insecurity and increasing demography, agricultural production must significantly increase to meet the food needs of the populations. The use of models for predicting agricultural yields at the local or regional scale is currently a strategy and guarantee for food security. In this study, the FAO AquaCrop model was used to simulate maize grain yield in the agroecological context of Lubumbashi, Democratic Republic of Congo. The used model is based on water-soil-plant productivity requiring climatic, crop, and soil data. The study was conducted at the Ubuntu farm during the cropping year 2016-2017. Climatic data from NASA satellite database, Pedotransfer Functions (FPT) for missing soil data and data from three varieties of maize distributed in 7 blocks were used in the model. The NDVI vegetation index was carried out to assess the vegetation cover of the blocks.

The results showed that values for all climatic variables from 2016-2017 were in the ranges of usually recorded values in Lubumbashi. The average reference evaporation was 6.35 mm/day with a maximum of 8.73 mm/day and a minimum of 1.29 mm/day. No water stress was observed on the plants during cultivation. The maize grain yields at the site varied between 4.1 and 9.73 t/ha. Block F with variety SC719 had the highest yield while block I with variety PAN 53 had the lowest. These yields increase relatively with the organic matter content of the soil. The FPT results revealed a soil bulk density of 1.42 -1.58 g/cm³ and the useful water reserve of 1.06- 1.57 mm/cm in the blocks. NDVI analysis revealed the vegetation cover of each block during cultivation. The logarithmic function of fertility stress developed as a function of organic matter showed a low correlation coefficient, implying that a subsequent experimental study is necessary to clarify this observation. The results of simulations of maize grain yield with AquaCrop showed very close values between the measured and simulated yields ($R^2 = 0.94$ and the mean prediction error $Pe = 14\%$). Potential yields varied between 13.17 and 14.6 t/ha. Observed low yields were mainly caused by soil fertility stress.

This study constitutes a robust approach to increase yield and to optimize field management strategies at the local or regional scale.

Keywords: AquaCrop, maize, yield forecast, NDVI, Lubumbashi

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements	II
Résumé	III
Abstract	IV
Table des matières	V
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des abréviations	X
Introduction	1
Chapitre 1. Revue de littérature	3
1.1. Généralité sur la culture du maïs	3
1.1.1. Origine, diffusion et aire de la culture	3
1.1.2. Taxonomie du maïs	3
1.1.3. Description botanique du maïs	3
1.1.4. Ecologie du maïs	4
1.1.5. Techniques culturales	5
1.1.6. Maladies et ravageurs	5
1.1.7. Récoltes et rendements	7
1.1.8. Contrainte de la production du maïs dans la province du Haut-Katanga, R.D.C	7
1.2. Généralités sur les modèles de prédition des cultures	7
1.2.2. Importance des modèles de simulation de culture	8
1.3. Présentation du modèle AquaCrop	8
1.2.2. Fonctionnement du modèle AQUACROP	10
1.2.3. Évaluation du modèle d'AquaCrop	16
Chapitre 2. Milieu, matériel et méthode	18
2.1. Milieu	18
2.1.1. Conditions climatiques	18
2.1.2. La végétation	20
2.1.3. Couverture pédologique	21
2.2. Matériel et méthode	22
2.2.1. Collecte des données climatiques	22
2.2.3. Conduite de la culture dans la ferme	22

2.2.4. Détermination de l'évapotranspiration de référence	23
2.2.3. Calcul de la réserve en eau utile du sol	24
2.2.4. Calcul de l'indice de végétation NDVI	26
2.2.5. Simulation des rendements avec AquaCrop	27
2.2.5.1. Calibrage du modèle	27
Chapitre 3. Résultats	30
3.1. Variation des paramètres climatiques dans le site	30
3.2. Variation de l'évapotranspiration de référence	32
3.3. Rendement en maïs grain	33
3.4. Variation de la densité apparente et la teneur en eau des sols étudiés	34
3.5. Indice de végétation NDVI dans le site	35
3.6. Évaluation du stress de fertilité	36
3.5. Évaluation du stress hydrique au cours de la culture	37
3.6. Simulation de rendement avec AquaCrop	38
Chapitre 4. Discussion des résultats	40
4.1. Analyse des performances du modèle AquaCrop	40
4.2. Variation de l'évapotranspiration de référence et de stress hydrique	41
4.3. Rendement en maïs grain dans le site d'étude	42
3.4. Variation de la densité et de la teneur en eau du sol dans le site	43
3.5. Indice de végétation NDVI dans le site	44
3.6. Évaluation du stress de fertilité au cours de la culture	44
3.5. Simulation de rendement avec AquaCrop	45
Conclusion	47
Références	49
Annexe	72

Liste des figures

Figure 1. Interface (menu) du modèle AquaCrop.	9
Figure 2. Données d'entrée du modèle AquaCrop (Raes et al., 2012).	10
Figure 3. Schéma de calcul du modèle AquaCrop montrant (en flèches pointillés) les systèmes impactés par le stress hydrique (a, b, c, d et e).	11
Figure 4. Zone racinaire comme un réservoir montrant les flux à ses frontières affectant (Raes et al., 2012).	12
Figure 5. Dynamique de la couverture de la canopée verte (CC) via le cycle de croissance dans les conditions optimales.	13
Figure 6. Simulation de la couverture de la canopée verte (CC) dans les conditions de stress en eau pendant le cycle de la culture en comparaison avec développement de la canopée sans stress (CCpot).	13
Figure 7. Simulations de l'épuisement en eau de la zone racinaire (Dr), de la couverture de la canopée verte (CC) et de la transpiration de la culture (Tr) pendant le cycle de la culture.	14
Figure 8. Relation entre la biomasse au-dessus du sol et le total d'eau transpirée par des cultures de type C3 et C4 après normalisation avec le CO ₂ et ETo.	15
Figure 9. Croissance de l'indice de récolte dès la floraison jusqu'à la maturité.	16
Figure 10. Location du site d'étude, ferme Ubuntu à Lubumbashi dans la province du Haut-Katanga.	18
Figure 11. Période de croissance des cultures à Lubumbashi.	19
Figure 12. Carte de végétation et occupation du sol de la province du Haut-Katanga.	21
Figure 13. Variation de la température au cours de l'année 2016 et 2017 dans le site d'étude.	30
Figure 14. Distribution de la précipitation au cours de l'année 2016 et 2017 dans le site d'étude.	31
Figure 15. Variation de rayonnement solaire au cours de l'année 2016 et 2017 dans le site.	31
Figure 16. Évolution de l'évapotranspiration potentielle au cours de l'année 2016 et 2017 dans le site.	32
Figure 17. Rendements en grains de maïs pluvial réalisé dans la ferme Ubuntu pendant la campagne agricole 2016-2017.	33
Figure 18. Rendement observé en fonction de la fertilité naturelle du sol dans les différents blocs de maïs à la ferme Ubuntu, Lubumbashi pour la saison culturelle 2016-2017.	34
Figure 19. Valeur de l'indice de végétation NDVI dans la zone d'étude.	35

Figure 20. Relation entre le stress de fertilité et la teneur en matière organique _____ 37

Figure 21. Simulation de l'évolution de la transpiration (Tr), de la couverture de la canopée (CC) et de l'épuisement de la zone racinaire (Dr) au cours de la culture du maïs._____ 38

Figure 22. Relation entre le rendement en grain de maïs mesuré et simulé pour tous les blocs combinés._____ 39

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques agronomiques de trois variétés de maïs utilisées dans la ferme. _____	23
Tableau 2. Dates des semis et récoltes dans les blocs de maïs à la ferme Ubuntu, campagne culture 2016-2017. _____	23
Tableau 3. Valeurs des coefficients entrants dans le calcul de la teneur en eau du sol. _____	25
Tableau 4. Propriétés physicochimiques des sols dans les blocs de maïs à la ferme Ubuntu. _____	26
Tableau 5. Données d'entrée des paramètres de culture utilisés dans le modèle AquaCrop. _____	28
Tableau 6. Variation de la densité et de la teneur en eau volumique du sol dans les blocs de maïs. _____	34
Tableau 7. Variation du rendement de maïs grain dans les blocs en fonction des niveaux de stress. Mat. Org : Matière organique et Rdt : Rendement. _____	36
Tableau 8. Rendement en maïs grain mesuré, simulé et potentiel dans le site d'étude durant la campagne agricole 2016-2017. _____	39

Liste des abréviations

- CC** : Couverture de canopée verte,
- CC₀** : Couverture initiale de la canopée,
- CC_p** : Couverture potentielle de canopée,
- CC_x** : Couverture maximale de la canopée,
- CDC** : Coefficient de déclin de canopée,
- CGC** : Coefficient de croissance de canopée,
- T_{max}** : Température maximale
- T_{min}** : Température minimale
- T_{moy}** : Température moyenne
- ET₀** : évapotranspiration de référence,
- FAO** : Food and Agriculture Organization,
- Hi** : Indice de récolte,
- K_cb** : Coefficient de culture,
- K_s** : Coefficient de stress,
- NASA** : National Aeronautics and Space Administration,
- NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index,
- Pe** : Erreur de prédiction,
- R.D.C** : République Démocratique du Congo,
- RU** : Reserve en eau utile,
- R²** : Coefficient de détermination,
- SENASEM** : Service National des Semences,
- Tr** : Transpiration de la culture,
- WP** : Productivité de l'eau,
- WP*** : Productivité de l'eau pour une culture normalisée,
- θ₃₃ kPa ou FC** : Eau à la capacité au champ,
- θ₁₅₀₀ kPa ou PWP** : Eau au point de flétrissement

Introduction

L'insécurité alimentaire est un problème alarmant dans des nombreux pays moins développés et empêche notamment le développement socio-économique (Rossi et *al.*, 2006 ; Doocy et *al.*, 2017 ; Doocy et *al.*, 2019 ; Carney & Krause, 2020 ; Cooper et *al.*, 2020 ; Hayes et *al.*, 2020 ; Masa et *al.*, 2020 ; Proffitt Leyva et *al.*, 2020 ; Savari et *al.*, 2020). En République Démocratique du Congo, l'agriculture contribue à l'économie nationale en employant plus de 70 % de la population, bien que contribuant faiblement au produit intérieur brut (Mulimbi et *al.*, 2019 ; Badibanga & Ulimwengu, 2020). La production agricole reste faible avec des rendements agricoles inférieurs aux potentiels des cultures. Parmi les cultures vivrières, le maïs occupe la troisième place après le manioc et les bananes plantains (Faostat, 2018). Cependant, la production vivrière est insuffisante au point que le pays doit recourir à l'importation. Dans la province du Haut-Katanga, la grande production de maïs est consommée sous forme de farine et constitue une denrée privilégiée par la quasi-totalité de sa population (Nyembo, 2010). Son rendement varie d'une région à l'autre. Adrille, (2003) a trouvé, dans le milieu paysan, le rendement moyen flottant entre 800 et 1000 kg/ha ; 3000 à 4000 kg/ha dans les grandes exploitations agricoles et 6000 à 8000 kg/ha dans les stations de recherche. Par contre l'inspection provinciale de l'agriculture évalue le rendement moyen en maïs grain à 650-1000 Kg/ha dans les milieux paysans et de 3000-5000 kg/ha dans les grandes exploitations (SENASEM, 2008). Pourtant, la production agricole est dominée par une agriculture paysanne (Kasongo, 2008) et plusieurs facteurs sont au centre de faible rendement obtenu, notamment la pauvreté des sols, manques des techniques et pratiques agricoles adéquates, mauvaise politique agricole (Bangata et *al.*, 2013 ; Kasongo et *al.*, 2013 ; Banza et *al.*, 2019 ; Ilunga et *al.*, 2015 ; Mulimbi et *al.*, 2019).

En raison de la croissance démographique et des besoins alimentaires qui en résultent, la production agricole doit augmenter de manière significative (Alexandratos & Bruinsma, 2012). La prévision de la production agricole à l'échelle locale ou nationale est un atout géostratégique, économique et humanitaire très important à l'heure actuelle (Wandan et *al.*, 2008 ; Kouadio, 2012 ; Bangata et *al.*, 2013 ; Saranya & Nagarajan, 2020) et constitue une garantie pour la sécurité alimentaire (El Jarroudi et *al.*, 2009 ; Wandan et *al.*, 2008). En République Démocratique du Congo et plus particulièrement dans la province du Haut-Katanga très peu d'études (Kasongo, 2008) ont utilisé des modèles de simulation des rendements agricoles. Pourtant, les approches de simulation sont souvent proposées comme des outils efficaces pour assister les fermiers dans la prise de décision afin d'accroître les rendements agricoles

(Venancio et *al.*, 2019 ; Tovihoudji et *al.*, 2019; Dharmaraja et *al.*, 2020 ; García-León et *al.*, 2020 ; Juhász et *al.*, 2020 ; Kadigi et *al.*, 2020 ; Kang et *al.*, 2020 ; Kolodiy & Pidlypna, 2020 ; Li et *al.*, 2020 ; Maimaitijiang et *al.*, 2020 ; Saranya & Nagarajan, 2020 ; Shin et *al.*, 2020 ; Wang et *al.*, 2020).

Le modèle de simulation AquaCrop développé par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2009) a été utilisé pour cette étude. Il s'agit d'un modèle de simulation de la productivité eau-sol-plante. Il a été choisi en raison de sa simplicité et d'un nombre relativement faible des paramètres d'entrées qui peuvent être calibrés suivant les cultures et l'environnement (FAO, 2009 ; Steduto et *al.*, 2009). Souvent, des paramètres intuitifs d'entrée par défaut qui peuvent être déterminés à l'aide de méthodes simples (Raes et *al.*, 2009) sont utilisés. L'efficacité du modèle AquaCrop a été prouvée sur plusieurs cultures et régions du monde (Stricevic et *al.*, 2011 ; Araya et *al.*, 2010 ; Andarzian et *al.*, 2011; Hussein et *al.*, 2011 ; Zeleke et *al.*, 2011 ; Abedinpour et *al.*, 2012 ; Mkhabela & Bullock, 2012 ; Katerji et *al.*, 2013 ; Wellens et *al.*, 2013 ; Iqbal et *al.*, 2014 ; Vanuytrecht et *al.*, 2014 ; Pereira et *al.*, 2015 ; Abi Saab et *al.*, 2015; Benabdelouahab et *al.*, 2016 ; Xu et *al.*, 2019 ; Tsakmakis et *al.*, 2019). C'est un modèle simple mais robuste (Steduto et *al.*, 2007 ; Vanuytrecht et *al.*, 2014 ; Pawar et *al.*, 2017 ; Sandhu & Irmak, 2019).

Le recours à la télédétection permet, de nos jours, une meilleure calibration spatiale des modèles de croissance par une ré-estimation locale de l'information manquante des paramètres du modèle tout au long de la saison culturelle (Batchelor et *al.*, 2002).

L'objectif principal de cette étude est de simuler le rendement en maïs grain avec le modèle AquaCrop dans le contexte agroécologique de Lubumbashi, République Démocratique du Congo. Il s'agit plus spécifiquement de : (i) décrire les conditions climatiques ayant prévalu au cours de la campagne agricole 2016-2017 ; (ii) déterminer l'évapotranspiration de référence dans la zone d'étude ; (iii) déterminer la teneur en eau du sol en utilisant les fonctions de pédotransfert ; (iv) calculer l'indice de végétation NDVI dans la zone d'étude ; (v) proposer une approche de calcul de stress de fertilité en fonction de la matière organique et (vi) simuler le rendement en grains de maïs pluvial dans les différentes parcelles du dite d'étude.

Hormis l'introduction et la conclusion, le présent travail est subdivisé en 4 chapitres : (1) la revue de littérature sur le maïs, les modèles des cultures et sur le modèle AquaCrop ; (2) milieu, matériel et méthode, (3) présentation des résultats obtenus et (4) discussion des résultats.

Chapitre 1. Revue de littérature

1.1. Généralité sur la culture du maïs

1.1.1. Origine, diffusion et aire de la culture

Le maïs est une plante originaire de l'Amérique tropicale. Du point de vue génétique, un grand nombre de preuves issues de la biologie moléculaire accréditent actuellement la théorie selon laquelle le maïs cultivé a comme ancêtre le Téosinte (Galinat, 1988). D'après des preuves archéologiques et paléobotaniques, le maïs cultivé existe dans le Sud-ouest des États-Unis depuis au moins 3000 ans. Il s'est ensuite propagé sur l'ensemble du continent américain, puis à partir du XVI siècle sur tous les continents, en zone tempérée comme en zone tropicale (Benz et al., 1990).

1.1.2. Taxonomie du maïs

Le maïs est une plante appartenant au règne de Plantae, de sous-règne de Tracheobionta, la classe de Liliopsida (Monocotylédone), la sous-classe de Commelinidae, l'ordre des Poales, la Famille des Poaceae, la sous-famille de Panicoidea, la tribu de Maydae, le genre *Zea* et l'espèce *Zea mays* L (Rouanet, 1984). Le genre *Zea* regroupe des espèces annuelles et pérennes originaires du Mexique et d'Amérique Centrale (Badu-Apraku et Fakorede, 2006). Aujourd'hui, le genre *Zea* compte cinq espèces dont : *Zea Diploperennis*, *Z. luxurians*, *Z. mays*, *Z. nicaraguensis*, *Z. perennis*. Ces espèces ont été amplement testées et les résultats révèlent leur nombre de chromosomes de $2n = 20$ sauf pour l'espèce *Zea perennis* avec $2n=40$ (Rouanet, 1984).

1.1.3. Description botanique du maïs

Le maïs est une plante annuelle pouvant également se comporter comme plante bisannuelle une plante sous certaines conditions. La taille de la plante varie considérablement. Pour des variétés de maïs destiné à la production des fourrages (maïs de silo), la taille peut atteindre 4 m de hauteur. Pour des variétés utilisées pour la consommation de ses grains, la hauteur de la plante dépasse rarement 2 m 50. Les feuilles ont des nervures parallèles, insérées alternativement aux nœuds des chaumes par la gaine dans la zone de la ligule. Sa fixation du carbone est réalisée par le système photosynthétique en C4. C'est une plante monoïque dont les inflorescences mâles et femelles sont séparées. La tige principale se termine en inflorescence staminée (mâle) ou aigrette. L'aigrette est composée de plusieurs petites fleurs appelées épillets portant chacune trois petites anthères produisant les pollens. L'inflorescence femelle (pastillée) est insérée le long des chaumes (Kling et al., 1997 ; Badu-Apraku et al., 2003). La durée du cycle du maïs

dépend d'une variété à une autre. Pour cette étude, la dure du cycle des variétés utilisées a varié entre 118 et 144 jours entre. Le cycle débute dès la germination et s'achève à la maturation des grains. Il comprend : la germination ; la levée ; la formation des racines, de la tige et des feuilles ; la floraison, la maturation des grains (Ristanovic, 2001).

1.1.4. Ecologie du maïs

1.1.4.1. Climat

La culture du maïs demande des températures moyennement élevées soit supérieures à 10°C et régulières depuis le semis jusqu'à la floraison. Selon Ristanovic (2001), les températures optimales pour la croissance du maïs valent de 25 °C à 30 °C.

Généralement chaque variété est adaptée aux contraintes spécifiques du milieu où elle est cultivée. Le maïs est une culture saisonnière exigeant 3 à 4 mois chauds et humides. Une forte température peut, surtout si elle est associée à un climat sec, provoquer des brûlures sur les feuilles. La croissance normale du maïs se fait au-dessus de 10 °C et les nuits froides retardent l'évolution végétative. À 45 °C la croissance est totalement arrêtée, tandis qu'à 8°C la croissance est ralentie avec une apparition des anomalies foliaires (Rouanet, 1984). La croissance du maïs pendant le stade végétatif est conditionnée par la température de l'air et la pluvirosité (Nyembo, 2010).

Le maïs a besoin de la lumière pour sa croissance et son développement. Il est une plante à jours courts (inférieur à 13h) qui, lui favorise d'accélérer son développement et accroître la production. Par contre les jours longs (15,5 à 16 h) retardent son cycle végétatif et diminuent le rendement (Kiniry et al., 1983 ; Ristanovic, 2001).

La culture nécessite une pluviométrie supérieure à 700 mm. Toutefois, ces quantités peuvent dépendre de la durée du cycle de la variété (Norman et al., 1995).

1.1.4.2. Sols

Le maïs s'adapte à une gamme très variée de sols. Les meilleurs rendements sont cependant obtenus dans les sols profonds, bien drainés. Les sols extrêmes, très sablonneux ou très lourds, ne lui conviennent pas. Dans son aire de culture, le maïs s'accommode à un pH de 5,5 à 7. Sanchez et al., (1977) signalent que la croissance du maïs sur la majorité des sols acides tropicaux est limitée par la toxicité de l'aluminium. Le maïs est une plante très exigeante en ce qui concerne la fertilité du sol ce qui fait de lui une culture épuisante qui, laisse le sol appauvri après la récolte (Gros, 1967). Une bonne production exige un sol riche en matières organiques et en sels minéraux. Ainsi donc les sols alluvionnaires et les sols forestiers lui conviennent particulièrement (Badu-Apraku & Fakorede, 2006 ; Kabre, 2007).

1.1.5. Techniques culturales

1.1.5.1. Préparation du sol

La culture de maïs peut être cultivée en association ou en culture pure. Le labour tiendra compte de la structure du sol. Il est réalisé à bon escient pour éviter l'érosion des sols et consiste à l'ameublir. Il est parfois inutile de herser, car le maïs demande un sol meuble et bien aéré (Badu-Apraku & Fakorede, 2006 ; Nyembo, 2010).

1.1.5.2. Semis et entretien

Le semis du maïs est effectué lorsque l'humidité du sol est suffisante au début de la campagne culturelle. L'uniformité de la levée dépend de la qualité des semences, du traitement des semences contre les agents pathogènes et des méthodes de semis (profondeur et espacement). La densité de semis est adaptée aux conditions locales (fertilité des sols, précipitation,...) et aux types des variétés à cultiver. La profondeur de semis est un élément capital dans la culture du maïs. De ce fait, il est semé généralement dans un sol léger sous climat sec à 5 - 7,5 cm et peut aller jusqu'à 12,5 cm (Peace, 1981 ; Ristanovic, 2001).

Les soins d'entretien comprennent : le contrôle de la densité (regarnissage des vides et le démariage) ; le buttage lorsque les plants ont 40 à 45 cm de haut (après sortie des racines adventives) pour stimuler le développement des racines adventives, le sarclage dont la fréquence dépendra de la croissance des mauvaises herbes (en agriculture moderne, il est surtout assuré par les herbicides). Les mauvaises herbes entrent en compétition avec les cultures en ce qui concerne l'eau, les éléments nutritifs du sol et la lumière. Elles causent une incidence néfaste sur la production ce qui nécessitent leur contrôle (Autrique & Perreux, 1989).

La culture du maïs répond bien à la fertilisation. Il est très exigeant en azote, lequel est souvent le nutriment limitant suivi du phosphore puis du potassium. A ceci s'ajoutent les oligoéléments. Un stress en azote pendant la phase végétative élargit la période de cette phase. L'apport des fumures organiques avant le labour est conseillé dans la culture du maïs pour améliorer les propriétés physique et chimique du sol (Badu-Apraku & Fakorede, 2006 ; Hugues et *al.*, 2015).

1.1.6. Maladies et ravageurs

Les champignons, les bactéries et les virus sont responsables des maladies constatées dans les cultures. Ils entraînent d'importantes pertes de rendement agricole. Les maladies les plus courantes en milieu tropical sont les helminthosporioses et les rouilles, qui causent des lésions semblables à des brûlures sur la culture. La plupart des variétés améliorées tropicales sont tolérantes à ces maladies. Cependant, il existe d'autres maladies moins largement rependues

mais qui peuvent, localement qui peuvent causer des dégâts et dommages (Autrique & Perreux, 1989).

La cercosporiose

C'est une maladie qui attaque les feuilles de maïs, elle a des symptômes caractéristiques des taches nécrotiques et des perforations. L'espèce responsable de la maladie est *Cercospora maydis* (Ristanovic, 2001).

L'Helminthosporiose

La maladie est causée par un champignon appelé *Drechslera maydis*. Elle est distinguée par des lésions de couleur brune qui se manifestent après infestation des feuilles (Autrique & Perreux, 1989).

La striure du maïs

La striure bigarrée communément appelée « maladie de bandes » constitue l'une des maladies créant plus des dégâts de la culture du maïs en Afrique (Autrique & Perreux, 1989). La maladie est distinguée par une décoloration prononcée, limitée à des bandes très étroites au bord des nervures. Les feuilles laissent apparaître de nombreuses parties jaunâtres, parfois de nombreuses tâches blanchâtres qui par leur alignement donnent l'impression que la feuille est striée des tâches blanchâtre étant parallèle à la nervure principale. Cette situation affecte la chlorophylle, les plantes contaminées subissent un ralentissement de croissance. La maladie est causée par *Maize Streakgermini virus* (Traoré, 1993 ; Ristanovic, 2001).

En ce qui concerne les ravageurs, le maïs est partiellement tolérant aux nématodes rencontrés dans les sols tropicaux. Cependant, on retrouve des insectes ravageurs qui causent des dégâts au maïs en Afrique tropicale entre autres : les vers gris (*Agrotis spp. noctudae*) qui attaquent le plus souvent les plantules de maïs au niveau du sol ; les foreurs de tiges (surtout *Busseola fusca*, *Eldana saccharina*, *Sesamia calamistis* et *Chilopartellus*), le foreur de l'épi (*Mussidian igrivenella*), les noctuelles (*Helicoverpa armigera*, *Spodoptera exempta*), les cicadelles (*Cicadulina spp.*) et plus rarement, le criquet puant (*Zonocerus variegatus*). Le maïs n'est pas la proie des oiseaux. Les ravageurs courants du maïs stocké sont l'alucite des céréales (*Sitotroga cerealella*), la pyrale (*Ephestia cautella*), les charançons du grain (*Sitophilus spp.*) et le grand capucin (*Prostephanus truncatus*). Ce qui implique un traitement des grains avec l'insecticide (Autrique & Perreux, 1989 ; Badu-Apraku, 2006).

1.1.7. Récoltes et rendements

Dans l'agriculture traditionnelle, le maïs se récolte manuellement. Par contre dans des grandes exploitations, la récolte est mécanisée. Elle se réalise lorsque les grains deviennent durs et à une teneur en humidité des grains inférieure à 15 %. Le rendement varie d'une région à une autre. Néanmoins, le rendement moyen dans le monde est de 4,4 t/ha (Badu-Apraku, 2006).

1.1.8. Contrainte de la production du maïs dans la province du Haut-Katanga, R.D.C

La production du maïs rencontre plusieurs obstacles dans la province du Haut-Katanga notamment : un manque d'appui technique et financier aux producteurs ; manque d'une bonne politique agricole ; la pauvreté des sols dans la région ; l'accès difficile aux intrants (coût souvent élevé) ; la pression des ravageurs et maladies ; les mauvaises pratiques agronomiques (Nyembo, 2010 ; Kimuni et *al.*, 2014 ; Useni et *al.*, 2014 ; Ilunga et *al.*, 2015 ; Banza et *al.*, 2019 ; Ilunga et *al.*, 2019; Kasongo et *al.*, 2019).

1.2. Généralités sur les modèles de prédition des cultures

Plusieurs définitions sont données à un modèle. Selon Struif, (1999) un modèle est une représentation statique soit dynamique, subjective, simple et sélective de la réalité. Les modèles de simulation de culture sont composés d'un ensemble des relations mathématiques montrant le processus du système sol-plante-climat (Bonhomme et *al.*, 1995 ; Barbottin, 2004 ; Jeuffroy et *al.*, 2008).

1.2.1. Aperçu sur les modèles de prédition des cultures

L'apparition des modèles des cultures se rapporte selon de Wit et *al.*, (1970) à une valorisation des activités photosynthétiques et de la respiration en relation avec la biomasse accumulée et les mécanismes instantanés. Les modèles de simulation des cultures constituent des outils important dans le domaine agricole (Brisson, 2002). Les premiers travaux des recherches sur la simulation dans le domaine agronomique ont porté sur la prédition du flux hydrique dans le complexe plante-sol-atmosphère, avec l'objectif d'améliorer la gestion de l'irrigation (Hanks et *al.*, 1969). Avec le temps, l'émersion des nouveaux concepts a vu jour et constitue un référentiel des modèles de culture (Spaeth & Sinclair, 1985). De ce fait, tous les modèles des cultures répondent à des conditions agronomiques, pédologiques et climatiques. On cite par exemple l'école Hollandaise qui a développé des modèles décrivant l'écophysiologie des cultures provenant de SUCROS pour des raisons pédagogiques (van Ittersum et *al.*, 2003). L'école Américaine s'est engagée et a produit les modèles GOSSYM, GLICYM et CERES pour des objectifs agronomiques (Whisler et *al.*, 1986, McKinion et *al.*, 1988). Toutefois, il a

été signalé que ces modèles, provenaient du modèle Australien APSIM (McCown et al. 1996), du groupe CROPCGRO (Jones et al., 2003) et WOFOST de la famille de de Wit (Bouman et al., 1996). Par la suite du temps, le modèle EPIC, premier modèle générique est produit pour des fins agroenvironnementales (Williams et al., 1984). De ce modèle dériva CROPSYST (Stockle et al, 1994).

Des modèles à objectif purement environnemental ont vu jour au début des années 1990 (Abrahamsen & Hansen, 2000). Actuellement, les recherches sont dirigées vers les modèles génériques et agro-environnementaux incluant des méthodes des techniques culturales. Il s'agit notamment des modèles : STICS (Brisson et al., 2009), SAFY (Chahbi et al., 2014 ; Battude et al., 2016), AquaCrop (FAO, 2009) qui est utilisé dans cette étude.

1.2.2. Importance des modèles de simulation de culture

En agriculture, les modèles constituent des outils important dans l'orientation et la prise des décisions. Les modèles permettent l'intégration des pratiques au service d'une bonne clarté des processus et de leurs interactions. Starr et al., (2020) indiquent que les modèles jouent un rôle très important dans l'étude de sensibilité de plusieurs variables de la production agricole en lien avec variabilité du climat et de la fertilité des sols dans le temps. Les modèles peuvent simuler les dates de semis, le comportement d'un cultivar, l'impact d'association ainsi que de rotation sur des cultures sur le rendement en se basant des données historiques et d'extrapolation sur le sol et climat (Jones et al., 2003). De même, Dai et al., (1993) ajoutent que les modèles permettent aux agriculteurs de prendre des décisions sur la gestion de l'eau (irrigation ou drainage), les dates de semis, le contrôle des mauvaises herbes, la fertilisation. Les modèles de simulation des cultures sont fréquemment employés à l'échelle locale et régionale (Singh & Thornton, 1992).

1.3. Présentation du modèle AquaCrop

Cette partie fait une description du modèle AquaCrop, dont la calibration sera effectuée dans le chapitre 2 pour le maïs pluvial à Lubumbashi.

Le modèle AquaCrop a été élaboré par la FAO, Food and Agriculture Organization via le département de l'agriculture des Nations Unies. Plusieurs amendements ont été apportés au modèle jusqu'à la version 6.1 à jour. C'est un outil conçu pour aider à la décision qui se rapporte à la planification des stratégies d'amélioration de la productivité de l'eau dans l'agriculture (Hsiao et al., 2009 ; Steduto et al., 2009 ; Jin et al., 2020). De par son interface (figure 1), il est un modèle convivial et facile à utiliser (Raes et al., 2018). Il met en évidence le lien physiologique entre la croissance de la biomasse végétale et le volume d'eau évapotranspirée

(Steduto et al., 2009). La biomasse aérienne est obtenue par le produit de la productivité de l'eau et du volume total d'eau évapotranspirée pendant le cycle de la plante (équation 1) (Starr et al., 2020) :

$$B = WP \cdot \sum Tr \quad (1)$$

Avec

B : Biomasse en kg

WP : Productivité de l'eau en kg m⁻² mm⁻¹

Tr : Transpiration de la culture en mm

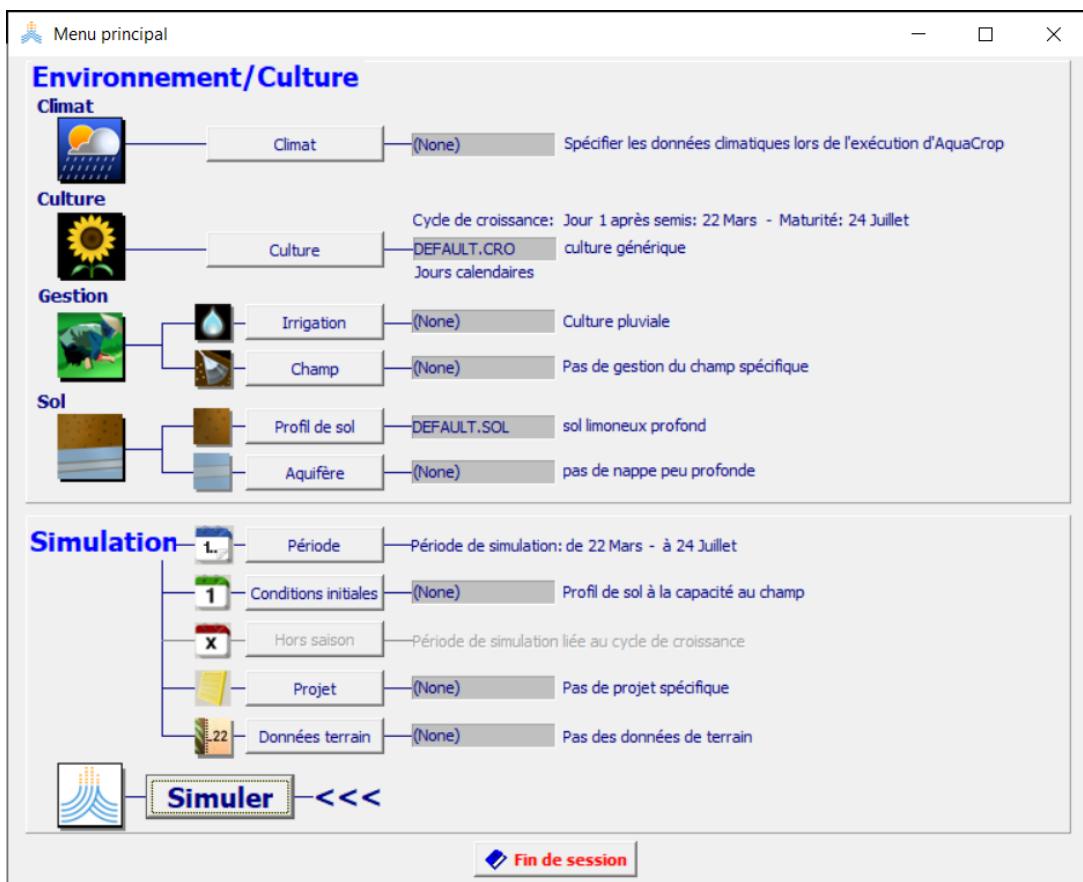


Figure 1. Interface (menu) du modèle AquaCrop.

AquaCrop est caractérisé par deux types des paramètres à savoir : les paramètres conservatifs et non conservatifs (Steduto et al., 2009). Les paramètres conservatifs sont intacts, ils ne sont pas influencés par la situation géographique et les itinéraires techniques. Leurs valeurs sont fournies par défaut dans le modèle. Raes et al., (2012) soulignent que les paramètres conservatifs du modèle doivent servir de point de départ et peuvent être ajustés avec des bonnes données des mesures. Par contre les paramètres non conservatifs varient suivant des pratiques

agricoles et demandent d'être fournis dans le modèle par l'utilisateur (Hsiao et al., 2009 ; Raes et al., 2012). Les paramètres non-conservatifs sont influencés par les conditions climatiques, la gestion de champ soit les conditions édaphiques. Ils ne peuvent pas être utilisés à grande échelle et demandent d'être fournis par l'utilisateur. Néanmoins, lorsque ces données ne sont pas accessibles, ils peuvent être fournis par la bibliothèque du modèle (Raes et al., 2009).

Le modèle AquaCrop demande un nombre partiellement réduit des données explicites et des variables d'entrée, facile à obtenir ou qui requièrent des approches simples pour leur détermination (Raes et al., 2012). Les données d'entrée sont constituées des données climatiques, culturelles, des sols et des pratiques de gestion des champs (figure 2).

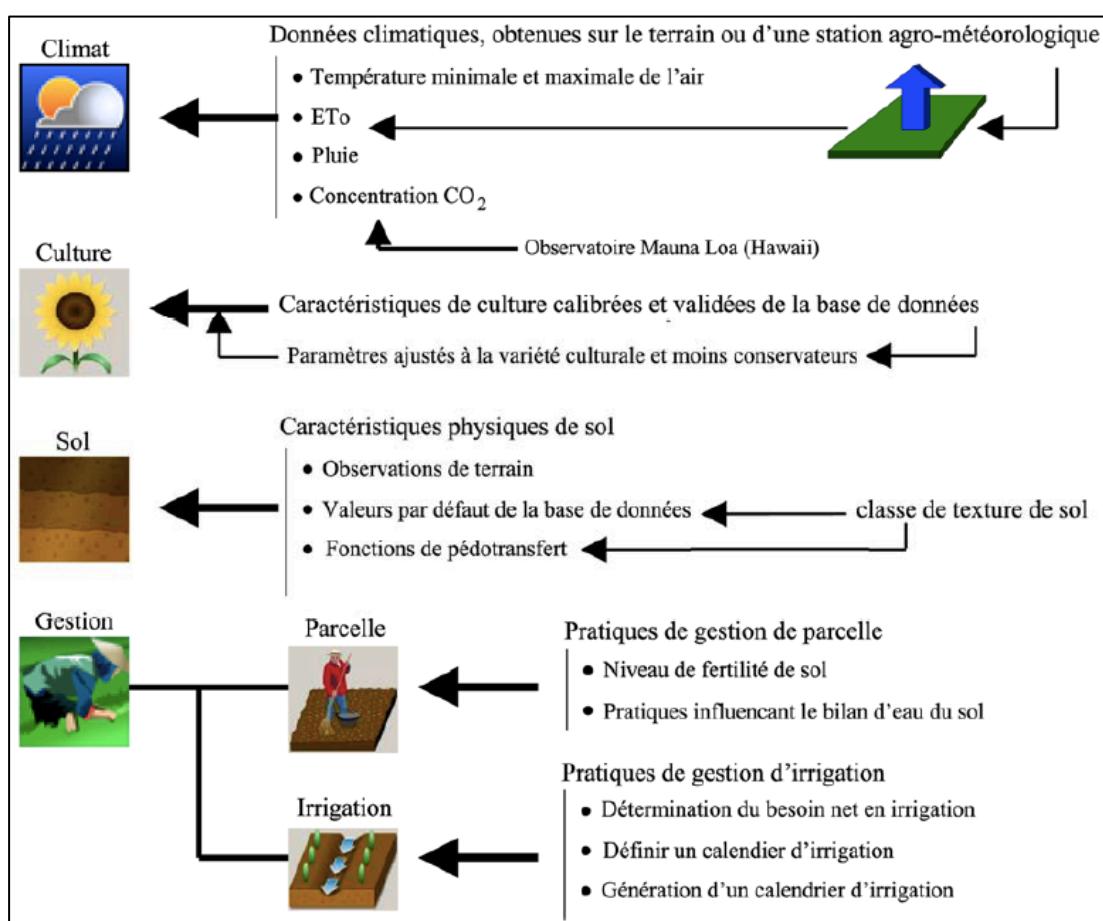


Figure 2. Données d'entrée du modèle AquaCrop (Raes et al., 2012).

1.2.2. Fonctionnement du modèle AQUACROP

Le modèle permet de simuler successivement les processus suivants (figure 3) (Raes et al., 2009 ; Raes et al., 2012) :

- Le bilan d'eau du sol,
- Le développement de la culture,
- La transpiration de la culture (Tr),

- La biomasse au-dessus de sol (B),
- La conversion de la biomasse en rendement (Y).

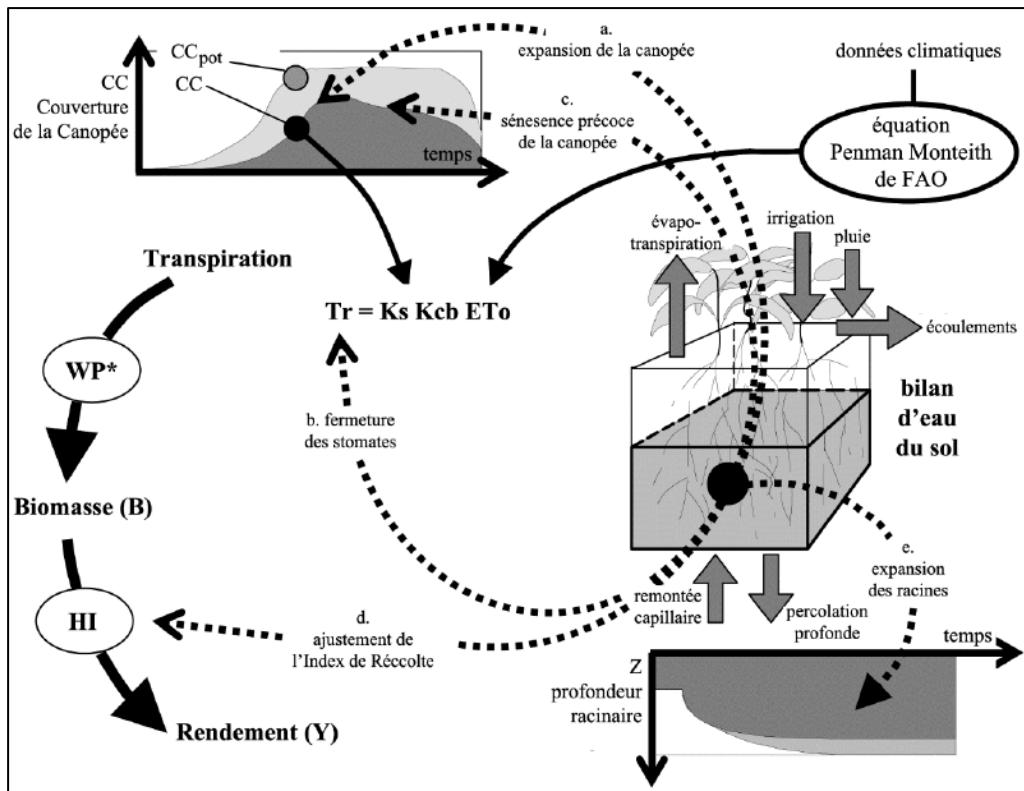


Figure 3. Schéma de calcul du modèle AquaCrop montrant (en flèches pointillées) les systèmes impactés par le stress hydrique (a, b, c, d et e). ETo : évapotranspiration de référence ; WP* : productivité de l'eau pour une culture normalisée ; CC_{pot} : couverture potentielle de la canopée ; CC : couverture de la canopée simulée ; Kcb : coefficient de culture ; Ks : coefficient de stress en eau et HI : indice de récolte (Raes et al., 2012).

1.2.2.1. Simulation du bilan d'eau du sol

Le volume d'eau stockée dans la couche racinaire du sol est simulé en prenant en compte les flux d'eau entrants et sortant à ses limites (figure 4). L'appauvrissement de la réserve en eau dans la couche racinaire donne la magnitude d'une succession de coefficients de stress en eau (Ks) qui affecte : (a) l'expansion de la canopée verte ; (b) la transpiration par unité de l'expansion de la canopée, (c) la sénescence et le déclin de la canopée, (d) l'indice de récolte ainsi que (e) le taux d'enracinement dans la couche racinaire (Raes et al., 2012).

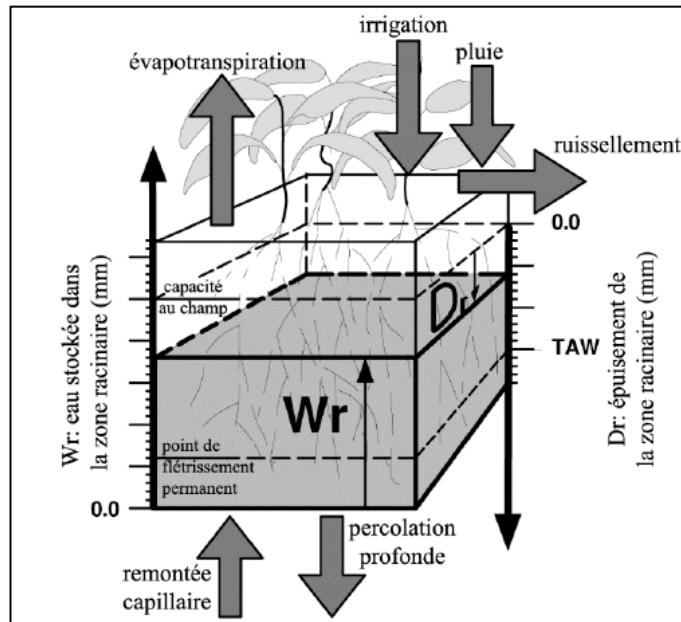


Figure 4. Zone racinaire comme un réservoir montrant les flux à ses frontières affectant (Raes et al., 2012).

1.2.2.2. Simulation du développement de la canopée verte

La simulation du développement de la culture demande une séparation de l'expansion de la canopée à l'expansion de la zone racinaire. La complémentarité de ces deux expansions est indirecte à travers le stress hydrique. Le modèle AquaCrop se sert de la couverture de la canopée, qui remplace l'indice foliaire (LAI), pour la description du développement de la culture. La canopée est une variable très importante du modèle (Steduto et al., 2007 ; Raes et al., 2012). Via son expansion, vieillissement, conductance et sénescence, il calcule la quantité d'eau transpirée, qui en retour permet de déterminer la quantité de la biomasse formée et le rendement final. Dans la situation de stress hydrique, l'expansion de la canopée verte simulée sera inférieure à la couverture potentielle de la canopée. En cas des conditions favorables, c'est-à-dire optimales, le développement de la canopée est expliqué seulement par quelques paramètres de la culture disponibles dans le modèle (Raes et al., 2012 ; Raes et al., 2018) à savoir :

- La couverture initiale de la canopée à une émergence de 90 % (CCo) ;
- La couverture maximale de la canopée, au cas où la canopée est entièrement développée (CCX) ;
- Le coefficient de croissance de la canopée (CGC), pour la description de l'expansion de la canopée entre l'émergence de la culture et son développement complet ;
- Le coefficient de déclin de la canopée (CDC) qui décrit la phase de déclin causée par la sénescence des feuilles (vers la maturité).

La figure 5 ci-dessous montre l'évolution de la couverture de la canopée verte à travers le cycle de croissance dans les conditions sans stress.

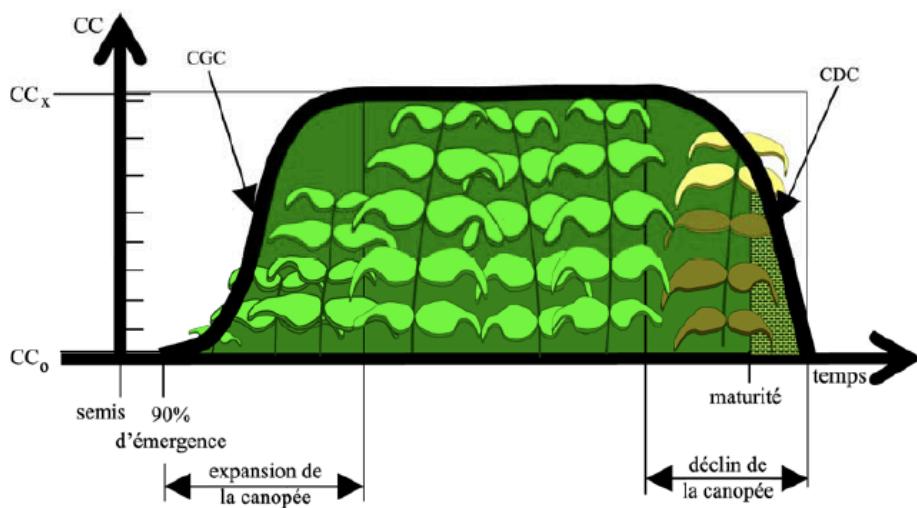


Figure 5. Dynamique de la couverture de la canopée verte (CC) via le cycle de croissance dans les conditions optimales. CCo et CCX : respectivement les couvertures de canopée verte initiale et maximale ; CGC : coefficient de croissance de la canopée verte ; CDC : coefficient de déclin de la canopée verte (Raes et al., 2012).

Il est nécessaire de signaler que, lorsque la sénescence de la canopé est précoce, le cycle de vie de la culture pourrait devenir plus court que dans les conditions sans stress (figure 6).

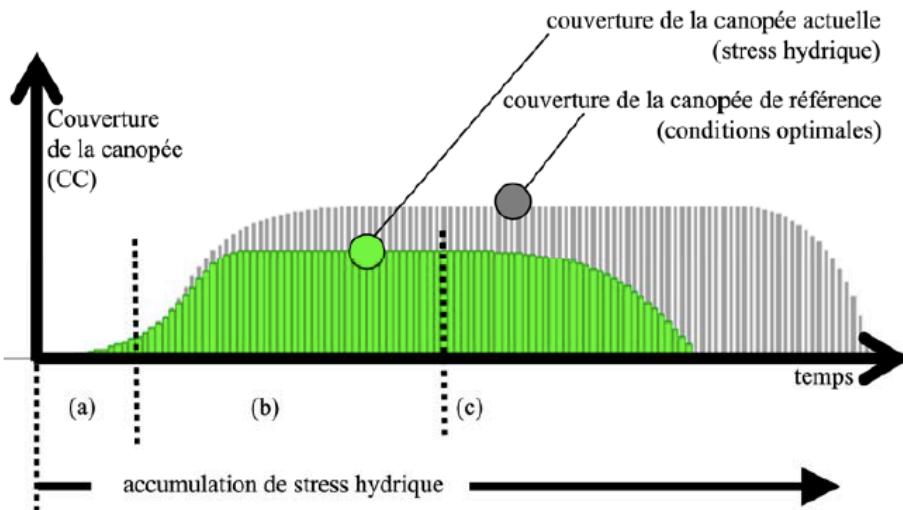


Figure 6. Simulation de la couverture de la canopée verte (CC) dans les conditions de stress en eau pendant le cycle de la culture en comparaison avec développement de la canopée sans stress (CCpot). (a) : absence de l'effet de stress hydrique sur le développement de la canopée ; (b) : présence de stress hydrique impactant l'expansion des feuilles ; (c) : déclenchement précoce de la déclinaison de la canopée par le stress hydrique (Raes et al., 2012).

Le modèle AquaCrop prend en compte d'autres facteurs ou stress qui affectent la couverture de la canopée verte notamment le stress lié à la température, le stress de salinité du sol, le stress de nutriments minéraux. Cependant, le modèle AquaCrop ne simule pas les cycles et le bilan des éléments nutritifs. Par contre, le modèle donne une catégorie des coefficients de stress de fertilité du sol (Ks) permettant de simuler l'impact de fertilité du sol. Le coefficient de fertilité du sol est en lien direct avec la couverture maximale de canopée (KsCCx) réduisant la CCx. En plus des effets sur l'expansion des feuilles et la couverture maximale de la canopée (Raes et al., 2009 ; Raes et al., 2012 ; Raes et al., 2018).

1.2.2.3. Simulation de la transpiration d'une culture

La transpiration d'une culture est le produit de la force évaporatoire de l'atmosphère (ET₀) et un coefficient cultural (Raes et al., 2012). Le coefficient cultural (K_{cb}) est corrélé à la couverture de la canopée verte (CC). De ce fait, il peut être modifié à tout moment. Quant à la force évaporatoire, elle est obtenue par l'évapotranspiration de référence (ET₀). En cas de fermeture des stomates due au stress hydrique, le coefficient de stress lié à la conductance stomatique (K_s) diminue et par la suite la transpiration. La figure 7 ci-dessous montre un exemple des simulations de l'épuisement en eau de la zone racinaire, de la couverture de la canopée verte et de la transpiration d'une culture.

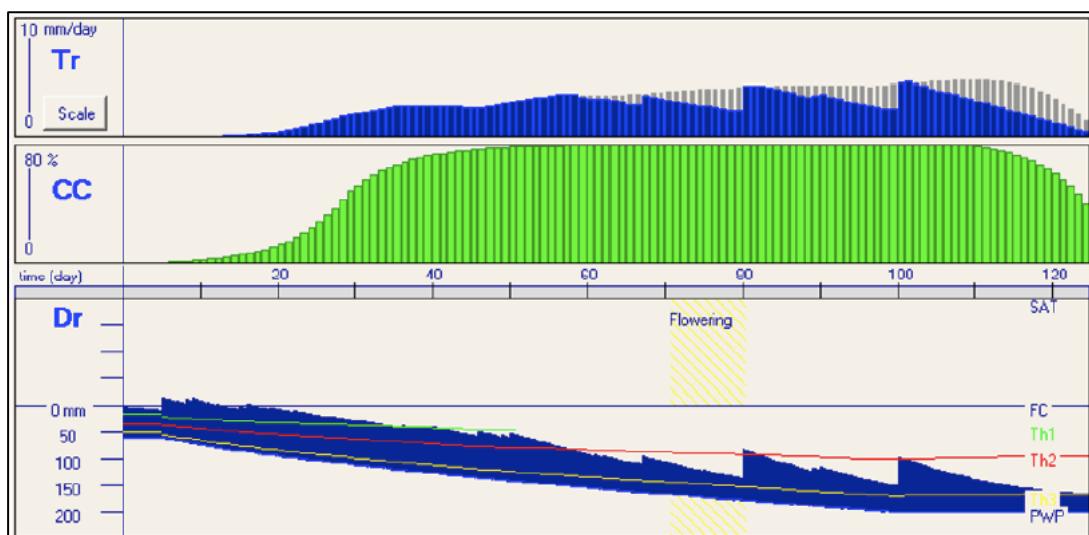


Figure 7. Simulations de l'épuisement en eau de la zone racinaire (Dr), de la couverture de la canopée verte (CC) et de la transpiration de la culture (Tr) pendant le cycle de la culture. Avec indications des seuils de stress en eau impactant le développement de la canopée (Th1), provoquant la fermeture des stomates (Th2) et induisant une sénescence précoce de la canopée (Th3) (Raes et al., 2012).

1.2.2.4. Simulation de la biomasse au-dessus du sol

La productivité de l'eau (WP) d'une culture traduit la matière sèche (g ou kg) produite par unité de surface du sol (m^2 ou ha) et par unité d'eau transpirée (mm) (équation 1). Pour question de variabilité des conditions climatiques, le modèle AquaCrop utilise la productivité normalisée de l'eau (WP^*) afin de simuler la biomasse au-dessus du sol. Cette normalisation a pour objectif de rendre la productivité de l'eau applicable dans plusieurs régions et saisons tout en considérant différents scenarii de changement de climat (Steduto et al., 2009 ; Raes et al., 2012 ; Raes et al., 2018). Cette application consiste en une normalisation de :

- ✚ la concentration atmosphérique en CO_2 , en considérant la productivité de l'eau d'une culture à une concentration atmosphérique de CO_2 de 369.41 ppm. Cette valeur constitue la référence et est la moyenne de la concentration atmosphérique en de dioxydes de carbone pour l'année 2000, déterminée à l'Observatoire de Maunua Loa à Hawaii, USA.
- ✚ la demande évaporatoire de l'atmosphère. Elle est déterminée par le rapport entre le total journalier d'eau transpirée (Tr) et l'évapotranspiration de référence pour ce jour.

Les cultures peuvent être groupées en catégories présentant une productivité normalisée de l'eau (WP^*) similaire (figure 8). Une différence entre les cultures de type C4 ayant une WP^* oscillant entre 30 à 35 gr/m^2 et des cultures de type C3 ayant une WP^* autour de 15 à 20 gr/m^2 peut être faite (Raes et al., 2012).

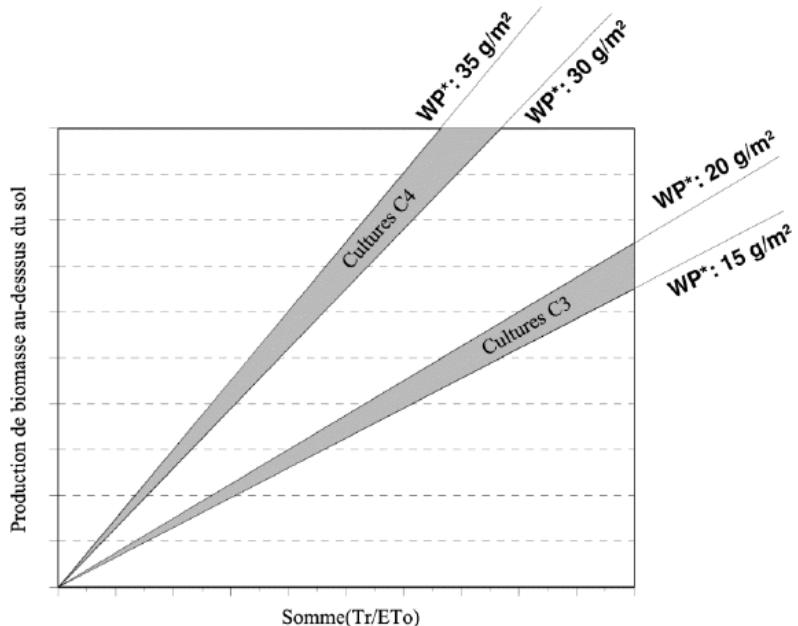


Figure 8. Relation entre la biomasse au-dessus du sol et le total d'eau transpirée par des cultures de type C3 et C4 après normalisation avec le CO_2 et ETo (Raes et al., 2012).

1.2.2.5. Conversion de la biomasse en rendement

Le rendement de la culture (Y) est le produit de la biomasse (B) et de l'indice de récolte (HI) (équation 2). L'indice de récolte (HI) augmente progressivement pour atteindre sa valeur de référence (HI₀) à la maturité physiologique de la culture (figure 9) (Raes et *al.*, 2012 ; Vanuytrecht et *al.*, 2014). Suite à la variation journalière de stress hydrique et/ou de la température, l'indice de récolte est régulièrement ajusté au cours de la formation du rendement (équation 3).

$$Y = HI \times B \quad (2)$$

$$Y = f_{HI} \times HI \times B \quad (3)$$

Où f_{HI} est un multiplicateur permettant de considérer le stress corrigé l'indice de récolte de référence.

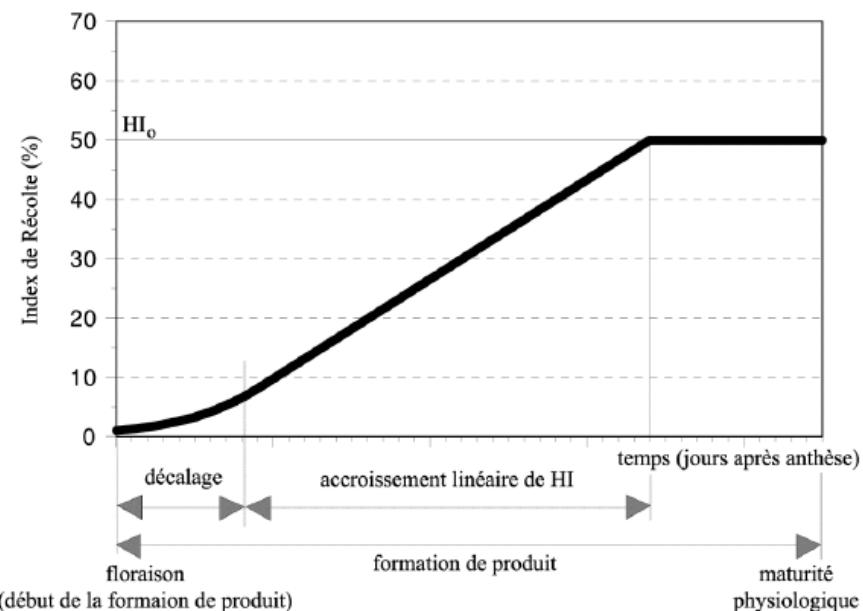


Figure 9. Croissance de l'indice de récolte dès la floraison jusqu'à la maturité (Raes et *al.*, 2012).

1.2.3. Évaluation du modèle d'AquaCrop

Le modèle AquaCrop a été testé sur plusieurs cultures et régions du monde et a offert des résultats satisfaisants notamment : sur la tomate en Italie (Katerji et *al.*, 2013) ; sur le choux au Burkina-Faso (Wellens et *al.*, 2013), en Inde (Pawar et *al.*, 2017) ; sur l'orge en Italie (Abi Saab et *al.*, 2015), au Portugal (Pereira et *al.*, 2015), en Afghanistan (Jalil et *al.*, 2020), en Espagne (López-Urrea et *al.*, 2020) ; sur le blé en Iran (Andarzian et *al.*, 2011 ; Saadati et *al.*, 2011), au Canada (Mkhabela & Bullock, 2012), au Maroc (Benabdelouahab et *al.*, 2016) ; en Chine (Iqbal

et al., 2014) ; sur le maïs aux USA, Californie (Hsiao et al., 2009), en Inde (Abedinpour et al., 2012 ; Babel et al., 2019), au Kenya (Ngetich et al., 2012), au Portugal (Paredes et al., 2014), au Nigéria (Oiganji et al., 2016), aux USA, Nebraska (Tsakmakis et al., 2019 ; Sandhu & Irmak, 2019), en chine (Jin et al., 2020 ; Zhao et al., 2020) , au Brésil (Rosa et al., 2020) ; sur le riz en Iran (Saadati et al., 2011 ; Raoufi & Soufizadeh, 2020), au Sénégal (Kaly et al., 2016 ; Akinbile et al., 2020), en Chine (Xu et al., 2019), en Thaïlande (Veerakachen & Raksapatcharawong, 2020) ; sur la canne à sucre en Serbie (Stricevic et al., 2011) ; sur le coton en Syrie (Hussein et al., 2011), aux USA, Oklahoma (Masasi et al., 2020) ; sur l'arachide en Afrique du Sud (Chibarabada et al., 2020) ; sur le sorgho en Afrique du Sud (Hadebe et al., 2020), au Sud du Soudan (Starr et al., 2020) ; sur la poire de terre au Brésil (de Sales et al., 2020) ; sur le soja en Croatie (Marković et al., 2020). Ces études montrent que le modèle AquaCrop simule correctement l'évolution de la biomasse aérienne, le bilan de l'eau dans le sol et le rendement en grain des cultures.

Chapitre 2. Milieu, matériel et méthode

2.1. Milieu

Cette étude a été conduite à Lubumbashi, chef-lieu de la province du Haut-Katanga, République Démocratique du Congo plus précisément à la ferme Ubuntu (11°40'S ; 27°29'E). Le site d'étude est localisé dans la banlieue de Lubumbashi, à 60 km à l'Est de la ville sur la route de Kasenga dans la vallée de la rivière Kifumanshi (figure 1). Avec plus de 150 ha cultivés, Ubuntu est parmi les plus grandes fermes de la région de Lubumbashi, reconnue pour ses grandes productions en maïs grains destinées à la consommation humaine sous forme de farine.

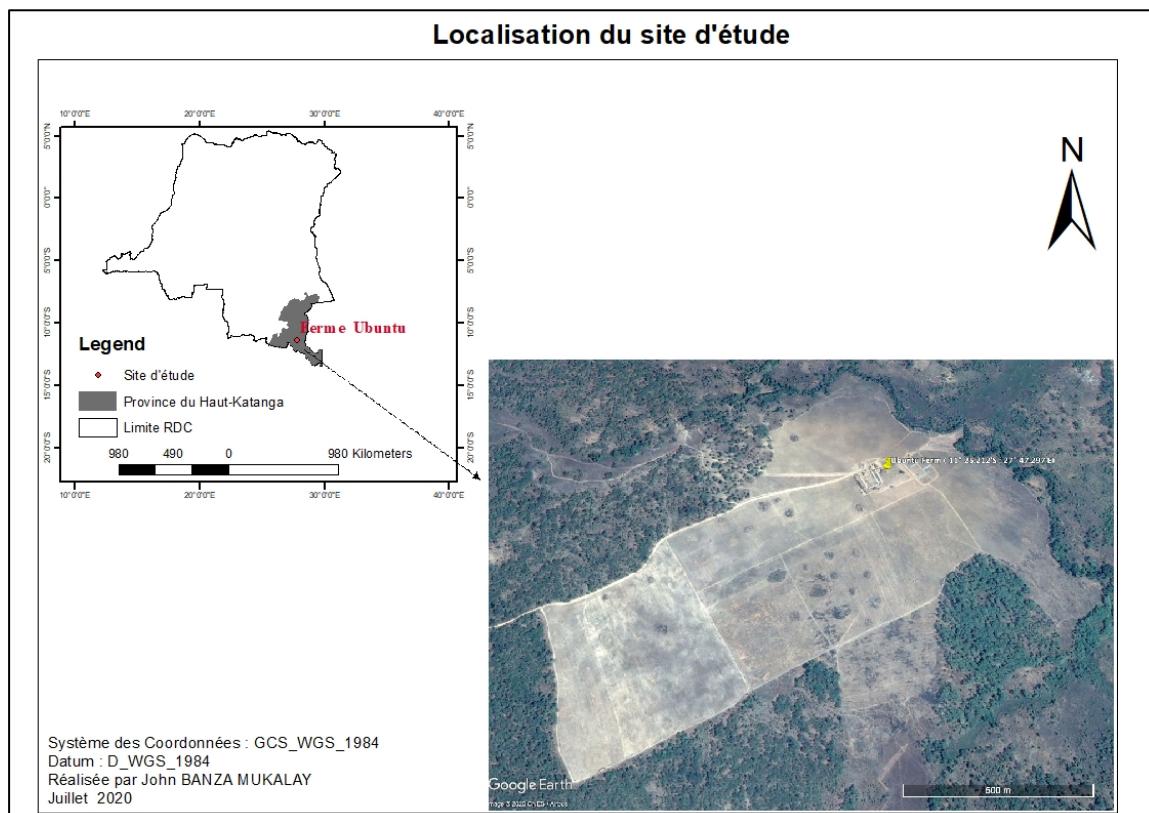


Figure 10. Location du site d'étude, ferme Ubuntu à Lubumbashi dans la province du Haut-Katanga.

2.1.1. Conditions climatiques

D'après le système de classification de Köppen, deux zones climatiques de premier ordre sont distinguées dans le Haut-Katanga à savoir Aw et Cw. La zone Aw est caractérisée par la température diurne du mois le plus froid qui est supérieure à 18 °C ; la hauteur annuelle des pluies, exprimée en cm, est supérieure au double de la température moyenne annuelle en °C, augmentée de 14 ; la côte pluviométrique du mois le plus sec descend en dessous de 60 mm.

Les caractéristiques de la zone Cw sont : la température moyenne diurne du mois le plus froids descend en dessous de 18 °C, mais reste supérieure à -3 °C (Aubreville, 1957 ; Malaisse, 1997). La région est caractérisée par une température maximale pouvant atteindre 33°C enregistrée au début de la saison des pluies, soit en septembre et octobre. Les températures minima diurnes sont généralement observées en juillet soit 5,9 °C à 8 °C (Malaisse, 1990 ; Mpumdu, 2010 ; Vranken et al., 2013).

Le climat de Lubumbashi appartient au type Cw de la classification de Köppen (Bultot, 1950). La province du Haut-Katanga est dominée par un régime des vents qui est sous la dépendance directe des mouvements atmosphériques qui se produisent en Afrique tropicale et intertropicale au cours de l'année (Kasongo, 2008). En saison sèche, vers le solstice d'été, et plus particulièrement au mois de juillet, une région anticyclonique couronne les hauts plateaux situés au Sud du Tropique du Capricorne. La vaste dépression centre-africaine est comblée par l'alizé du Sud-Est, qui, venant de l'océan Indien jusque vers l'Équateur, balaie de sa large nappe régulière une bonne partie du Congo et notamment toute la province du Haut-Katanga, où ces vents arrivent déchargés de presque toute leur eau (Aubreville, 1957). Par contre en saison pluvieuse, les vents du Haut-Katanga auraient leur origine dans les bassins de Kisangani, du Lualaba et de la cuvette congolaise elle-même (Kasongo, 2008).

Les précipitations moyennes annuelles dans la région de Lubumbashi varient entre 650 à 1550 mm. La saison des pluies va de novembre à mars, la saison sèche de mai à septembre alors qu'avril et octobre constituent les mois de transition. Juillet et août sont les mois les plus secs (Malaisse, 1997 ; Leblanc & Malaisse, 1978). La région est caractérisée par une période de croissance normale (figure 11) d'une durée moyenne de 182 jours en moyenne composée d'une durée humide de 150 jours (FAO, 2005).

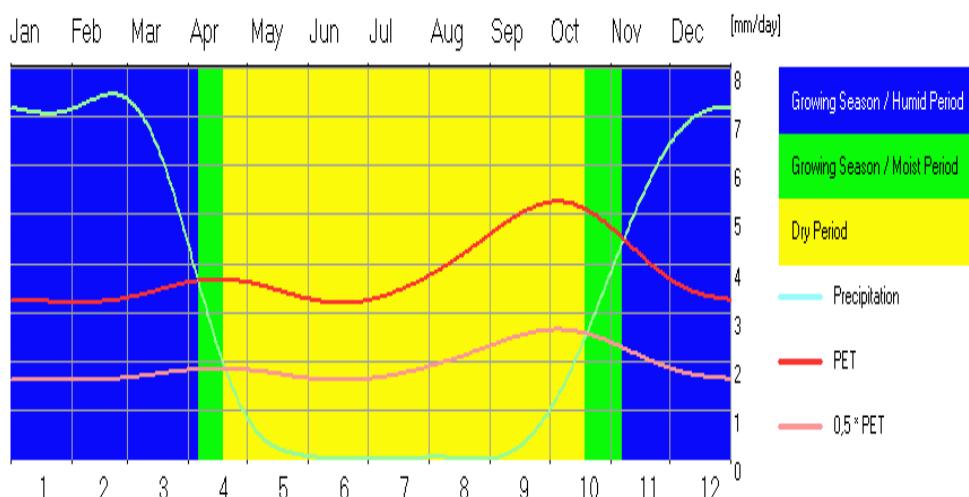


Figure 11. Période de croissance des cultures à Lubumbashi (FAO, 2005).

2.1.2. La végétation

Les principales unités de végétation dans la province du Haut-Katanga sont : les forêts denses sèches, les forêts denses édaphiques, les forêts claires, les savanes (Malaisse, 1973). La figure 12 ci-dessous montre la végétation et l'affection des sols dans la province Haut-Katanga.

Par ailleurs, les sites cuprifères de Lubumbashi possèdent une flore très originale qui comprend plus de 600 espèces (Leteinturier, 2002) dont environ 40 seraient endémiques (Brooks & Malaisse, 1985). Cependant, la destruction des habitats par la déforestation, l'agriculture, l'exploitation des ressources minières et l'urbanisation constitue la cause principale de perte de la biodiversité dans cette zone (Munyemba & Bogaert, 2014). Il convient de signaler l'apparition d'une nouvelle formation végétale ligneuse composée des forêts de reforestation d'Eucalyptus et d'Acacia, qui a vu jour dans la région afin de compenser les pertes de la végétation naturelle (Useni et al., 2019). La figure 12 ci-dessous présente l'occupation des sols de la province du Haut-Katanga.

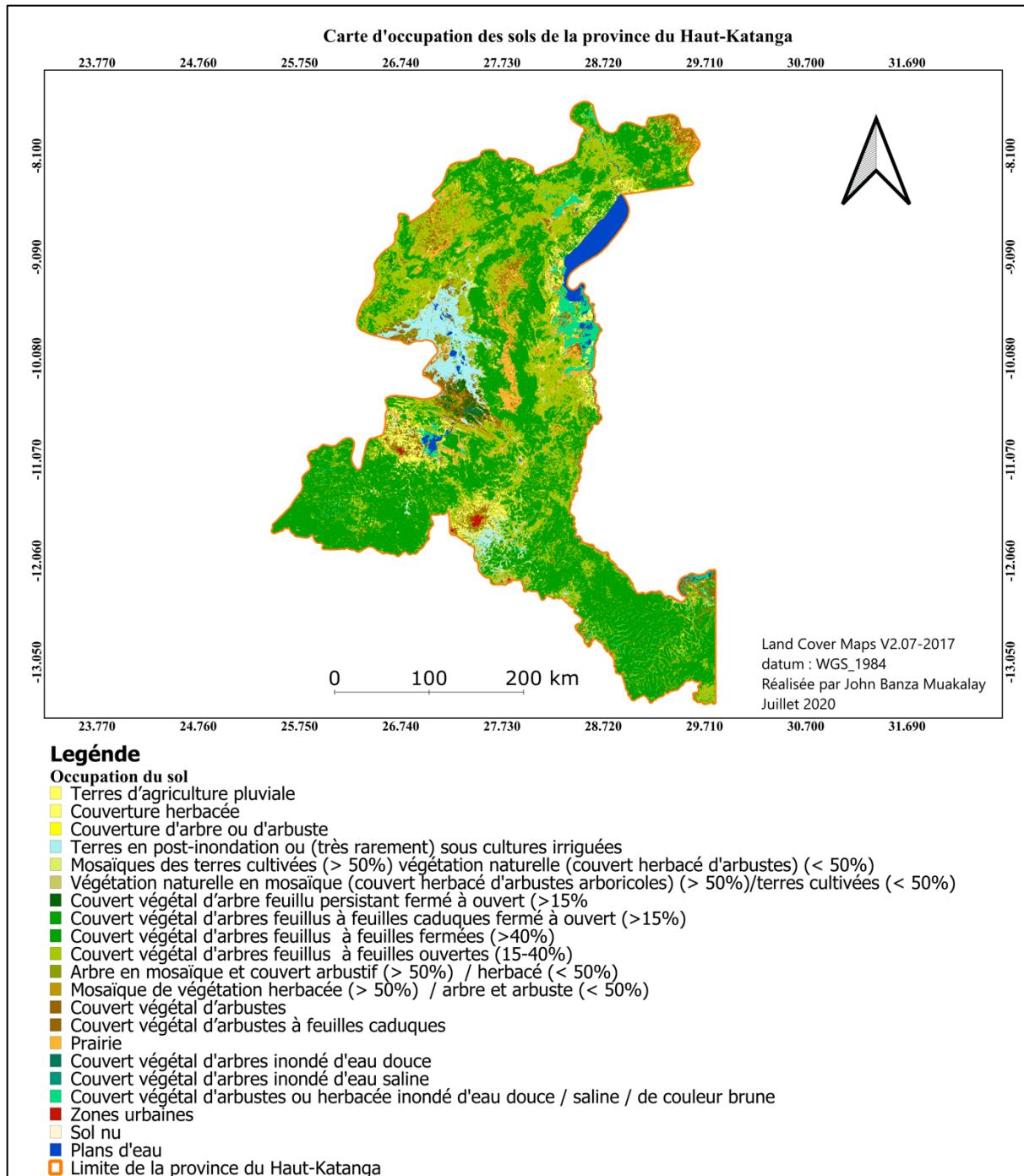


Figure 12. Carte de végétation et occupation du sol de la province du Haut-Katanga.

2.1.3. Couverture pédologique

Les sols de la province du Haut-Katanga sont très diversifiés par leur nature. On y distingue les groupes des sols de référence suivants (Kasongo, 2008) : Ferralsols, Acrisols, Arénosols, Régosols, Cambisols, Vertisols, Fluvisols, et Gleysols. Toutefois, Kasongo et *al.*, (2013) indiquent que, dans la région de Lubumbashi, la couverture pédologique est dominée par des sols de type ferrallitique avec un pH eau tournant autour de 5,2.

2.2. Matériel et méthode

2.2.1. Collecte des données climatiques

Les données agrométéorologiques de deux ans (2016 et 2017) ont été obtenues pour le site d'étude à partir de la base des données satellitaires de la NASA (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>). Ces données ont été traitées, validées et utilisées après comparaison avec des valeurs moyennes renseignées par la Fao, (2005) dans l'outil New_LocClim_1.10, répertoriant 10 stations météorologiques dans la région du Haut-Katanga qui couvre également la zone de cette étude. Il s'agit des données des températures, des précipitations, d'humidité relative, de la vitesse du vent et de rayonnement solaire.

2.2.3. Conduite de la culture dans la ferme

Les travaux de préparation de terrain de la saison culturelle 2016-2017 ont consisté au labour, hersage, semis, fertilisation et l'application de l'herbicide (pré-émergence) et ont été répartis équitablement dans tous les champs. La fiente des poules a été épandue comme matière organique uniformément avant le hersage dans tous les champs. Le semis de maïs (*Zea mays* L.) est intervenu en même temps que l'apport d'engrais de fond NPK (10-20-10) à une dose de 200kg/ha du 26 Novembre au 9 Décembre 2016. Les maïs ont été semés aux écartements de 0,75 m entre les lignes et 0,25 m dans les lignes soit une densité de 53333 plants à l'hectare en différents blocs en fonction des variétés de maïs. Trois variétés de maïs ont été semés dans 7 blocs de maïs, il s'agit de la variété UNILU (bloc G), la variété PAN 53 (bloc C, D et I) et la variété SC 719 (A, B et F). Le choix apporté sur ces variétés a été dicté par leur rendement élevé et la résistance aux maladies de maïs dans la région (tableau 1). Un apport de 200 kg/ha d'urée (60 % azoté) a été appliqué 30 jours après semis. La récolte à 6 % de taux d'humidité des grains de maïs a été effectuée en date du 23 au 25 juin 2017 pour tous les champs (tableau 2). Le rendement a été déterminé en divisant la production de la parcelle par sa superficie. Toutes les opérations culturales effectuées dans la ferme au cours de cette saison culturelle ont été mécanisées. Les tableaux ci-dessous donnent respectivement les caractéristiques des variétés utilisées au cours de la campagne culturelle 2016-2017 ainsi que les différentes dates de semis et récolte dans les différents blocs.

Tableau 1. Caractéristiques agronomiques de trois variétés de maïs utilisées dans la ferme.

Paramètre	UNILU	PAN 53	SC719
Cycle variétale (jour)	130	118	144
Hauteur de la plante (cm)	169	169	243,5
Hauteur à l'insertion de l'épi (cm)	87,25	98,5	124,5
Taux de germination	94	94	96
Jour à la floraison (jour)	57	52	60
Poids de 1000 graines (g)	378	494	365
Rendement en milieu contrôlé (t/ha)	7,5 - 8,5	8 - 11	7 - 13
Rendement en milieu réel (t/h)	4-5,5	4-6,5	3-4,5
Résistance aux maladies	Bonne à la striure et à l'helminthosporiose et très bonne à la cercosporiose	Bonne à la striure et à l'helminthosporiose et très bonne à la cercosporiose	Moyenne à la striure et à l'helminthosporiose et moyenne à la cercosporiose
Résistance à la verse	Très bonne	Très bonne	Moyenne
Écartements (cm)	75*25	75*25	75*25

Tableau 2. Dates des semis et récoltes dans les blocs de maïs à la ferme Ubuntu, campagne culture 2016-2017.

Blocs de maïs	Dates de semis	Date de récolte
F	25/11/2016	24/06/2017
A	27/11/2016	24/06/2017
C	30/11/2016	23/06/2017
B	02/12/2016	25/06/2017
D	05/12/2016	23/06/2017
G	07/12/2016	25/06/2017
I	09/12/2016	24/06/2017

2.2.4. Détermination de l'évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence correspond à l'évapotranspiration maximale, indépendamment de la quantité d'eau que les plantes peuvent absorber. C'est alors l'évapotranspiration maximum d'une surface herbeuse en bonne santé, se trouvant dans des conditions de fertilité favorable et sans aucun stress hydrique, couvrant totalement le sol (Allen et al., 1998). L'approche de Fao Penman-Monteith a été utilisée pour calculer l'évapotranspiration des plantes durant la période 2016 et 2017. Cette approche permet de calculer les valeurs de ET₀ sans ambiguïté et avec une bonne précision dans plusieurs

environnements du monde (Allen *et al.*, 1998 ; Gong *et al.*, 2006 ; Estévez *et al.*, 2009 ; Sharifi & Dinpashoh, 2014 ; Jerszurki *et al.*, 2019). L'équation 4 ci-dessous donne la formule de Penman-Monteith :

$$ET_0 = \frac{0,408 X \Delta X (R_n - G) + \gamma \frac{900}{\Gamma + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (4)$$

Avec

ET_0 : évapotranspiration de référence

Δ : pente de la courbe de la tension de vapeur saturante (kPa/C°)

R_n : rayonnement net de la surface de référence (MJm⁻²j⁻¹)

G : flux de chaleur dans le sol (MJm⁻²j⁻¹)

Γ : constante psychométrique (kPa/°C)

T : température moyenne journalière à 2 m (°C)

u_2 : vitesse du vent à 2 m (m/s)

e_s : tension de vapeur saturante (kPa)

e_a : tension de vapeur réelle (kPa)

$e_s - e_a$: déficit de tension de vapeur saturante (kPa)

γ : constante psychométrique (kPa/°C)

Certains de ces termes nécessitent des calculs qui sont réalisés en utilisant les variables météorologiques (Fao, 2006).

2.2.3. Calcul de la réserve en eau utile du sol

Les résultats de l'analyse des sols de la ferme effectuée au laboratoire de Ath (Belgique) en 2014 ont été utilisés dans cette étude. Les fonctions de pédotransfert (FPT) ont été utilisées pour calculer la rétention en eau. Les fonctions de pédotransfert connues depuis plusieurs années, constituent un groupe hétérogène d'outils des mesures des caractéristiques des sols et, entre autres, des propriétés de rétention en eau des sols (Bastet *et al.*, 1998 ; Bruand *et al.*, 2002 ; Botula *et al.*, 2012 ; GOULET *et al.*, 2004 ; Morvan *et al.*, 2004 ; Al Majou *et al.*, 2016 ; Dridi & Zemmouri, 2012 ; Wassar *et al.*, 2016 ; Amanabadi *et al.*, 2019 ; Sun *et al.*, 2019 ; Imhoff *et al.*, 2020 ; Kotlar *et al.*, 2020 ; Zhao *et al.*, 2020). De ce fait, la teneur en eau à la capacité au champ (θ_{33} kPa) et la teneur en eau au point de flétrissement (θ_{1500} kPa) ont été estimées par la méthode élaborée de Petersen *et al.*, (1968). Le choix de cette fonction a été dicté par la disponibilité des données d'entrées nécessaires pour tourner la fonction. Alors que dans d'autres cas, il manquait certaines variables d'entrées. Seules les données pédologiques de la couche superficielles (0-10 cm) ont été disponibles. La différence de la teneur en eau à la capacité au

champ et la teneur en eau au point de flétrissement donne la réserve en eau utile du sol (équation 5).

$$RU = \theta_{33} - \theta_{1500} \quad (5)$$

avec :

- θ_{33} kPa: teneur en eau volumique à la capacité au champ donné par la formule 6 ci-dessous :

$$\theta_{33} = a + (b \times Ar) + (c \times Li) + (d \times CO) + (e \times Da) \quad (6)$$

- θ_{1500} kPa : teneur en eau volumique au point de flétrissement décrite par la formule 7 ci-après :

$$\theta_{1500} = a' + (b' \times Ar) + (c' \times Li) + (d' \times CO) + (e' \times Da) \quad (7)$$

Où : Ar, pourcentage d'argile ; Li, pourcentage de limon ; CO, taux de carbone organique et Da, densité apparente du sol (g/cm^3). Les coefficients a, b, c, d, e, ainsi que a', b', c', d' et e', sont des coefficients déterminés par régression multilinéaire. Le tableau 3 présente les différentes valeurs des coefficients utilisés (Petersen et *al.*, 1968 ; Hall et *al.*, 1977 ; Gupta & Larson, 1979 ; Rawls et *al.*, 1982).

Tableau 3. Valeurs des coefficients entrants dans le calcul de la teneur en eau du sol.

033 kPa		01500 kPa	
Coefficient	Valeur	Coefficient	Valeur
a	257,6	a'	2,94
b	0,288	b'	2,96
c	0,242	c'	0,17
d	0,206	d'	0,184
e	-0,432	e'	-0,261

En ce qui concerne la densité apparente du sol, elle a été déterminée à l'aide de la formule de Harrison et Bocock, (1981) (équation 8 et 9). Cette information est importante dans AquaCrop dans la rubrique sol.

$$D = 1,558 - 0,728 \log (C(\text{g}/100\text{g})) \quad \text{si Prof.} < 0,15 \text{ m} \quad (8)$$

$$D = 1,729 - 0,769 \log (C(\text{g}/100\text{g})) \quad \text{si Prof.} > 0,15 \text{ m} \quad (9)$$

Avec C : carbone organique.

Le tableau 4 ci-dessous renseigne sur les résultats de l'analyse de laboratoire sur les sols de la ferme Ubuntu.

Tableau 4. Propriétés physicochimiques des sols dans les blocs de maïs à la ferme Ubuntu.

Bloc de maïs	Profondeur (cm)	Texture			pH	pH	CO	MO
		Argile	Limon	Sable	(H ₂ O)	(KCl)	%	%
A	0-10	56	26	18	6	4,6	1,56	2,7
B	0-10	49	17	34	5,8	4,5	1,37	2,4
C	0-10	43	32	25	5,9	4,6	1,01	1,7
D	0-10	52	39	9	5,9	4,4	1,06	1,8
F	0-10	51,7	29	19,3	6,7	6,2	1,71	2,9
G	0-10	42	25	33	5,8	4,3	1,02	1,8
I	0-10	37,2	47,8	15	5,3	4,3	0,98	1,7

2.2.4. Calcul de l'indice de végétation NDVI

Les indices de végétation constituent des associations des données radiométriques découlant de plusieurs longueurs d'ondes. Des liens entre ces indices de végétation et plusieurs paramètres biophysiques de la couverture végétale tels que la concentration en chlorophylle, la LAI, le taux de couverture du sol et la biomasse ont fait l'objet des plusieurs études (Moriondo et *al.*, 2007 ; Glenn et *al.*, 2008 ; Kang et *al.*, 2016). Certains ont une relation avec différentes propriétés du couvert végétal. C'est le cas de l'indice normalisé de différence de végétation (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index) (Chen et *al.*, 2004 ; Tucker et *al.*, 2005 ; Zhu et *al.*, 2012 ; Zheng et *al.*, 2015 ; Bai et *al.*, 2020 ; French et *al.*, 2020 ; Grados et *al.*, 2020 ; Maneja et *al.*, 2020 ; Pan et *al.*, 2015 ; Tan et *al.*, 2020 ; Thieme et *al.*, 2020 ; Wan et *al.*, 2020 ; Zhu et *al.*, 2020). La valeur de NDVI est déterminée par la mesure de la réflectance spectrale dans les longueurs d'ondes du proche infrarouge (NIR) et du rouge (R). Il se définit par la formule (équation 10) ci-dessous (Tucker, 1979):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (10)$$

Avec :

NIR : Réflectance dans le proche infrarouge et Red : Réflectance dans la bande du rouge.

Les valeurs de NDVI sont comprises entre -1 et +1 ; la végétation dense a une valeur NDVI élevée. Par contre les valeurs du sol sont faibles mais positives et l'eau a une valeur négative à cause de sa forte absorption de NIR (Mynen et *al.*, 1995).

Pour cette étude, l'image sentinelle 2 du 19/03/2017, correspondant à la période où la culture a atteint son pic de développement, a été utilisée pour le calcul de l'indice de végétation NDVI dans la zone d'étude et a été déterminée pour l'ajustement de la biomasse verte (Pettorelli et *al.*, 2005 ; Gandhi et *al.*, 2015). Le logiciel SNAP/Sentinels Application Platform 7.0 a été utilisé pour cette fin. En outre pour la cartographie, le logiciel ArcMap 10.4.1 a été utilisé.

2.2.5. Simulation des rendements avec AquaCrop

Pour faire la simulation des rendements avec le modèle AquaCrop, les données météorologiques journalières, des cultures, de gestion des champs et des conditions des profils du sol sont indispensables (Fao, 2009 ; Hsiao et *al.*, 2009 ; Raes et *al.*, 2012). Celles-ci ont été introduites manuellement dans le logiciel AquaCrop version 6.1. La période de simulation correspond aux différentes dates des récoltes pour chaque bloc de maïs (tableau 2).

2.2.5.1. Calibrage du modèle

Toute utilisation d'un modèle, requiert un calibrage, paramétrage et une validation (Nain & Kersebaum, 2007 ; Tovihoudji et *al.*, 2019). Le calibrage consiste à changer ou ajuster les paramètres du modèle voire également le codage pour des prévisions précises par rapport aux données mesurées. La validation est le processus par lequel le modèle est exécuté contre des données, sans aucune modification des paramètres du modèle ou du code (Nain & Kersebaum, 2007 ; Andarzian et *al.*, 2011 ; Salazar et *al.*, 2009).

Pour cette étude, le paramétrage a été effectué en introduisant manuellement les données liées à la culture les plus importantes à savoir : la date de semis, le cycle de la culture, la densité, le taux de germination, le jour à la floraison, et le poids de 1000 graines pour chaque variété de maïs (tableau 1). Pour les paramètres liés à la gestion de champ et de sol, les observations de terrain, les données d'analyse des sols (tableau 4) ainsi que les résultats de la rétention en eau obtenus par les fonctions de pédotransfert ont été utilisés. Les valeurs par défauts ont été conservées dans le logiciel pour les données non mesurées (Hsiao et *al.*, 2009 ; Steduto et *al.*, 2007 ; Raes et *al.*, 2012 ; Raes et *al.*, 2009 ; Lorite et *al.*, 2013).

Le calibrage de la couverture de la canopée est capital (Andarzian et *al.*, 2011). De ce fait, un ajustement a été effectué par variété sur les plus sensibles à savoir la couverture maximale de la canopée (CCx), le déclin de la canopée, le coefficient de déclin de la canopée (CDC) et le

coefficient de croissance de canopée (CGC) (Hsiao *et al.*, 2009 ; Raes *et al.*, 2012). Ainsi, la meilleure calibration qui convient aux autres blocs de la même variété a été conservée. La couverture maximale de la canopée (CCx) a été basée sur le taux de levée des plants pour chaque variété. La procédure de calibrage a été répétée pour aboutir à une similitude forte entre le rendement simulé et mesuré dans les blocs (Abedinpour *et al.*, 2012). Le tableau 5 ci-dessous donne les valeurs d'entrée utilisées pour les paramètres de la culture pour chaque variétés.

Tableau 5. Données d'entrée des paramètres de culture utilisés dans le modèle AquaCrop.

Description	Unité	Blocs de maïs							Source
		A	B	F	C	D	I	G	
Température de base	°C	8	8	8	8	8	8	8	Défaut
Température supérieure	°C	30	30	30	30	30	30	30	Défaut
Enracinement	cm	90	90	90	90	90	90	90	Adapté
Indice de récolte de référence (Hlo)	%	48	48	48	48	48	48	48	Défaut
Couverture maximale de la canopée (CCx)	%	96	96	96	94	94	94	94	Mesuré
Déclin de la canopée	jour	26	26	26	17	17	17	17	Calibré
Coefficient de déclin de la canopée (CDC)	%/jour	11,7	11,7	11,7	18,6	18,6	18,6	17,1	Calibré
Coefficient de croissance de canopée (CGC)	%/jour	15,2	15,2	15,2	17,7	17,7	17,7	15,9	Calibré

En ce qui concerne le stress de fertilité en relation directe avec la production de biomasse, l'approche méthodologique ci-dessous a été utilisée :

- Le rapport de rendement obtenu sur chaque bloc avec le rendement maximum dans le milieu contrôlé, fourni par la fiche technique de chaque variété (tableau 1) (Rendement/Rendement maximal) a été considéré comme une expression de la contribution de la fertilité chimique du sol à la réalisation du rendement sous l'hypothèse que tous les autres facteurs sont à l'optimum.
- Ce rapport ne peut être compris qu'entre 0 et 1 tout en étant strictement supérieur à 0, mais inférieur ou égal à 1. La valeur 1 de ce rapport traduit la quasi-totale absence de stress de fertilité et correspond au rendement maximum.
- Ainsi, la différence entre l'unité et ledit rapport ($1 - (\text{Rendement/Rendement max.})$) détermine le degré de diminution du rendement par rapport au maximum suite au stress de fertilité.
- Les valeurs ainsi trouvées ont été utilisées pour chaque bloc comme expression du stress de fertilité.

Le rendement potentiel a été simulé en gardant toutes les données non mesurées par défaut et sans calibrage (conditions optimales). Pour évaluer la performance de la calibration du modèle, un test de régression avec le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur de prédition (Pe) ont été réalisés sur l'ensemble des données. L'erreur de prédition a été déterminée par l'équation 11 ci-dessous (Abedinpour et *al.*, 2012) :

$$Pe = \frac{(S_i - O_i)}{O_i} \times 100 \quad (11)$$

Avec :

S_i et O_i , respectivement les données prédictes et mesurées,

Bien que le modèle ait l'air de marché bien correctement, il est difficile de le valider sur ces données ce qui nécessite une autre étude sur beaucoup de parcelles.

Une régression entre les valeurs de la teneur en matière organique et les valeurs de stress de fertilité qui y correspondent a été effectuée afin de ressortir la relation mathématique qui permet de mieux prédire le stress de fertilité en fonction de la teneur en matière organique dans le sol en cas d'absence des données des rendements mesurés. La matière organique a été choisie parce qu'elle participe aux conditions de disponibilité des nutriments grâce à sa contribution à la CEC (Boissezon et *al.*, 1991) et à sa minéralisation (Sanchez, 1976).

Vu la quantité des données (parcelles) réduites, la validation du modèle n'a pas été effectuée. Elle sera réalisée à la saison culturelle prochaine. Ainsi, cette étude constitue une première phase de calibration du modèle AquaCrop dans la région de Lubumbashi.

Chapitre 3. Résultats

3.1. Variation des paramètres climatiques dans le site

La figure 13 ci-dessous illustre les variations des températures dans la zone d'étude au cours de l'année 2016 et 2017. Ces résultats montrent que les températures ont varié de 22,1 à 36,7 °C pour la température maximale ; 7,2 à 23,3 °C pour la température minimale et de 15 à 29,9 °C pour la température moyenne. Les températures les plus élevées ont été observées en octobre, septembre et novembre de chaque année. Par contre, juin et juillet sont les mois ayant enregistré les plus basses températures.

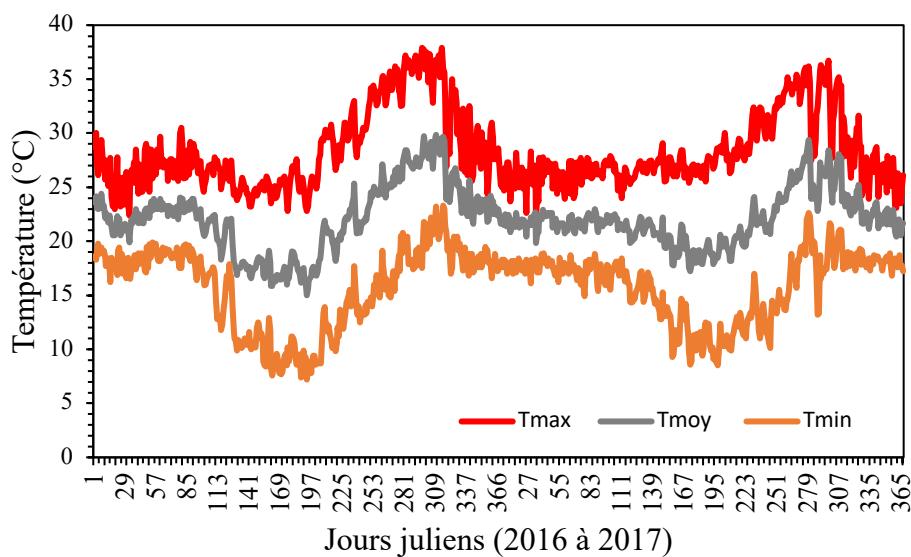


Figure 13. Variation de la température au cours de l'année 2016 et 2017 dans le site d'étude.

La figure 14 ci-dessous montre la distribution des pluies au cours de l'année 2016 et 2017 dans la zone d'étude. Les mois de mai, juin, juillet, août et septembre sont les mois les plus secs. La pluviométrie totale annuelle a varié de 991,3 à 1408,4 mm respectivement pour l'année 2016 et 2017 avec une moyenne journalière de 2,3 mm en 2016 et 3,9 mm en 2017. L'année 2017 a enregistré la pluviométrie journalière la plus élevée atteignant 56,1 mm au cours du mois de février.

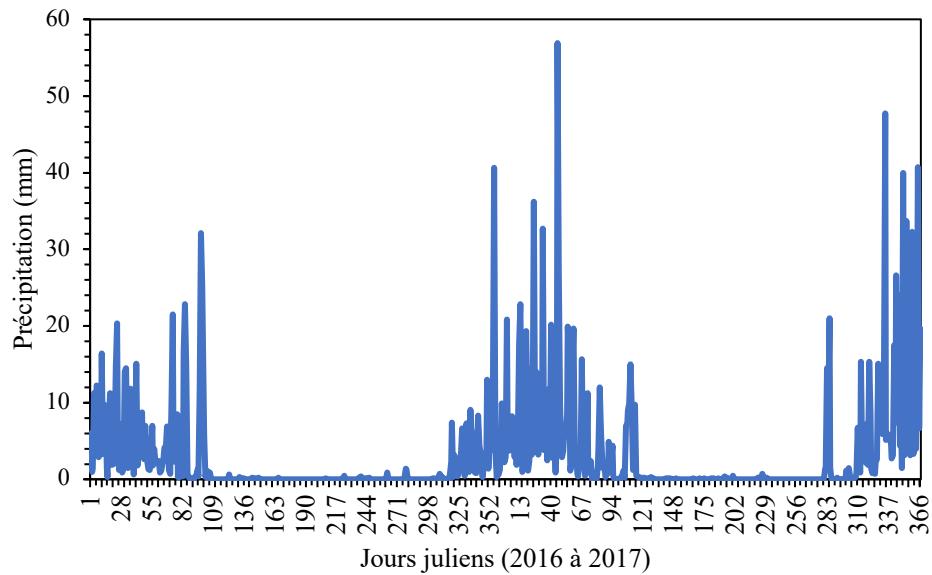


Figure 14. Distribution de la précipitation au cours de l'année 2016 et 2017 dans le site d'étude.

Les résultats sur l'insolation dans la zone d'étude illustrés dans la figure 15 ci-dessous montrent que le rayonnement solaire a varié au cours de ces deux années d'observation entre 4,1 et 27,8 MJ/m²/jour avec une moyenne de 20,25 MJ/m²/jour. La plus faible valeur de l'insolation est observée au cours de l'année 2017 en avril et octobre.

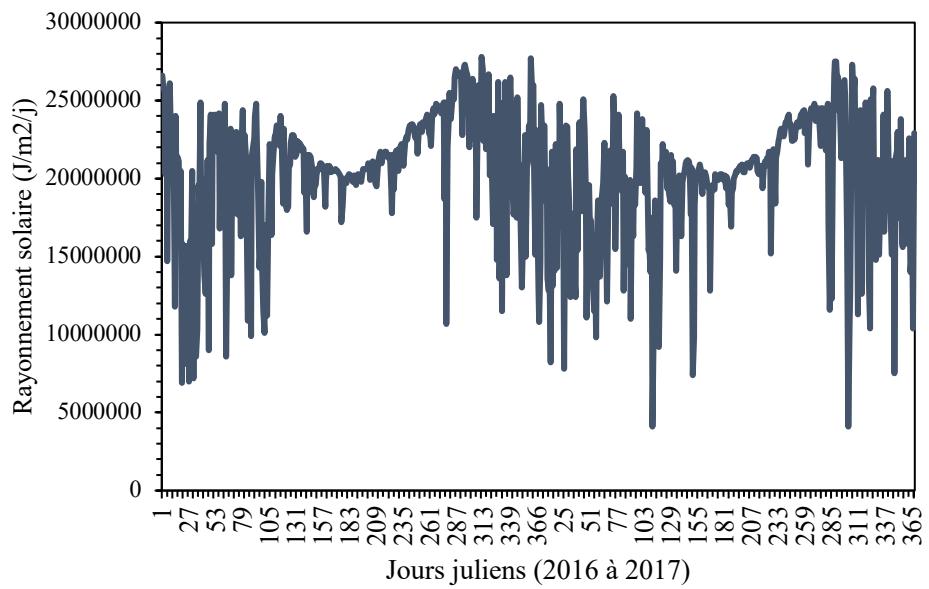


Figure 15. Variation de rayonnement solaire au cours de l'année 2016 et 2017 dans le site.

Les résultats de la température, des précipitations et du rayonnement solaire restent dans la gamme des valeurs obtenues dans la région de Lubumbashi.

3.2. Variation de l'évapotranspiration de référence

La figure 16 ci-dessous présente les résultats de l'évaporation de référence calculée par la méthode de Penman- Monteith ayant prévalu au cours des années 2016 et 2017 dans le site d'étude. Ces résultats révèlent une moyenne de 6,35 mm d'eau évapotranspirée par jour par les plantes. Toutefois, la valeur la plus élevée est de 8,73 mm/jour et 1,29 mm/jour est la plus faible.

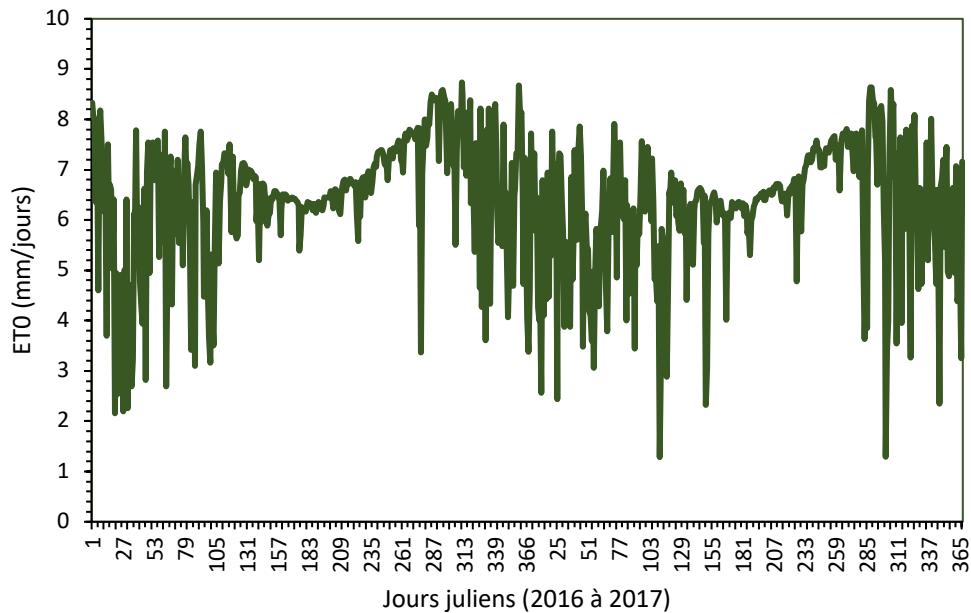


Figure 16. Évolution de l'évapotranspiration potentielle au cours de l'année 2016 et 2017 dans le site.

3.3. Rendement en maïs grain

Les résultats de rendement en maïs grains obtenus dans le site d'étude sont illustrés sur la figure 17 ci-dessous. Il résulte de ces résultats que les rendements en maïs pluvial enregistrés dans le site ont variés de 4,1 à 9,73 t/ha. Le rendement le plus élevé est observé dans le bloc F avec la variété SC719 et le plus faible rendement dans le bloc I avec la variété PAN 53. Les autres blocs et la variété Unilu de maïs montrent des rendements intermédiaires.

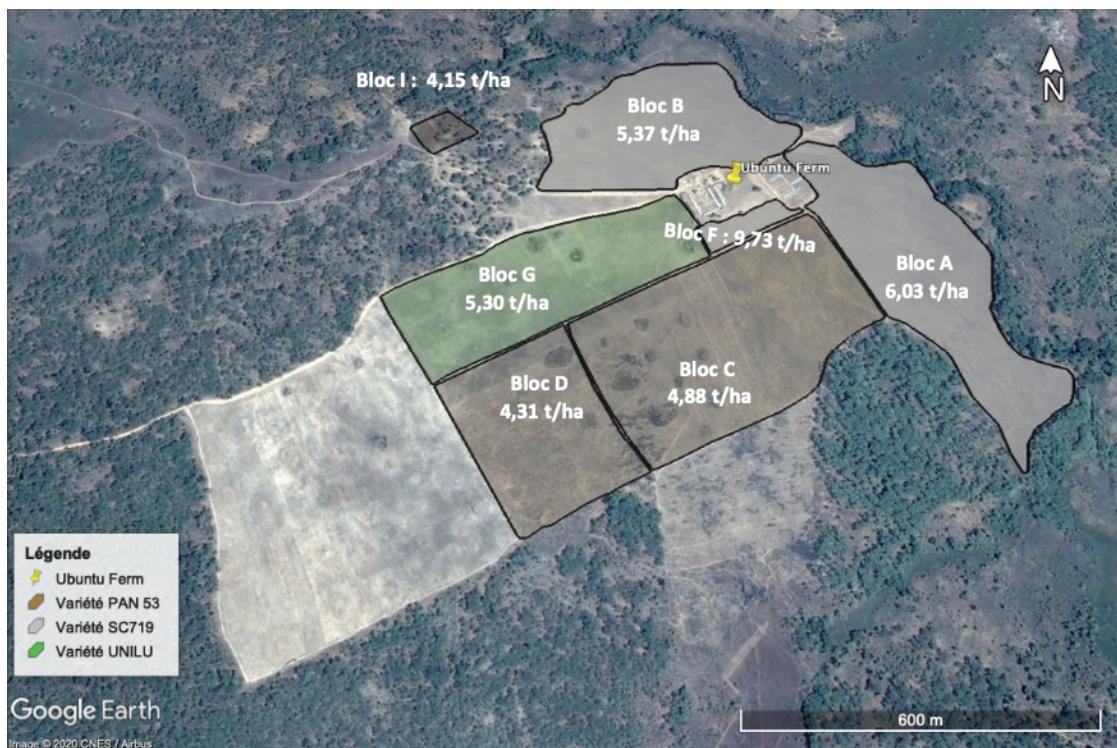


Figure 17. Rendements en grains de maïs pluvial réalisé dans la ferme Ubuntu pendant la campagne agricole 2016-2017. Image Google Earth 10/29/2017 (11°25'23,81"S ; 27°47'11,26"E).

Les résultats de l'analyse chimique la fertilité naturelle du sol dans la zone d'étude projetée sur la figure 18 ci-dessous montrent en ce qui concerne la matière organique une variation spatiale avec des valeurs allant de 1,7 à 2,9 % dans les champs de maïs. D'après ces résultats, il est constaté dans les différents blocs de maïs que les rendements en maïs grains augmentent relativement avec la teneur en matière organique.

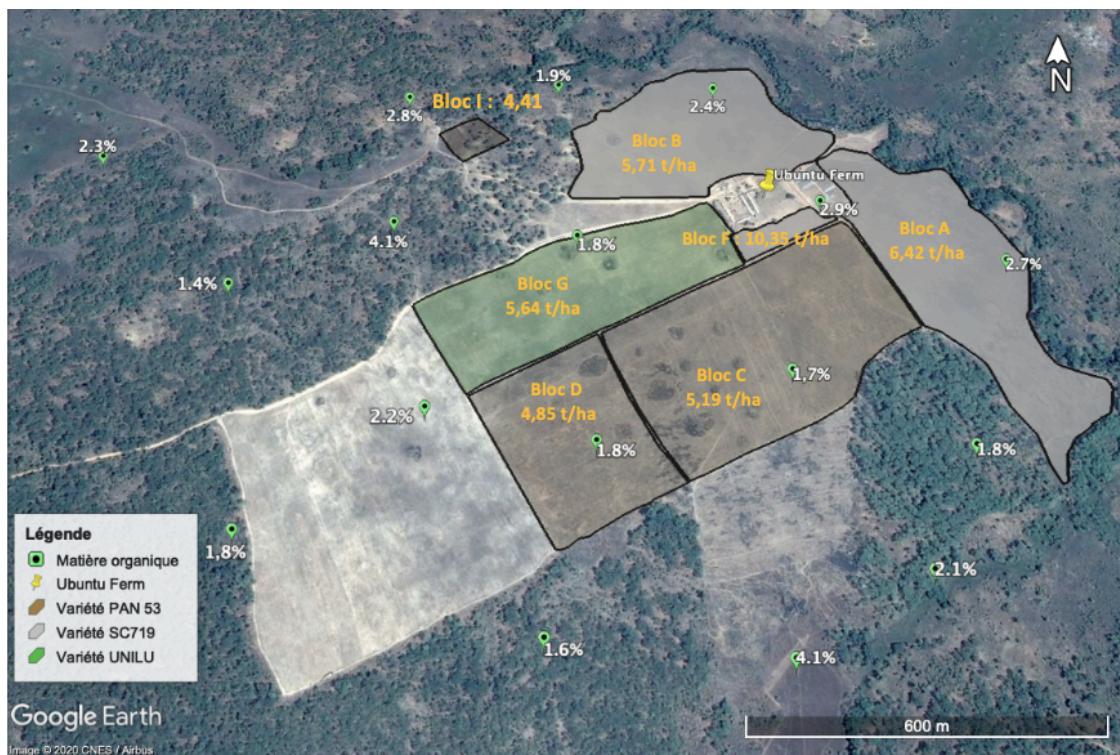


Figure 18. Rendement observé en fonction de la fertilité naturelle du sol dans les différents blocs de maïs à la ferme Ubuntu, Lubumbashi pour la saison culturelle 2016-2017. Image Google Earth 10/29/2017 (11°25'23.81"S ; 27°47'11.26"E).

3.4. Variation de la densité apparente et la teneur en eau des sols étudiés

L’application des formules de pédotransfert a fait ressortir que la densité des sols dans les différents blocs de maïs a varié entre 1,42 à 1,58 g/cm³. La rétention de l’eau dans les sols varie entre 0,275 et 0,282 cm³/cm³ à la capacité au champ et entre 0,122 à 0,174 cm³/cm³ au point de flétrissement. En ce qui concerne la réserve en eau utile, elle a varié entre 1,06 à 1,57 mm/cm. La valeur la plus élevée de la réserve en eau utile est obtenue dans le bloc I et la plus faible dans le bloc A (tableau 6).

Tableau 6. Variation de la densité et de la teneur en eau volumique du sol dans les blocs de maïs.

Bloc de Maïs	Profondeur (cm)	Da (g/cm ³)	Eau du sol		
			θ_{CC} (cm ³ /cm ³)	θ_{PFP} (cm ³ /cm ³)	RU (mm/cm)
A	0-10	1,45	0,280	0,174	1,06
B	0-10	1,49	0,275	0,152	1,24
C	0-10	1,57	0,277	0,136	1,41
D	0-10	1,56	0,282	0,164	1,17
F	0-10	1,42	0,279	0,162	1,18
G	0-10	1,57	0,275	0,132	1,43
I	0-10	1,58	0,279	0,122	1,57

3.5. Indice de végétation NDVI dans le site

La figure 19 ci-dessous présente la répartition spatiale de l'indice de végétation NDVI dans la zone d'étude. Les faibles valeurs de NDVI révélées sur la figure sont observées sur :

- La zone à mauvais drainage interne (bloc A) où la mortalité des plantes par asphyxie a laissé le sol nu ;
- La zone d'habitation où le sol est nu et où il y a des bâtiments ;
- L'ouest est caractérisé par une zone qui a été ripée où le ramassage des blocs de latérite n'a été que très partiel ;
- La bande des terres qui a été ripée en pleine saison des pluies où le sol est nu et on y ramasse des blocs de latérite.
- De même, la route et les allées présentent des faibles valeurs de NDVI à cause du sol nu.

Par contre les très fortes valeurs de NDVI apparaissant sous forme de tâches représentent les termitières couvertes d'une couverture végétale plus luxuriante. Et des valeurs suffisamment normales sont enregistrées dans les champs et au niveau de la végétation naturelle.

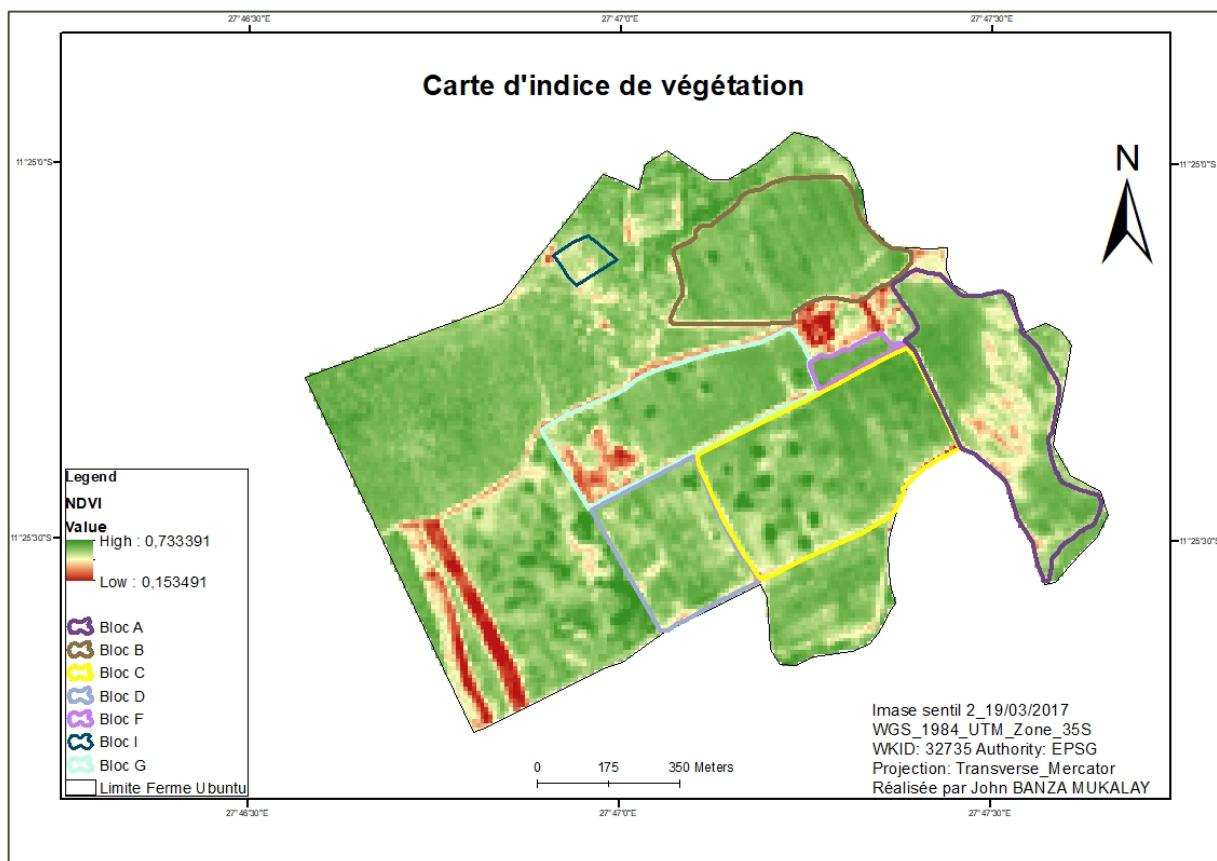


Figure 19. Valeur de l'indice de végétation NDVI dans la zone d'étude.

3.6. Évaluation du stress de fertilité

Les résultats d'analyses pédologiques montrent que la teneur en matière organique dans les champs de maïs a varié entre 1,7 et 2,9 % ;

- À la teneur en matière organique de 1,7 %, un rendement minimum de 4,15 T/ha de maïs grain est réalisé, ce qui sous-entend le stress de fertilité maximal de la ferme (Bloc I);
- À la teneur en M.O. de 2,9 %, un rendement maximum de 9,73 T/ha est réalisé, ce qui suppose un stress de fertilité faible (Bloc F).

Le rapport de rendement obtenu sur chaque bloc avec le rendement maximum fourni par la fiche technique de chaque variété traduit une expression de la contribution de la fertilité chimique du sol à la réalisation du rendement (Rdt/Rdt max.) (tableau 7).

Tableau 7. Variation du rendement de maïs grain dans les blocs en fonction des niveaux de stress. Mat. Org : Matière organique et Rdt : Rendement.

Bloc	Mat. Org.	Rdt max	Rdt (T/ha)	Rdt/Rdt max	Stress = (1-Rdt/Rdt max)
F	2,9	13	9,73	0,75	0,25
A	2,7	13	6,03	0,46	0,54
B	2,4	13	5,37	0,41	0,59
C	1,7	11	4,88	0,44	0,56
D	1,8	11	4,31	0,39	0,61
I	1,7	11	4,15	0,38	0,62
G	1,8	8,5	5,30	0,62	0,38

Pour la prévision du stress de fertilité du sol, la relation logarithmique ci-dessous (figure 12), a été déterminée avec un $R^2 = 0,25$. La forme logarithmique est celle qui traduit le mieux la décroissance du stress de fertilité avec l'augmentation de la teneur en matière organique, car ce stress tendra asymptotiquement vers 0 (équation 12) pour des valeurs plus élevées de teneur en matière organique bien que le coefficient de détermination soit faible :

$$y = -0,295\ln(x) + 0,7237 \quad (R^2 = 0,25) \quad (12)$$

où :

y = stress de fertilité et x = teneur en matière organique

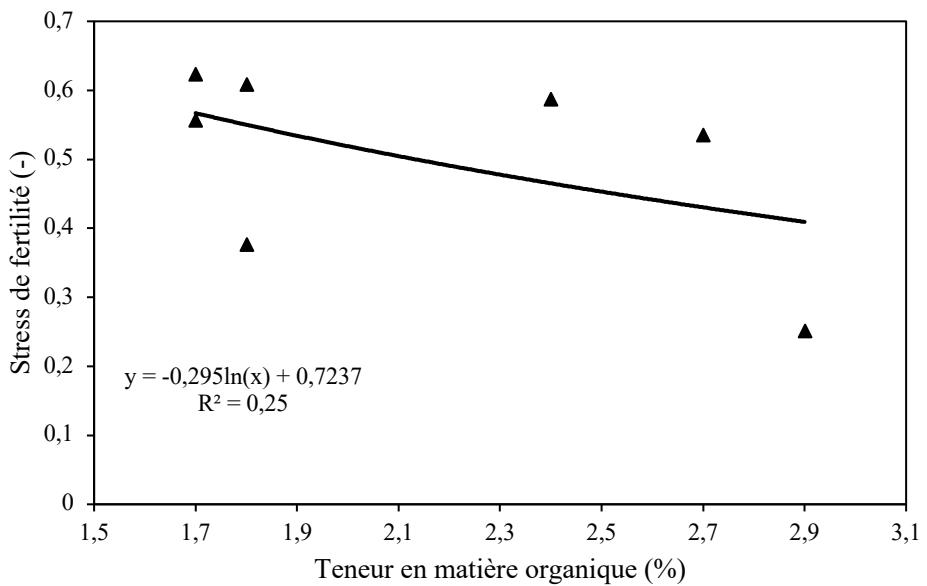


Figure 20. Relation entre le stress de fertilité et la teneur en matière organique

3.5. Évaluation du stress hydrique au cours de la culture

Les résultats de l'analyse de stress hydrique montrent après simulation par le modèle AquaCrop, aucun stress hydrique sur les plantes au cours de la culture. La même tendance a été obtenue sur tous les blocs. La figure 21 ci-dessous présente le résultat du bloc I pris en illustration étant donné qu'il a été semé en dernier lieu comparativement aux autres blocs. La figure montre que jusqu'au 85^{ème} jours, l'humidité du sol dans la zone racinaire est à la capacité au champ malgré qu'au début de la culture elle descend, mais elle retrouve son équilibre très rapidement au 22^{ème} jour. Cependant, l'humidité du sol diminue progressivement à partir de 85^{ème} jours jusqu'à la maturité. La transpiration montre une tendance à l'augmentation avec la croissance de la culture jusqu'à être intense pendant la floraison. Plus tard, elle diminue progressivement avec la maturité de la culture. La couverture de canopée diminue progressivement à partir de 70^{ème} jour après semis. Cette diminution est attribuée au stress de fertilité des sols.

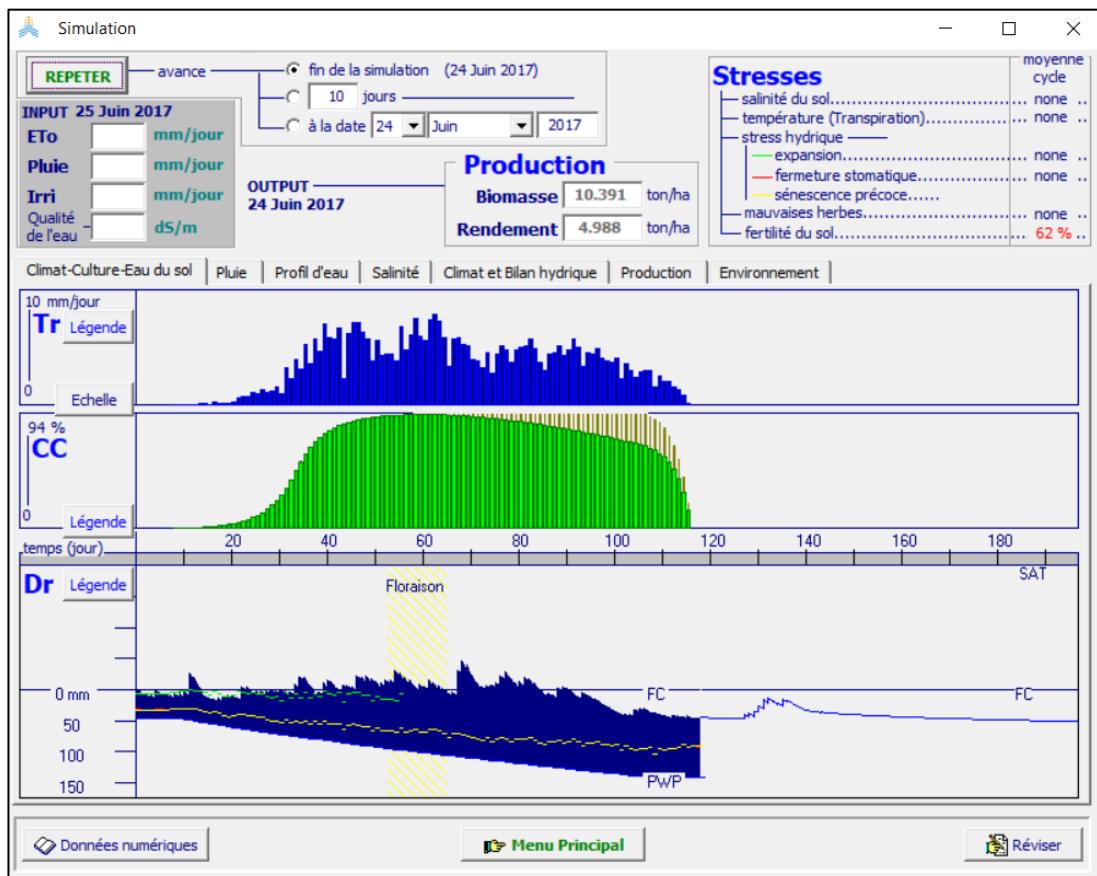


Figure 21. Simulation de l'évolution de la transpiration (Tr), de la couverture de la canopée (CC) et de l'épuisement de la zone racinaire (Dr) au cours de la culture du maïs. FC : Capacité au champ et PWP : Point de flétrissement.

3.6. Simulation de rendement avec AquaCrop

Les résultats des rendements mesurés, simulés et potentiels sont consignés dans le tableau 8 ci-dessous. Les résultats montrent des valeurs proches entre les rendements de maïs simulés et les rendements observés. Ce qui traduit l'efficacité du modèle à simuler les rendements des cultures. Les rendements potentiels varient entre 13,17 et 14,6 t/ha alors que les rendements mesurés étaient compris entre 4,15 et 9,73 t/ha. Les ratios de rendement mesuré et potentiel révèlent des écarts énormes qui peuvent être attribués à divers stress possible dans la gestion de la culture.

Tableau 8. Rendement en maïs grain mesuré, simulé et potentiel dans le site d'étude durant la campagne agricole 2016-2017.

Blocs	Rendement (t/ha)			Ratio rendement mesuré et potentiel (%)
	Mesuré	Simulé	potentiel	
A	6,03	6,41	13,38	45
B	5,37	5,45	13,25	41
C	4,88	5,95	13,89	35
D	4,31	5,15	13,94	31
F	9,73	10,22	13,17	74
G	5,3	6,73	14,6	36
I	4,15	4,99	14	30

La figure 22 ci-dessous montre la relation entre le rendement en maïs grain mesuré et simulé. Il est révélé que les rendements en grains de maïs observés et modélisés sont positivement corrélés avec R^2 de 0,945. Ceci indique que le modèle explique à 99 % la relation entre les rendements en maïs mesurés et simulés. Toutefois, l'analyse d'erreur de prédiction Pe montre une erreur moyenne de 8,6 % sur tous les blocs combinés.

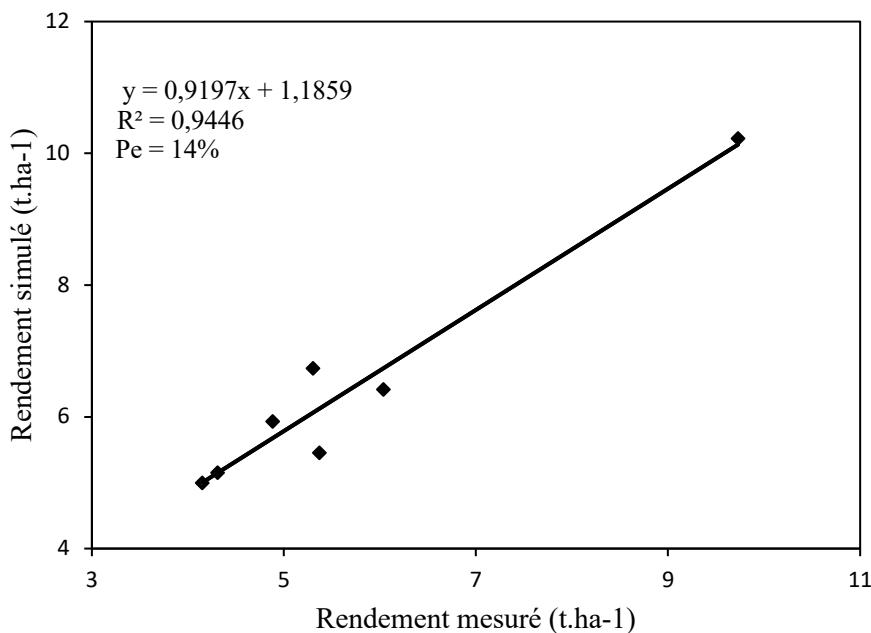


Figure 22. Relation entre le rendement en grain de maïs mesuré et simulé pour tous les blocs combinés.

Chapitre 4. Discussion des résultats

4.1. Analyse des performances du modèle AquaCrop

Le modèle AquaCrop simule la production quotidienne de la biomasse et le rendement final de la culture par rapport à l'approvisionnement et à la consommation d'eau et à la gestion agronomique (Raes et *al.*, 2012). La production de biomasse est liée à la transpiration ainsi, l'équilibre hydrique du sol est un élément critique pour le modèle (Rosa et *al.*, 2020). Il considère la zone racinaire comme un réservoir dans lequel la teneur en eau fluctue en raison des eaux entrantes (pluies, irrigation et remontée capillaire) et sortantes par ruissellement, évaporation, transpiration et percolation profonde), flux aux limites de la zone (Hsiao et *al.*, 2009 ; Raes et *al.*, 2018 ; Steduto et *al.*, 2009). Pour décrire l'équilibre et le mouvement de l'eau dans le profil du sol, AquaCrop divise en compartiments de sol (12 par défaut) avec une épaisseur Δz (0,10 m par défaut). Cependant, après la sélection des cultures, AquaCrop ajuste la taille des compartiments pour couvrir toute la zone racinaire. Pour les zones de racines profondes, Δz n'est pas constant, mais augmente exponentiellement avec la profondeur (Hsiao et *al.*, 2009). L'infiltration, le mouvement de l'eau entre les compartiments et le drainage sont simulés par un ensemble d'équations en termes des variables dépendantes utilisant un coefficient de drainage sans dimension dérivé de Ksat (Hsiao et *al.*, 2009 ; Geerts et *al.*, 2010). En ajustant la teneur en eau du sol tout au long du profil du sol au quotidien, AquaCrop assure le suivi de l'équilibre hydrique du sol dans la zone racinaire. Les diverses réponses des cultures au stress hydrique sont modélisées comme des fonctions dépendantes (Steduto et *al.*, 2007 ; Hsiao et *al.*, 2009 ; Raes et *al.*, 2012 ; Vanuytrecht et *al.*, 2014).

La phénologie de la culture est simulée par AquaCrop en termes d'accroissements quotidiens de degrés-jours de croissance (GDD) accumulés au cours de la saison (Steduto et *al.*, 2009 ; Raes et *al.*, 2012), donc avec le temps thermique pour les différents stades phénologiques spécifiés et pour le cas de cette étude, c'est le maïs. Pour le développement du couvert végétal (CC), AquaCrop ne simule pas l'indice de surface foliaire, mais plutôt, le développement de feuillage exprimé en fraction de la surface du sol couverte par la canopée. Son expansion, son vieillissement, sa conductance et sa sénescence sont des déterminants clés de la quantité d'eau transvasée, qui à son tour détermine la quantité de biomasse produite (Steduto et *al.*, 2009). Au début de la sénescence de la canopée, la baisse du CC est simulée avec un coefficient de déclin de la canopée (CDC) (Raes et *al.*, 2012). L'effet de tout type de stress environnemental sur la culture, AquaCrop le simule par des coefficients de contrainte (Ks). Essentiellement, Ks est un modificateur de son paramètre cible et sa valeur varie de 1 (pas de contrainte) à 0 (contrainte

totale) en fonction d'un indicateur de contrainte. Pour le manque d'eau, l'indicateur de stress n'est pas une mesure de l'état hydrique de la plante, mais simplement l'épuisement relatif de la réserve en eau dans la zone racinaire (Dr), qui se réfère au manque d'eau pour la culture en référence à la quantité d'eau à la capacité au champ. Dr varie entre 0 à la capacité du champ (0 % d'épuisement) et 1 (100 % d'épuisement) au point de flétrissement permanent (PWP). Lorsque Dr, tombe en dessous des seuils de stress hydrique pour affecter l'expansion de la canopée, le Ks pour l'expansion de la canopée (Ksexp) commence à tomber en dessous de 1 pour réduire le CCG efficace, et le développement de la canopée est ralenti (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2012 ; Steduto et al., 2007 ; Vanuytrecht et al., 2014 ; Raes et al., 2018 ; Rosa et al., 2020).

En ce qui concerne le stress causé par une faible fertilité des sols (carence en nutriments), il n'est pas possible de simuler avec AquaCrop les effets sur la base de processus et de concepts fondamentaux tout en gardant le modèle relativement simple (Rosa et al., 2020). Par conséquent, AquaCrop utilise une approche indirecte en considérant les effets sur le développement de la canopée et la productivité de l'eau (WP). Lors de la spécification de la biomasse réelle, AquaCrop recherche un réglage de quatre coefficients de contrainte, en l'absence de toute autre contrainte, en ciblant (i) la productivité de l'eau, WP ; (ii) la couverture de la canopée maximale, CCx ; (iii) le coefficient de croissance de canopée, CGC et (iv) la baisse de la couverture de la canopée une fois CCx atteint. Les paramètres modifient la couverture de la canopée simulée et la productivité de l'eau, donc la biomasse, et imitent ainsi l'effet du stress lié à un manque de fertilité du sol (Hsiao et al., 2009 ; Raes et al., 2012 ; Raes et al., 2018).

4.2. Variation de l'évapotranspiration de référence et de stress hydrique

Les résultats de l'évaporation de référence dans le site d'étude ont révélé au cours des années 2016 et 2017 une moyenne de 6,35 mm d'eau évapotranspirée par jour. La valeur la plus élevée a été de 8,73 mm/jour et la plus faible 1,29 mm/jour durant la période d'observation (figure 16). La variation l'évaporation de référence dépendent de ces variables météorologiques et leurs interactions (Xu et al., 2017 ; Pour et al., 2020 ; Zhijun et al., 2020). Les températures plus élevées et les rayonnements journaliers élevés observés ont induit à une évapotranspiration plus élevée. Plusieurs études montrent que la température est le facteur majeur pour l'augmentation de l'ET₀ (Kundu et al., 2017 ; Mosaedi et al., 2017 ; You et al., 2019). Ces valeurs élevées d'évapotranspiration ont coïncidé avec la phase végétative et la mi-saison de la culture du maïs dans le site d'étude. Akinbile & Sangodoyin, (2011) signalent que la perte d'eau par

évapotranspiration pendant la mi-saison de la culture où l'utilisation de l'eau est maximum conduirait à un stress à la culture ce qui affecterait la croissance et le rendement final. Néanmoins, les résultats de l'analyse de stress hydrique ont montré après simulation par AquaCrop (figure 21), signe de stress hydrique sur les plantes durant la période de la culture dans tous les blocs. L'humidité du sol dans la zone racinaire a été à la capacité au champ au début de la culture malgré une légère diminution observée qui serait due à la répartition temporaire des précipitations au début de la saison pluvieuse. Par contre, vers la fin de la culture, la teneur en eau diminue jusqu'à être en dessous de la capacité au champ. La transpiration des plantes est restée inférieure à 10 mm à d'eau par jour bien que la tendance montre au début de la culture une augmentation avec la croissance de la culture jusqu'à atteindre le pic pendant la floraison et une diminution progressive avec la maturité de la culture. Malgré cette variabilité, les plantes ont comblé correctement leur besoin en eau et n'ont pas manifesté un signe de stress hydrique. Cette situation est expliquée par la quantité des précipitations élevée qui tombe dans la région (Malaisse, 1990 ; Malaisse, 1997 ; Leblanc & Malaisse, 1978 ; Kasongo, 2008 ; Vranken et al., 2013) compasserait les pertes d'eau de l'évapotranspiration (Fao, 2005). De même, Kasongo et al., (2019) ; Munaro et al., (2020) ; Pomortsev et al., (2019) ; Safdari-Monfared et al., (2020) ajoutent que le choix des dates de semis est crucial pour éviter de soumettre les plantes au stress hydrique.

4.3. Rendement en maïs grain dans le site d'étude

Les résultats sur le rendement en maïs grains obtenus dans le site d'étude au cours de la campagne agricole 2016-2017 ont montré que les rendements ont varié de 4,1 à 9,73 t/ha. Le rendement le plus élevé a été observé dans le bloc F avec la variété SC719 et le plus faible rendement dans le bloc I avec la variété PAN 53. Le rendement intermédiaire a été dans les autres blocs (figure 17). La variation des rendements observée serait due à la fertilité naturelle des sols, aux dates des semis, et même aux variétés de maïs utilisées. Plusieurs études insistent sur le choix judicieux des dates de semis (Pomortsev et al., 2019 ; Zhang et al., 2019 ; Arredondo et al., 2020 ; Brzozowska & Brzozowski, 2020 ; Dao et al., 2020 ; Fleitas et al., 2020 ; Munaro et al., 2020 ; Safdari-Monfared et al., 2020, 2020 ; Tofa et al., 2020 ; Vitantonio-Mazzini et al., 2020). En effet, un semis très précoce ou tardif ne permet pas nécessairement à la culture de mieux capitaliser les précipitations enregistrées durant la campagne agricole (Kasongo et al., 2019). Toutefois, il a déjà été montré que le recours aux variétés améliorées (hybrides) ou à cycle court permet d'optimiser le rendement agricole (Dewayani et al., 2020; Iriany et al., 2020; Magistrali et al., 2020; Rusinamhodzi et al., 2020).

En rapport avec la fertilité chimique du sol, il a été observé dans les blocs de maïs que les rendements en maïs grains augmentent relativement avec la teneur en matière organique du sol (figure 18). Le bloc F a présenté la teneur en matière la plus élevée de tous les champs de maïs et a aussi donné le meilleur rendement. La position de proximité du bloc F à la maison de résidence et de l'enclos des bétails pourrait expliquer d'une part la teneur élevée de matière organique dû à l'apport des ordures ménagers et des fumiers. Selon Sanchez, (1976) et Tittonell et *al.*, (2010), les champs proches des habitations sont plus fertiles que ceux sont loin des habitations. D'après les observations effectuées *in situ*, toutes les récoltes effectuées dans les différents blocs de maïs ont été entreposées à côté du bloc F. Après égrainage tous les débris des épis sont abandonnés sur place ce qui constituerait une source non négligeable de matière organique puisqu'ils sont enfouis dans les sols lors du labour. Ceci participerait à l'amélioration de la fertilité chimique (Akponikpe et *al.*, 2008 ; Hiel et *al.*, 2018). L'apport d'amendement organique aux sols permet d'améliorer les propriétés physiques, biologiques et chimique en fournissant les éléments nutritifs aux plantes, nécessaires pour leur croissance et accroître le rendement (Fatondji et *al.*, 2006, 2009 ; Kwey et *al.*, 2015 ; Koull & Halilat, 2016 ; Kasongo et *al.*, 2019 ; Harmand et *al.*, 2000 ; Bah et *al.*, 2020 ; Bonanomi et *al.*, 2020 ; Heri-kazi & Bielders, 2020 ; Kandil et *al.*, 2020 ; Patil & Sheelavantar, 2009 ; Zaki et *al.*, 2020 ; Zhou et *al.*, 2020).

3.4. Variation de la densité et de la teneur en eau du sol dans le site

L'usage des formules de pédotransfert sur la détermination de la densité apparente et la rétention de l'eau du sol a montré que le sol de la ferme Ubuntu a une densité apparente variant entre 1,42 à 1,58 g/cm³ dans les différents blocs de maïs (tableau 6). La méthode de Harrison & Bocock, (1981) utilisée pour le calcul de la densité apparente semble donner des bons résultats qui sont dans la gamme de la valeur moyenne décrites pour chaque texture des sols en fonction des horizons. Dupouey et *al.*, (1997) rapportent un coefficient de détermination R² de 0,75 entre la densité mesurée et celle du modèle de Harrison et Bocock, (1981). De même, Brady & Weil, (2008) indiquent que la densité apparente dans les sols agricoles varie normalement entre 1,2 et 1,5 g/cm³ dans les horizons des surfaces.

La rétention de l'eau dans les sols a varié entre 0,275 et 0,282 cm³/cm³ pour la capacité au champ et de 0,122 à 0,174 cm³/cm³ au point de flétrissement (tableau 6). Les blocs à fortes teneurs en argile ont enregistré des valeurs élevées en teneur d'eau au point de flétrissement. Ceci pourrait être dû à la forte capacité de fixation de l'eau par les particules argileuse (Brady & Weil, 2008). Ce qui implique absolument une bonne structure pour augmenter la réserve en

eau utile aux plantes. D'ailleurs, il a été constaté sur ces parcelles des valeurs faibles de la réserve en eau du sol comparativement au sol limono-argileux. La réserve en eau utile, a varié entre 1,06 à 1,57 mm/cm. La valeur la plus élevée de la réserve en eau utile a été obtenue sur le sol limono-argileux soit dans le bloc I et la plus faible dans le sol argilo-limoneux (bloc A). La validité des fonctions de pédotransfert a été établie par plusieurs chercheurs (Qiao et *al.*, 2019 ; Gebauer et *al.*, 2020 ; Kotlar et *al.*, 2020. ; Nasta et *al.*, 2020 ; Reichert et *al.*, 2020). De plus Rawls et *al.*, (1982) et Williams et *al.*, (1992) indiquent que les fonctions de pédotransfert qui prennent en considération les caractéristiques de constitution et la teneur en eau à la capacité au champs et la teneur en eau au point de flétrissement mènent à une prédiction moins biaisée et une plus grande précision comparativement à d'autres méthodes.

3.5. Indice de végétation NDVI dans le site

Les résultats de l'indice de végétation NDVI (figure 19), qui a permis d'une part de comprendre les rendements obtenus dans les différents blocs et a révélé des faibles valeurs sur des surfaces à mauvais drainage interne constaté sur le bloc A se trouvant près de la rivière. Ce qui a conduit à la mortalité des plantes par asphyxie et laissant le sol nu à certains endroits du bloc. Des recherches montrent que lorsque les plantes se trouvent dans des conditions d'hydromorphie, ceci conduit à leur mortalité (Ayars et *al.*, 2006 ; Darzi-Naftchali et *al.*, 2013). Des faibles valeurs de NDVI ont été également observées sur la route, les allées dans les champs et sur des zones qui ont été ripées dont les blocs de latérite n'ont pas été complètement déplacés du champ. Des valeurs très fortes de NDVI ont été observées sous forme de tâches sur les termitières qui sont couvertes d'herbes. Il a été prouvé que les sols des termitières sont riches en éléments minéraux (de Lima et *al.*, 2018 ; Li et *al.*, 2017 ; Subi & Sheela, 2020) ce qui expliquerait les fortes valeurs de NDVI à ces endroits. De valeurs suffisamment normales ont été enregistrées dans les champs (complètement dans le bloc B) et au niveau de la végétation naturelle. Ces résultats mettent en évidence l'importance de la télédétection dans l'ajustement d'un modèle de croissance (Batchelor et *al.*, 2002 ; Huang et *al.*, 2013 ; Kasampalis et *al.*, 2018 ; Veerakachen & Raksapatcharawong, 2020). Ce qui a permis d'expliquer le rendement obtenu dans chaque parcelle.

3.6. Évaluation du stress de fertilité au cours de la culture

Bien que le modèle AquaCrop fait une relation production de biomasse stress de fertilité, il n'intègre pas les différentes éléments constitutif de la fertilité chimique du sol. Pourtant, la fertilité des sols est très importante pour la croissance et le développement des cultures et est à la basse de l'augmentation des rendements des cultures. Par contre le stress de la fertilité des

sols conduit à une réduction significative de rendement agricole (Sanchez, 1976 ; Boissezon et al., 1991 ; Bonanomi et al., 2020 ; Kandil et al., 2020). Les résultats obtenus ont montré des stress de fertilité des sols très importants qui seraient responsables de la baisse des rendements obtenus (tableau 7). Plusieurs études conduites dans la région de Lubumbashi ont soulignés que la pauvreté des sols est le premier facteur responsable des faibles rendements enregistrés (Kasongo et al., 2013 ; Useni et al., 2014 ; lunga et al., 2015 ; Banza et al., 2019 ; Kasongo et al., 2019).

Les résultats de calcul de prévision du stress de fertilité du sol en fonction de la teneur en matière organique a montré un coefficient de détermination pas très forte ($R^2 = 25\%$), car 76% dépendant d'autres facteurs (figure 20). Ainsi, ce modèle qui est encore limité, pourrait être amélioré en associant d'autres variables pertinentes de la fertilité du sol sur une quantité suffisante des données.

3.5. Simulation de rendement avec AquaCrop

Les résultats des simulations des rendements en maïs grain avec le modèle AquaCrop ont montré un écart faible entre les rendements de maïs mesurés et simulés. Les rendements mesurés ont varié de 4,1 à 9,73 t/ha et les rendements simulés entre 4,99 et 10,22 t/ha (tableau 8). Ce qui traduit l'efficacité du modèle AquaCrop à simuler les rendements des toutes les cultures dans toutes les conditions environnementales (Pereira et al., 2015 ; Tsakmakis et al., 2019 ; Akinbile et al., 2020 ; de Sales et al., 2020 ; Han et al., 2020 ; Jalil et al., 2020 ; López-Urrea et al., 2020 ; Rosa et al., 2020 ; Zhao et al., 2020). Ce résultat est appuyé par le coefficient de détermination R^2 obtenu de 0,945 et de l'erreur moyenne de prédiction de 14 %. La précision de la simulation du rendement avec le modèle AquaCrop réside dans la calibration et ceci a été confirmé par plusieurs chercheurs (Abi Saab et al., 2015 ; Chibarabada et al., 2020 ; de Sales et al., 2020 ; Saadati et al., 2011). Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par d'autres chercheurs. Abedinpour et al., (2012) ; Oiganji et al., (2016) ; Babel et al., (2019) et Sandhu & Irmak, (2019) rapportent respectivement une valeur de R^2 de 0,90 ; 0,82 ; 0,87 et 0,99 sur la culture de maïs ; Araya et al., (2010) rapportent une valeur de R^2 de 0,80 sur la culture de l'orge ; López-Urrea et al., (2020) rapportent une valeur de R^2 de 0,91 sur l'orge. La valeur moyenne de l'erreur de prédiction trouvée pour tous les blocs de maïs a été inférieure à 15% (Andarzian et al., 2011 ; Abedinpour et al., 2012 ; Oiganji et al., 2016 ; de Sales et al., 2020). Bien que le modèle ait l'air de marché bien correctement, il est difficile de le valider sur ces données ce qui nécessite une autre étude sur beaucoup de parcelles.

Les rendements potentiels ont varié entre 13,17 et 14,6 t/ha. Les variations entrent les rendements potentiels dans les blocs pourraient être expliqués par les cycles des cultures des différentes variétés de maïs utilisés, les effets des dates de semis et de la rétention en eau du sol. Malgré que cette dernière soit pédologique, elle n'est pas assimilable à la fertilité chimique du sol. Steduto et *al.*, (2007) ; Raes et *al.*, (2009) ; Hsiao et *al.*, (2009) ; Raes et *al.*, (2012) signalent qu'une variation des données liées à la culture et aux sols peut induire des différences sur les résultats des simulations.

Conclusion

L'objectif de cette étude était de simuler le rendement en maïs grain à Lubumbashi, République Démocratique du Congo. Le modèle AquaCrop développé par la FAO a été utilisé pour sa robustesse, sa simplicité et sa quantité réduite des données d'entrée. L'étude a été menée à la ferme Ubuntu pour la saison culturelle 2016-2017. Les données météorologiques ont été obtenues de la base des données satellitaires de la NASA pour les années 2016 et 2017. Les données d'analyses des sols ainsi que les fonctions de pédotransfert et les données de trois variétés de maïs cultivées dans 7 blocs ont été utilisés dans le modèle. Le calibrage du modèle a été effectué par variété de maïs et a consisté à ajuster les paramètres les plus sensibles de la culture.

Les résultats ont montré pour les variables climatiques observées dans le site sont restées dans les moyennes observées dans la région de Lubumbashi. L'évapotranspiration de référence enregistrée pendant la période d'étude a montré un maximum de 8,73 mm/jour et un minimum de 1,29 mm/jour avec une moyenne de 6,35 mm d'eau par jour. Malgré cela, l'analyse de stress hydrique a montré que les plantes n'ont pas manifesté de signe de stress hydrique durant la culture. Les rendements en maïs grains dans le site ont varié entre 4,1 et 9,73 t/ha. Une influence de la matière organique du sol sur les rendements a été observée. Les résultats des fonctions de pédotransfert ont révélé une densité apparente des sols de 1,42 à 1,58 g/cm³ et une réserve en eau utile de 1,06 à 1,57 mm/cm dans la couche superficielle dans les différents blocs de maïs. Ce qui a laissé la zone racinaire, toujours humide jusqu'à diminution progressive vers la fin de la culture. Les résultats de NDVI ont montré des zones à couverture végétale normale et des surfaces à problème dans les blocs au cours de la culture ce qui a permis d'une part de comprendre les rendements obtenus. Le stress de fertilité de sol a été à la basse des réductions des rendements observés. La fonction logarithmique proposée pour l'estimation du stress de fertilité en fonction de la teneur en matière organique étant donné que le modèle AquaCrop ne prends pas en compte les caractéristiques de la fertilité du sol, a montré une corrélation faible ($R^2 = 25\%$) ce qui relève que la matière organique du sol n'explique pas à lui seul le stress de fertilité. Ceci nécessite une étude expérimentale permettant de mieux clarifier cette situation. Les résultats des simulations des rendements en maïs grain avec AquaCrop ont montré que le modèle a du potentiel de simuler les rendements en maïs grain dans la région de Lubumbashi avec $R^2 = 0,94$ et une erreur moyenne de prédiction $Pe = 14\%$.

Bien que le modèle ait bien marché, il a été difficile de faire une validation car, celle-ci nécessite une quantité suffisante des parcelles d'observation. Ainsi, cette étude constitue une première

phase, de calibration du modèle et la validation sera effectuée sur les données de la saison culturelle 2019-2020 en cours dans les mêmes conditions.

Au regard de l'importance de cette étude, quelques perspectives sont formulées ci-dessous :

1. Améliorer la méthodologie de détermination du stress de fertilité en évaluant la possibilité d'y intégrer d'autres variables pertinentes de la fertilité chimique des sols (somme des cations basiques échangeables, éléments majeurs, etc.) ;
2. Améliorer le modèle AquaCrop en intégrant les possibilités de réaliser les simulations des rendements du maïs en association avec le manioc ou les légumineuses telle que cultivées dans le milieu paysan Congolais ;
3. Améliorer le modèle AquaCrop en tenant compte du niveau socio-économique de la conduite de la culture du maïs dans la simulation de ses rendements (afin de nuancer les simulations de l'agriculture commerciale moderne à celles des petits paysans ruraux).

Références

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H., & Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- Abi Saab, M. T., Todorovic, M., & Albrizio, R. (2015). Comparing aquaCrop and cropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes: Does calibration year influence the performance of crop growth models? *Agricultural Water Management*, 147, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.001>
- Abrahamsen, P., & Hansen, S. (2000). Daisy: An open soil-crop-atmosphere system model. *Environmental Modelling and Software*, 15(3), 313–330. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00003-7)
- Adrille, T.S. (2003). Projet de production des semences des cultures minières en faveur des agriculteurs, Lubumbashi, R.D.C. 32p
- Akinbile, C. O., Ogundipe, A., & Davids, R. O. (2020). Crop water requirements, biomass and grain yields estimation for upland rice using CROPWAT, AQUACROP and CERES simulation models. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 22(2), 1–20.
- Akinbile, O. C., & Sangodoyin, A. Y. (2011). Response of upland rice agronomic parameters to variable water supply. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 4(2), 50–58. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2011.02.0-0>
- Akponikpe, P. B. I., Michels, K., & Bielders, C. L. (2008). Integrated nutrient management of pearl millet in the Sahel combining cattle manure, crop residue and mineral fertilizer. *Experimental Agriculture*, 44(4), 453–472. <https://doi.org/10.1017/S001447970800673X>
- Al Majou, H., Kaba, R., Almesber, W., & Bruand, A. (2016). Validité de l'estimation des propriétés de rétention en eau de sols syriens à partir de fonctions et classes de pédotransfert développées pour des sols français. *Etude et Gestions Des Sols, Association Française Pour l'étude Des Sols*, 23, 112–123.
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World Agriculture Towards 2030/2015: The 2012 Revision. *ESA Working Paper*, 12, No. 12-03. [https://doi.org/10.1016/S0264-8377\(03\)00047-4](https://doi.org/10.1016/S0264-8377(03)00047-4)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Dirk, R., & Martin, S. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* - (F.-F. and A. O. of the U. Nations (ed.)).
- Amanabadi, S., Vazirinia, M., Vereecken, H., Vakilian, K. A., & Mohammadi, M. H. (2019).

- Comparative Study of Statistical, Numerical and Machine Learning-based Pedotransfer Functions of Water Retention Curve with Particle Size Distribution Data. *Eurasian Soil Science*, 52(12), 1555–1571. <https://doi.org/10.1134/S106422931930001X>
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., & Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), 1838–1846. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.021>
- Arredondo, T., Delgado-Balbuena, J., Kimball, B., Luna-Luna, M., Yepez-Gonzalez, E., Huber-Sannwald, E., García-Moya, E., & Garatuza-Payan, J. (2020). Late sowing date as an adaptive strategy for rainfed bean production under warming and reduced precipitation in the Mexican Altiplano? *Field Crops Research*, 255(July), 107903. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107903>
- Aubreville, A. (1957). Echos du Congo belge : Climax yangambiens- Muhulus, termitières fossiles géantes et forêt claire Katanguiens. *Bois Forêts Trop*, 51, 28–39
- Autrique, A. & Perreux, D. (1989). Maladies et ravageurs des cultures de la région des Grands Lacs d'Afrique Centrale, Bruxelles : DGCD, *Publications du service agricole*, n°24, 232.
- Ayars, J. E., Christen, E. W., & Hornbuckle, J. W. (2006). Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 86(1–2), 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.07.004>
- Babel, M. S., Deb, P., & Soni, P. (2019). Performance Evaluation of AquaCrop and DSSAT-CERES for Maize Under Different Irrigation and Manure Application Rates in the Himalayan Region of India. *Agricultural Research*, 8(2), 207–217. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0366-y>
- Badibanga, T., & Ulimwengu, J. (2020). Optimal investment for agricultural growth and poverty reduction in the democratic republic of congo a two-sector economic growth model. *Applied Economics*, 52(2), 135–155. <https://doi.org/10.1080/00036846.2019.1630709>
- Badu-Apraku, B., & Fakorede M.A.B. (2006). *Zea mays* L. Fiche de Protibase. Brink, M. & Belay, G. (Editeurs). PROTA (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l'Afrique tropicale), Wageningen, Pays Bas.

- Badu-Apraku, B., Fakrede, M. A. B., Ouedraogo, M., Carsky, R. J., & Menkir, A. (2003). *Maize revolution in West and Central Africa Proceedings of a regional maize workshop*, IITA Cotonou, Benin Republic, 14–18 May, 2001. WECAMAN / IITA, Ibadan Nigeria. 566 p.
- Bah, H., Zhou, M., Ren, X., Hu, L., Dong, Z., & Zhu, B. (2020). Effects of organic amendment applications on nitrogen and phosphorus losses from sloping cropland in the upper Yangtze River. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 302(July), 107086. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107086>
- Bai, Z., Fang, S., Gao, J., Zhang, Y., Jin, G., Wang, S., Zhu, Y., & Xu, J. (2020). Could Vegetation Index be Derive from Synthetic Aperture Radar? – The Linear Relationship between Interferometric Coherence and NDVI. *Scientific Reports*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63560-0>
- Bangata, B., Ngbolua, K., Mawa, M., Minengu, M., & Mocabambo, K. (2013). Etude comparative de la nodulation et du rendement de quelques variétés d'arachide (*Arachis hypogaea* L., Fabaceae) cultivées en conditions éco-climatiques de Kinshasa, République Démocratique du Congo. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(3), 1034. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v7i3.11>
- Banza, M. J., Mwamba, K. F., Esoma, E. B., Meta, T. M., Mayamba, M. G., & Kasongo, L. M. E. (2019). Evaluation de la réponse du maïs (*Zea mays* L.) installé entre les haies de *Tithonia diversifolia* à Lubumbashi, R.D. Congo. *Journal of Applied Biosciences*, 134(1), 13643. <https://doi.org/10.4314/jab.v134i1.3>
- Barbottin, A. (2004). *Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des genotypes : Pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre* Aude Barbottin To cite this work. Institut National Agronomique Paris-Grignon.
- Bastet, G., Bruand, a, Quétin, P., & Cousin, I. (1998). Estimation des propriétés de rétention en eau des sols l'aide des fonctions de pédotransfert (FPT) : une analyse bibliographique. *Etude et Gestion Des Sols*, 5(1), 1–24. http://www.inra.fr/internet/Hebergement/afes/pdf/EGS_5_1_BASTET.pdf
- Batchelor, W. D., Basso, B., & Paz, J. O. (2002). Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy*, 18(1–2), 141–158. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00101-6)
- Battude, M., Al Bitar, A., Morin, D., Cros, J., Huc, M., Marais Sicre, C., Le Dantec, V., Demarez, V., 2016. Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial

- and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. *Remote Sens. Environ.*, 184, 668–68. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.030>
- Benabdouahab, T., Balaghi, R., Hadria, R., Lionboui, H., Djaby, B., & Tychon, B. (2016). Testing Aquacrop to Simulate Durum Wheat Yield and Schedule Irrigation in a Semi-Arid Irrigated Perimeter in Morocco. *Irrigation and Drainage*, 65(5), 631–643. <https://doi.org/10.1002/ird.1977>
- Benz, B., Sanchez-Velasquez, L., Santana Michel, F. (1990). Ecology and ethnobotany of *Zea diploperennis*: preliminary investigations. *Maydica*, 35 (2), 85-98.
- Boissezon, P. De, Bellier, G., & Brion, J. (1991). Capacité d ' échange cationique provenant de l ' enfouissement de paille de luzerne dans le sol. *Cah. Orstom, Sér. Pédol.*, XXVI(3), 263–280.
- Bonanomi, G., De Filippis, F., Zotti, M., Idbella, M., Cesarano, G., Al-Rowaili, S., & Abd-ElGawad, A. (2020). Repeated applications of organic amendments promote beneficial microbiota, improve soil fertility and increase crop yield. *Applied Soil Ecology*, 156(July), 103714. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103714>
- Bonhomme, R., Drouet, T., & Améglio, T. (1995). Introduction à la modélisation du fonctionnement physiologique d'un couvert. Ecole des chercheurs INRA. Tome 1: *de la plante au couvert végétal*. INRA, Actes, Le Croisic, pp. 647-669
- Botula, Y., Cornelis, W. M., Baert, G., & Ranst, E. Van. (2012). Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). *Agricultural Water Management*, 111, 1–10.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils* (U. 14th Ed. Pearson Prentice Hall, New Jersey (ed.); Fourteenth).
- Bultot, F. (1950). Carte des régions climatiques du Congo Belge établie d'après les critères de Köppen. Bruxelles : Institut National pour l'étude Agronomique au Congo-Belge, Bureau climatique.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2009). Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model. In *Editons Quae* (Quæ Inra,). <http://www.quae.com/en/r1291-conceptual-basis-formalisations-and-parameterization-of-the-stics-crop-model.html>
- Bruand, A., Perez Fernandez, P., Duval, O., Quétin, P., Nicoullaud, B., Gaillard, H., Raison, L., Pessaud, J. F., & Prud'homme, L. (2002). Estimation des propriétés de rétention en eau des sols : Utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *Etude et Gestion Des Sols*, 9(2), 105–125.

- Brooks, R.R., & Malaisse, F. (1985). *The Heavy Metal-Tolerant Flora of South-central Africa. A Multidisciplinary Approach*. Balkema. Rotterdam. 199 pp.
- Brzozowska, I., & Brzozowski, J. (2020). Content of macronutrients in winter wheat grain depending on the sowing date and level of npk fertilization*. *Journal of Elementology*, 25(1), 7–19. <https://doi.org/10.5601/jelem.2019.24.3.1826>
- Carney, M. A., & Krause, K. C. (2020). Immigration/migration and healthy publics: the threat of food insecurity. *Palgrave Communications*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.1057/s41599-020-0461-0>
- Cushman J.C., & Bohnert, H.J. (2000). Genomic approaches to plant stress tolerance. *Current Opinion in Plant Biology*, 3, 117- 124.
- Chahbi, A., Zribi, M., Lili-Chabaane, Z., Duchemin, B., Shabou, M., Mougenot, B., & Boulet, G. (2014). Estimation of the dynamics and yields of cereals in a semi-arid area using remote sensing and the SAFY growth model. *International Journal of Remote Sensing*, 35(3), 1004–1028. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.875629>
- Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B., & Eklundh, L. (2004). A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 91(3–4), 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.014>
- Chibarabada, T. P., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2020). Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281(November 2019), 107850. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107850>
- Cooper, M. W., Brown, M. E., Niles, M. T., & ElQadi, M. M. (2020). Text mining the food security literature reveals substantial spatial bias and thematic broadening over time. *Global Food Security*, 26(April), 100392. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100392>
- Dao, A., Guira, A., Alvar-Beltrán, J., Gnan-Da, A., Nebie, L., & Sanou, J. (2020). Quinoa's response to different sowing periods in two agro-ecological zones of Burkina Faso. *Italian Journal of Agrometeorology*, 2020(1), 63–72. <https://doi.org/10.13128/ijam-731>
- Darzi-Naftchali, A., Mirlatifi, S. M., Shahnazari, A., Ejlali, F., & Mahdian, M. H. (2013). Effect of subsurface drainage on water balance and water table in poorly drained paddy fields. *Agricultural Water Management*, 130, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.017>
- de Lima, S. S., Pereira, M. G., Pereira, R. N., DE Pontes, R. M., & Rossi, C. Q. (2018). Termite mounds effects on soil properties in the atlantic forest biome. *Revista Brasileira de Ciencia*

- Do Solo*, 42, 1–14. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160564>
- de Sales, R. A., Xavier, A. C., de Oliveira, E. C., De Oliveira, F. L., da Silva, D. M. N., & Berilli, S. da S. (2020). Calibration and validation of FAO-aquacrop model to estimate the total biomass and yacon root yield. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(3), 123–128. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201303.5012>
- de Wit, C. T., Brouwer, R., & de Vries, F. W. T. (1970). The simulation of photosynthetic systems. *Wageningen*, 47–70. <https://edepot.wur.nl/198106>
- Dewayani, W., Septianti, E., Syamsuri, R., & Halil, W. (2020). The effect of soybean varieties and flavors on tempeh milk powder. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 484(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/484/1/012071>
- Dharmaraja, S., Jain, V., Anjoy, P., & Chandra, H. (2020). Empirical Analysis for Crop Yield Forecasting in India. *Agricultural Research*, 9(1), 132–138. <https://doi.org/10.1007/s40003-019-00413-x>
- Doocy, S., Cohen, S., Emerson, J., Menakuntuala, J., Rocha, J. S., Klemm, R., Stron, J., Brye, L., Funna, S., Nzanzu, J. P., Musa, E., Caulfield, L., & Colantouni, E. (2017). Food security and nutrition outcomes of farmer field schools in eastern democratic republic of the Congo. *Global Health Science and Practice*, 5(4), 630–643. <https://doi.org/10.9745/GHSP-D-17-00203>
- Doocy, S., Emerson, J., Colantouni, E., Strong, J., Amundson-Mansen, K., & Menakuntuala, J. (2019). Evaluating interventions to improve child nutrition in Eastern Democratic Republic of Congo. *Public Health Nutrition*, 22(1), 3–14. <https://doi.org/10.1017/S1368980018002859>
- Dridi, B., & Zemmouri, S. (2012). Fonctions de pédotransfert pour les vertisols de la plaine de la Mitidja (Algérie): Recherche de paramètres les plus pertinents pour la rétention en eau. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 16(2), 193–201.
- Dupouey, J., Thimonier, A., & Behr, P. (1997). Variations de la densité des sols des hêtraies du nord-est de la France en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques. *Etude et Gestion Des Sols*, 4, 43–52. http://www.afes.fr/afes/egs/EGS_4_1_DUPOUEY.pdf
- El Jarroudi, M., Delfosse, P., De Recherche, C., Maraite, H., Hoffmann, L., & Tychon, B. (2009). Assessing the accuracy of simulation model for septoria leaf blotch disease progress on winter wheat. *Plant Disease*, 93(10), 983–992. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-10-0983>
- FAO. (2005). New_LocClim: Local Climate Estimator. FAO Environment and Natural Resources Working Paper, N° 20.

- FAOSTAT. (2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Division de Statistique. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Consulté le 17 Juillet 2020.
- Estévez, J., Gavilan, P., & Berengena, J. (2009). Sensitivity analysis of a Penman–Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. *HYDROLOGICAL PROCESSES*, 23, 3342–3353. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Fatondji, D., Martius, C., Bielders, C. L., Vlek, P. L. G., Bationo, A., & Gerard, B. (2006). Effect of planting technique and amendment type on pearl millet yield, nutrient uptake, and water use on degraded land in Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76(2–3), 203–217. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-6209-9>
- Fatondji, D., Martius, C., Zougmore, R., Vlek, P. L. G., Bielders, C. L., & Koala, S. (2009). Decomposition of organic amendment and nutrient release under the zai technique in the Sahel. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 85(3), 225–239. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9261-z>
- Fleitas, M. C., Mondal, S., Gerard, G. S., Hernández-Espinosa, N., Singh, R. P., Crossa, J., & Guzmán, C. (2020). Identification of CIMMYT spring bread wheat germplasm maintaining superior grain yield and quality under heat-stress. *Journal of Cereal Science*, 93(February). <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102981>
- French, A. N., Hunsaker, D. J., Sanchez, C. A., Saber, M., Gonzalez, J. R., & Anderson, R. (2020). Satellite-based NDVI crop coefficients and evapotranspiration with eddy covariance validation for multiple durum wheat fields in the US Southwest. *Agricultural Water Management*, 239(February), 106266. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106266>
- Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N., & Christy, A. (2015). Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis - A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*, 57, 1199–1210. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>
- Galinat, W. C. (1899). The origin of corn. Corn and corn improvement. *Agronomy Monographs*, 18, 1-31.
- García-León, D., López-Lozano, R., Toreti, A., & Zampieri, M. (2020). Local-scale cereal yield forecasting in Italy: Lessons from different statistical models and spatial aggregations. *Agronomy*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy10060809>
- Gebauer, A., Ellinger, M., M. Brito Gomez, V., & Ließ, M. (2020). Development of pedotransfer functions for water retention in tropical mountain soil landscapes: Spotlight on parameter tuning in machine learning. *Soil*, 6(1), 215–229. <https://doi.org/10.5194/soil-6-215-2020>

- Geerts, S., Raes, D., & Garcia, M. (2010). Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agricultural Water Management*, 98(1), 213–216. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.003>
- Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., & Nelson, S. G. (2008). Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4), 2136–2160. <https://doi.org/10.3390/s8042136>
- Gong, L., Xu, C. yu, Chen, D., Halldin, S., & Chen, Y. D. (2006). Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 620–629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.027>
- Goulet, É., Morlat, R., Rioux, D., & Cesbron, S. (2004). *Méthode De Calcul De La Réserve Utile En Eau Des Sols : Application À La Cartographie Des Terroirs Viticoles Du Val De Loire a Calculation Method of Available Soil Water Content : Application To Viticultural Terroirs Mapping of the Loire Valley*. 231–235.
- Gupta, S.C., & Larson, W.E., (1979). Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resources Research*, 15, 1633–1635.
- Grados, D., Reynarfaje, X., & Schrevens, E. (2020). A methodological approach to assess canopy NDVI-based tomato dynamics under irrigation treatments. *Agricultural Water Management*, 240(April), 106208. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106208>
- Gross, A. (1967). *Guide pratique de la fertilisation*. Ed. Maison Rustique, éd 4. Paris, 1325p
- Hadebe, S. T., Mabhaudhi, T., & Modi, A. T. (2020). Sorghum best practice management recommendations based on AquaCrop modeling scenario analysis in various agro-ecologies of KwaZulu Natal, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 117, 102866. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102866>
- Hall, D.G., Reeve, M.J., Thomasson, A.J., & Wright, V.F. (1977). Water retention, porosity and density of field soils. Tech. Monograph N9. *Soil Survey of England & Wales*, 75.
- Han, C., Zhang, B., Chen, H., Liu, Y., & Wei, Z. (2020). Novel approach of upscaling the FAO AquaCrop model into regional scale by using distributed crop parameters derived from remote sensing data. *Agricultural Water Management*, 240(January), 106288. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106288>
- Hanks, R.J., Klute, A. et Bresler, E. (1969). A numeric method for estimating infiltration redistribution drainage and evaporation of water soil. *Water Ressources Res*.5 (5)

Pp.1064-1069.

- Harmand, J., Njiti, C. F., Bemard-reversat, F., Feller, C., & Robert, O. (2000). Variations de stock de carbone dans le sol au cours du cycle jachère arborée-culture : zone soudanienne du Cameroun. *La Jachère En Afrique Tropicale, Session 8, March*, 706–713.
- Harrison, A. F., & Bocock K.L. (1981). Estimation of soil bulk density using irregular hole, paraffin clod, and air permeability, *Forest Sci*, 27, 316-322
- Hayes, A. M. R., Gundersen, C., Coleman-Jensen, A., Miller, D., & Eicher-Miller, H. (2020). Session 3 discussion: food insecurity. *Physiology and Behavior*, 224(July). <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2020.113051>
- Hiel, M. P., Barbeau, S., Pierreux, J., Olivier, C., Lobet, G., Roisin, C., Garré, S., Colinet, G., Bodson, B., & Dumont, B. (2018). Impact of crop residue management on crop production and soil chemistry after seven years of crop rotation in temperate climate, loamy soils. *PeerJ*, 2018(5), 1–23. <https://doi.org/10.7717/peerj.4836>
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop- The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Huang, J., Wang, X., Li, X., Tian, H., & Pan, Z. (2013). Remotely Sensed Rice Yield Prediction Using Multi-Temporal NDVI Data Derived from NOAA's-AVHRR. *PLoS ONE*, 8(8), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070816>
- Hussein, F., Janat, M., & Yakoub, A. (2011). Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), 1319. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110904-358-10>
- Ilunga, T. H., Banza, M. J., Lukusa, M. L., Mukunto, K. I., Malonga, H. L., Kanyenga, L. A., & Nyembo, K. L. (2019). Influence du moment d'application du NPK sur la croissance et le rendement du maïs (*Zea mays* L.) installé sur un ferralsol. *Journal of Applied Biosciences*, 127(1), 12794. <https://doi.org/10.4314/jab.v127i1.4>
- Ilunga, T. H., Muganguz, N. T., Kidinda, K. L., Banza, M. J., Nsenga, N. S., Mpoyo, M. G., Tshipama, T. D., Lukusa, M. L., & Nyembo, K. L. (2015). Evaluation of Maize Response (*Zea mays* L.) to Various Modes and Moments of Chicken Manure Spreading in Lubumbashi, DR Congo. *American Journal of Plant Nutrition and Fertilization Technology*, 5(3), 96–105. <https://doi.org/10.3923/ajpnft.2015.96.105>
- Imhoff, R. O., van Verseveld, W. J., van Osnabrugge, B., & Weerts, A. H. (2020). Scaling Point-Scale (Pedo)transfer Functions to Seamless Large-Domain Parameter Estimates for High-Resolution Distributed Hydrologic Modeling: An Example for the Rhine River.

- Water Resources Research*, 56(4), 1–28. <https://doi.org/10.1029/2019WR026807>
- Iqbal, M. A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., & del Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*, 135, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.012>
- Iriany, R. N., Azrai, M., & Makkulawu, A. T. (2020). Genotypic diversity, heritability and agronomic performance high-oil maize populations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 484(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/484/1/012010>
- Jalil, A., Akhtar, F., & Awan, U. K. (2020). Evaluation of the AquaCrop model for winter wheat under different irrigation optimization strategies at the downstream Kabul River Basin of Afghanistan. *Agricultural Water Management*, 240(June), 106321. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106321>
- Jerszurki, D., de Souza, J. L. M., & Silva, L. de C. R. (2019). Sensitivity of ASCE-Penman–Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. *Climate Dynamics*, 53(1–2), 943–956. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>
- Jeuffroy, M.-H., Bergez, J.E., David, C., Flénet, F., Gate, P., Loyce, C., Maupas, F., Meynard, J.M., Reau, R., & Surleau-Chambenoit, C. (2008). Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : bilan et perspectives. In: Reau, R. and Doré, T. (Eds.), *Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer?* Educagri, Dijon, pp. 110-128.
- Jin, X., Li, Z., Feng, H., Ren, Z., & Li, S. (2020). Estimation of maize yield by assimilating biomass and canopy cover derived from hyperspectral data into the AquaCrop model. *Agricultural Water Management*, 227(June 2019), 105846. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105846>
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. In *European Journal of Agronomy* (Vol. 18, Issues 3–4). [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Juhász, C., Gálya, B., Kovács, E., Nagy, A., Tamás, J., & Huzsvai, L. (2020). Seasonal predictability of weather and crop yield in regions of Central European continental climate. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173(June 2019), 105400. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105400>
- Kabre P.S. (2007). Evaluation de variétés de maïs (*Zea mays L.*) riches en protéines de qualité pour une amélioration de la valeur nutritive du maïs au Burkina Faso

- Kadigi, I. L., Richardson, J. W., Mutabazi, K. D., Philip, D., Bizimana, J. C., Mourice, S. K., & Waized, B. (2020). Forecasting yields, prices and net returns for main cereal crops in Tanzania as probability distributions: A multivariate empirical (MVE) approach. *Agricultural Systems*, 180(October 2018), 102693. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102693>
- Kaly, E., Malou, R., & Akpo, L. (2016). Évaluation du modèle AquaCrop de la FAO en riziculture irriguée dans le Delta du Fleuve Sénégal. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 30(3), 4781–4796.
- Kandil, E. E., Abdelsalam, N. R., Mansour, M. A., Ali, H. M., & Siddiqui, M. H. (2020). Potentials of organic manure and potassium forms on maize (*Zea mays* L.) growth and production. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65749-9>
- Kang, Y., Ozdogan, M., Zhu, X., Ye, Z., Hain, C., & Anderson, M. (2020). Comparative assessment of environmental variables and machine learning algorithms for maize yield prediction in the US Midwest. *Environmental Research Letters*, 15(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7df9>
- Kang, Y., Özdogan, M., Zipper, S. C., Román, M. O., Walker, J., Hong, S. Y., Marshall, M., Magliulo, V., Moreno, J., Alonso, L., Miyata, A., Kimball, B., & Loheide, S. P. (2016). How universal is the relationship between remotely sensed vegetation indices and crop leaf area index? A global assessment. *Remote Sensing*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/rs8070597>
- Kasampalis, D. A., Alexandridis, T. K., Deva, C., Challinor, A., Moshou, D., & Zalidis, G. (2018). Contribution of remote sensing on crop models: A review. *Journal of Imaging*, 4(4). <https://doi.org/10.3390/jimaging4040052>
- Kasongo, L. M. E. (2008). *Evaluation des terres à multiples échelles pour la détermination de l'impact de la gestion agricole sur la sécurité alimentaire au Katanga, R. D. Congo* [Thèse de Doctorat, Université de Gent]. <https://biblio.ugent.be/publication/607168/file/1883108>
- Kasongo, L. M. E., Banza, M. J., Meta, T. M., Mukoke, T. H., Kanyenga, F., Mayamba, M. G., Mwamba, K. F., & Mazinga, K. M. (2019). Sensibilité de la culture pluviale du maïs (*Zea mays* L.) aux effets des épisodes secs sur un Ferralsol sous amendement humifère à Lubumbashi. *Ournal of Applied Biosciences*, 140, 14316–14326.
- Kasongo, L. M. E., Mwamba Mulembo, T., Tshipoya Masumbuko, P., Mukalay Muamba, J., Useni Sikuzani, Y., Mazinga Kwey, M., & Nyembo Kimuni, L. (2013). Réponse de la culture de soja (*Glycine max* L. (Merril) à l'apport des biomasses vertes de *Tithonia*

- diversifolia (Hemsley) A . Gray comme fumure organique sur un. *Journal of Applied Biosciences*, 63, 4727–4735.
- Katerji, N., Campi, P., & Mastrorilli, M. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.005>
- Kiniry, J. R., Ritchie, J. T., Musser, R. L., Flint E. P., Iwig W. C. (1983). The Photoperiod Sensitive Interval in Maize. *Agronomy journal*, 75(4), 687-690. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500040026x>Citations: 10
- Kolodiy, P., & Pidlypna, M. (2020). The improvement of the agricultural yields forecasting model using the software product “land viewer.” *Geomatics and Environmental Engineering*, 17(1), 59–67. <https://doi.org/10.7494/geom.2020.14.1.59>
- Kotlar, A. M., de Jong van Lier, Q., & de Souza Brito, E. (2020). Pedotransfer functions for water contents at specific pressure heads of silty soils from Amazon rainforest. *Geoderma*, 361(November 2019), 114098. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114098>
- Kouadio, A. L. (2012). *Prévisions des rendements du blé d'hiver à échelle régionale par modélisation de la courbe de chute de l'indice foliaire*. Université de Liège Faculté.
- Koull, N., & Halilat, M. T. (2016). Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d ' Ouargla (Algérie). *Etude et Gestion Des Sols*, 23, 9–20. http://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/09/EGS_23_1_2301_koull_9_20_HDrefait2.pdf
- Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017). Interrelationship of rainfall, temperature and reference evapotranspiration trends and their net response to the climate change in Central India. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(3–4), 879–900. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1924-5>
- Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017). Interrelationship of rainfall, temperature and reference evapotranspiration trends and their net response to the climate change in Central India. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(3–4), 879–900. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1924-5>
- Kling J.G., Edmeades G., 1997. Morphology and growth of maize. 2nd Edition. IITA/CIMMYT Research Guide No 9. IITA, Ibadan, Nigeria. 36 pp.
- Kwey, M. M., Kalala, S., & Banza, J. (2015). Etude de cas sur l'impact des amendements organiques vis-à-vis de la salinité en culture de bananier. *Afrique Science: Revue Internationale Des Sciences et Technologie*, 11(3), 152–160.

- Leblanc, M., & Malaisse, F. (1978). *Lubumbashi, un écosystème urbain tropical*. 95–96.
- Li, B., Xu, X., Zhang, L., Han, J., Bian, C., Li, G., Liu, J., & Jin, L. (2020). Above-ground biomass estimation and yield prediction in potato by using UAV-based RGB and hyperspectral imaging. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 162(May 2019), 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.02.013>
- Li, Y., Dong, Z. Y., Pan, D. Z., Pan, C. H., & Chen, L. H. (2017). Effect of termite on soil pH and its application for termite control in Zhejiang Province, China. *Sociobiology*, 64(3), 317–326. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v64i3.1674>
- Lijun, Z., Meng, J., & Zhu, L. (2020). Applying Geodetector to disentangle the contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations in the middle reaches of the Heihe River Basin. *Ecological Indicators*, 117(January), 106545. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106545>
- López-Urrea, R., Domínguez, A., Pardo, J. J., Montoya, F., García-Vila, M., & Martínez-Romero, A. (2020). Parameterization and comparison of the AquaCrop and MOPECO models for a high-yielding barley cultivar under different irrigation levels. *Agricultural Water Management*, 230(May 2019), 105931. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105931>
- Lorite, I. J., García-Vila, M., Santos, C., Ruiz-Ramos, M., & Fereres, E. (2013). AquaData and AquaGIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.05.010>
- Magistrali, A., Vavera, R., Janovska, D., Rempelos, L., Cakmak, I., Leifert, C., Grausgruber, H., Butler, G., Wilkinson, A., & Bilsborrow, P. (2020). Evaluating the effect of agronomic management practices on the performance of differing spelt (*Triticum spelta*) cultivars in contrasting environments. *Field Crops Research*, 255(May), 107869. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107869>
- Maimaitijiang, M., Sagan, V., Sidike, P., Hartling, S., Esposito, F., & Fritschi, F. B. (2020). Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning. *Remote Sensing of Environment*, 237(May 2019), 111599. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111599>
- Malaisse F. (1990). La couverture végétale de Lubumbashi. In Bruneau J.C., Pain M., (Ed), *atlas de Lubumbashi*. Edition publidix, université Paris X- Nanterre, pp 30-31
- Malaisse, F. (1973). Contribution à l'étude de l'écosystème forêt Claire (Miombo). Note 8. Le projet Miombo. *Annales Université Abidjan*, série E (Ecologie), Tome VI, 227-250.

- Malaisse, F. (1997). *Se nourrir en forêt claire africaine*. (Presses Ag). 383p
- Maneja, R. H., Miller, J. D., Li, W., El-Askary, H., Flandez, A. V. B., Dagoy, J. J., Alcaria, J. F. A., Basali, A. U., Al-Abdulkader, K. A., Loughland, R. A., & Qurban, M. A. (2020). Long-term NDVI and recent vegetation cover profiles of major offshore island nesting sites of sea turtles in Saudi waters of the northern Arabian Gulf. *Ecological Indicators*, 117(November 2019). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106612>
- Marković, M., Josipović, M., Tovjanin, M. J., Đurđević, V., Ravlić, M., & Barać, Ž. (2020). Validating aquacrop model for rainfed and irrigated maize and soybean production in eastern croatia. *Idojaras*, 124(2), 277–297. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2020.2.7>
- Masa, R., Khan, Z., & Chowa, G. (2020). Youth food insecurity in Ghana and South Africa: Prevalence, socioeconomic correlates, and moderation effect of gender. *Children and Youth Services Review*, 116(May), 105180. <https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2020.105180>
- Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P. H., Marek, G., & Boman, R. (2020). Validation and application of AquaCrop for irrigated cotton in the Southern Great Plains of US. *Irrigation Science*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00665-4>
- McKinion, J.M., Baker, D.N., Whisler, F.D. and Lambert, J.R. (1988). Application of the GOSSYM/COMAX system to cotton crop management. *Agricultural Systems*, 31 (1), 55-65.
- Mkhabela, M. S., & Bullock, P. R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.03.009>
- Moriondo, M., Maselli, F., & Bindi, M. (2007). A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy*, 26(3), 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.10.007>
- Morvan, X., Bruand, A., Cousin, I., Roque, J., Baran, N., & Mouvet, C. (2004). Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols d'un bassin versant à l'aide de fonctions de pédotransfert : influence de la densité apparente et de la teneur en éléments grossiers. *Etude et Gestion Des Sols*, 11(2), 20 pp.
- Mosaedi, A., Ghabaei Sough, M., Sadeghi, S. H., Mooshakhian, Y., & Bannayan, M. (2017). Sensitivity analysis of monthly reference crop evapotranspiration trends in Iran: a qualitative approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 128(3–4), 857–873. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1740-y>
- Mpundu M.M., 2010. *Contaminations des sols en Éléments Traces Métalliques à Lubumbashi*

- (Katanga/R.D. Congo). *Évaluation des risques de contamination de la chaîne alimentaire et choix de solutions de remédiation*. Thèse de doctorat, Faculté des sciences agronomiques, université de Lubumbashi, 410p.
- Mulimbi, W., Nalley, L., Dixon, B., Snell, H., & Huang, Q. (2019). Factors Influencing Adoption of Conservation Agriculture in the Democratic Republic of the Congo. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 51(4), 622–645. <https://doi.org/10.1017/aae.2019.25>
- Munaro, L. B., Hefley, T. J., DeWolf, E., Haley, S., Fritz, A. K., Zhang, G., Haag, L. A., Schlegel, A. J., Edwards, J. T., Marburger, D., Alderman, P., Jones-Diamond, S. M., Johnson, J., Lingenfelser, J. E., Unêda-Trevisoli, S. H., & Lollato, R. P. (2020). Exploring long-term variety performance trials to improve environment-specific genotype × management recommendations: A case-study for winter wheat. *Field Crops Research*, 255(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107848>
- Munyemba, K. F., & Bogaert, J. (2014). Anthropisation et dynamique spatiotemporelle de l'occupation du sol dans la région de Lubumbashi entre 1956 et 2009. *E-Revue UNILU*, 1, 3–23.
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sinsing*, 33(2), 481–486. <http://sites.bu.edu/cliveg/files/2013/12/myneni-tgars-1995.pdf>
- Nain, A. S., & Kersebaum, K. C. (2007). Calibration and validation of CERES model for simulating. *Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil–Crop Systems*, 161–181. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4479-3_12
- Nasta, P., Palladino, M., Sica, B., Pizzolante, A., Trifuoggi, M., Toscanesi, M., Giarra, A., D'Auria, J., Nicodemo, F., Mazzitelli, C., Lazzaro, U., Di Fiore, P., & Romano, N. (2020). Evaluating pedotransfer functions for predicting soil bulk density using hierarchical mapping information in Campania, Italy. *Geoderma Regional*, 21, e00267. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00267>
- Ngetich, K. F., Raes, D., Shisanya, C. A., Mugwe, J., Mucheru-Muna, M., Mugendi, D. N., & Diels, J. (2012). Calibration and validation of AquaCrop model for maize in sub-humid and semi- arid regions of central highlands of Kenya. *Third RUFORUM Biennial Meeting, September*, 1525–1548.
- Norman M.J., Paerson C.J., Searle P.G.E., 1995. *The ecology of tropical food crops*, New York (USA). Thèse de doctorat, Cambridge University Press, 430 p.
- Nyembo, K. L. (2010). *Augmentation du rendement du maïs (Zea mays L .) par exploitation*

- de l'effet hétérosis des hybrides produits au Katanga , République Démocratique du Congo.* Universite de Lubumbashi Faculte des Sciences Agronomiques.
- Oiganji, E., Igbadun, H. E., Mudiare, O. J., & Oyebode, M. A. (2016). Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in northern zone of Nigeria. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(3), 1–13.
- Pan, Z., Huang, J., Zhou, Q., Wang, L., Cheng, Y., Zhang, H., Blackburn, G. A., Yan, J., & Liu, J. (2015). Mapping crop phenology using NDVI time-series derived from HJ-1 A/B data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34(1), 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.011>
- Paredes, P., de Melo-Abreu, J. P., Alves, I., & Pereira, L. S. (2014). Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*, 144, 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.06.002>
- Patil, S. L., & Sheelavantar, M. N. (2009). Effects of tillage depths, organic amendments and nitrogen on yield of winter sorghum on a vertisol in South India. *Journal of Sustainable Agriculture*, 33(1), 28–50. <https://doi.org/10.1080/10440040802395106>
- Pawar, G. S., Kale, M. U., & Lokhande, J. N. (2017). Response of AquaCrop Model to Different Irrigation Schedules for Irrigated Cabbage. *Agricultural Research*, 6(1), 73–81. <https://doi.org/10.1007/s40003-016-0238-2>
- Peace C. (1981). Culture traditionnelle de plein champ, information collection et Exchange repeint série N R-65, FAO. p192-205.
- Pereira, L. S., Paredes, P., Rodrigues, G. C., & Neves, M. (2015). Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. *Agricultural Water Management*, 159, 239–254. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.006>
- Petersen, G.W., Cunningham, R.L., & Matelski, R.P., (1968). Moisture characteristics of Pennsylvania soils: I. Moisture retention as related to texture. *Soil Sci. Am. Proc.*, 32, 271–275.
- Pomortsev, A. V., Dorofeev, N. V., Yu Zorina, S., Katysheva, N. B., & Sokolova, L. G. (2019). The effect of planting date on winter rye and triticale overwinter survival and yield in Eastern Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 315(4). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/4/042031>
- Pour, S. H., Wahab, A. K. A., Shahid, S., & Ismail, Z. Bin. (2020). Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in peninsular Malaysia. *Atmospheric Research*,

- 246(June), 105096. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105096>
- Proffitt Leyva, R. P., Mengelkoch, S., Gassen, J., Ellis, B. J., Russell, E. M., & Hill, S. E. (2020). Low socioeconomic status and eating in the absence of hunger in children aged 3–14. *Appetite*, 154(April), 104755. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2020.104755>
- Qiao, J., Zhu, Y., Jia, X., Huang, L., & Shao, M. (2019). Pedotransfer functions for estimating the field capacity and permanent wilting point in the critical zone of the Loess Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*, 19(1), 140–147. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2036-x>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2009. AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. *Journal of Agronomy* 101, 438–447
- Raes, D., Paquale STEDUTO, T., HSIAO, heodore C., & Elias, F. (2012). *Manuel d'utilisation Aquacrop* (FAO, Land). www.ge-eau.org.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2018). FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. *Reference Manual, Chapter 1 – AquaCrop, Version 6.0*, 23. www.fao.org/publications
- Raoufi, R. S., & Soufizadeh, S. (2020). Simulation of the impacts of climate change on phenology, growth, and yield of various rice genotypes in humid sub-tropical environments using AquaCrop-Rice. *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01946-5>
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., & Saxton, K.E. (1982). Estimation of soil water Trans. ASAE, 26, 1747–1752
- Reichert, J. M., Albuquerque, J. A., Solano Peraza, J. E., & da Costa, A. (2020). Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. *Geoderma Regional*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00277>
- Ristanovic, D. (2001). Maize in Raemaekers, R.H. (Editor). *Crop production in topical Africa*. DGIC (Directorate General for International Cooperation), Ministry of foreign Affairs, External Trade and International Cooperation, Brussels, Belgium. 23-45p
- Rosa, S. L. K., de Souza, J. L. M., & Tsukahara, R. Y. (2020). Performance of the AquaCrop model for the wheat crop in the subtropical zone in Southern Brazil. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 55. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01238>
- Rossi, L., Hoerz, T., Thouvenot, V., Pastore, G., & Michael, M. (2006). Evaluation of health, nutrition and food security programmes in a complex emergency: the case of Congo as an example of a chronic post-conflict situation. *Public Health Nutrition*, 9(5), 551–556.

- <https://doi.org/10.1079/phn2005928>
- Rouanet, G. (1984). *Le technicien d'agriculture tropicale: le maïs*. Edition la Maisonneuve et Larose, Paris. 142p
- Rusinamhodzi, L., Makumbi, D., Njeru, J. M., & Kanampiu, F. (2020). Performance of elite maize genotypes under selected sustainable intensification options in Kenya. *Field Crops Research*, 249(January), 107738. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107738>
- Saadati, Z., Pirmoradian, N., & Rezaei, M. (2011). CALIBRATION AND EVALUATION OF AquaCrop MODEL IN RICE GROWTH SIMULATION UNDER DIFFERENT IRRIGATION MANAGEMENTS JAUGEAGE ET EVALUATION DU MODELE AQUACROP POUR SIMULER LA CROISSANCE DU RIZ DANS DIFFERENTS REGIMES D'IRRIGATION. *International Congress on Irrigation and Drainage, April 2014*, 589–600.
- Safdari-Monfared, N., Noor-Mohammadi, G., Shirani-Rad, A. H., & Majidi-Heravan, E. (2020). Effects of sowing date and glycine betaine application on yield components and oil yield in canola (*Brassica napus* L.). *Turkish Journal of Field Crops*, 25(1), 32–40. <https://doi.org/10.17557/tjfc.737486>
- Salazar, O., Wesström, I., Youssef, M. A., Skaggs, R. W., & Joel, A. (2009). Evaluation of the DRAINMOD-N II model for predicting nitrogen losses in a loamy sand under cultivation in south-east Sweden. *Agricultural Water Management*, 96(2), 267–281. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.08.008>
- Sanchez, P. A. (1976). *Properties and Management of Soils in the Tropics* (JWiley). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Sandhu, R., & Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223(June), 105687. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105687>
- Saranya, C. P., & Nagarajan, N. (2020). Efficient agricultural yield prediction using metaheuristic optimized artificial neural network using Hadoop framework. *Soft Computing*, 24(16), 12659–12669. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-04707-z>
- Savari, M., Sheykhi, H., & Amghani, M. S. (2020). The role of educational channels in the motivating of rural women to improve household food security. *One Health*, 10(June), 100150. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2020.100150>
- SENASEM. (2008). *Catalogue variétal des cultures vivrières : Céréales (maïs, riz), Légumineuses (haricot, soja, niébé), Plantes à tubercules (manioc, patate douce, pomme de terre), Bananier*. Appui du projet CTB/MINAGRI, Kinshasa, 153p.

- Sharifi, A., & Dinpashoh, Y. (2014). Sensitivity Analysis of the Penman-Monteith reference Crop Evapotranspiration to Climatic Variables in Iran. *Water Resources Management*, 28(15), 5465–5476. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0813-x>
- Shin, J. Y., Kim, K. R., & Ha, J. C. (2020). Seasonal forecasting of daily mean air temperatures using a coupled global climate model and machine learning algorithm for field-scale agricultural management. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281(May 2019). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107858>
- Sollins, P., Homann, P., & Caldwell, B. A. (1996). *Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls* Phillip. 74, 65–105.
- Starr, M., Deng, B., & Helenius, J. (2020). Aquacrop-simulated response of sorghum biomass and grain yield to biochar amendment in South Sudan. *Agronomy*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy10010067>
- Spaeth, S.C., & Sinclair, T.R. (1985). Linear increase in soybean harvest index during seedfilling. *Agronomy Journal*, 77, 207-211. <https://doi.org/10.2134/agronj1985.00021962007700020008x>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25(3), 189–207. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Stöckle, C.O., Martin, S. & Campbell, G.S. (1994). CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 46, 335-359pp. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)90006-2)
- Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B., & Maksimovic, L. (2011). Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*, 98(10), 1615–1621. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.011>
- Struif, B. T. (1999). *Modelling the dynamics of agricultural development: a process approach The case of Koutiala (Mali)*. Wageningen Agricultural University.
- Subi, S., & Sheela, A. M. (2020). *Review on Termite Mound Soil Characteristics and Agricultural Importance*. 21(7), 1–12. <https://doi.org/10.9734/JAERI/2020/v21i730152>
- Sun, X. L., Wang, X. Q., & Wang, H. L. (2019). Comparison of estimated soil bulk density using proximal soil sensing and pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*,

- 579(August), 124227. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124227>
- Tan, C. W., Zhang, P. P., Zhou, X. X., Wang, Z. X., Xu, Z. Q., Mao, W., Li, W. X., Huo, Z. Y., Guo, W. S., & Yun, F. (2020). Quantitative monitoring of leaf area index in wheat of different plant types by integrating NDVI and Beer-Lambert law. *Scientific Reports*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57750-z>
- Thieme, A., Yadav, S., Oddo, P. C., Fitz, J. M., McCartney, S., King, L. A., Keppler, J., McCarty, G. W., & Hively, W. D. (2020). Using NASA Earth observations and Google Earth Engine to map winter cover crop conservation performance in the Chesapeake Bay watershed. *Remote Sensing of Environment*, 248(April), 111943. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111943>
- Tittonell, P., Muriuki, A., Shepherd, K. D., Mugendi, D., Kaizzi, K. C., Okeyo, J., Verchot, L., Coe, R., & Vanlauwe, B. (2010). The diversity of rural livelihoods and their influence on soil fertility in agricultural systems of East Africa - A typology of smallholder farms. *Agricultural Systems*, 103(2), 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.10.001>
- Tofa, A. I., Chiezey, U. F., Babaji, B. A., Kamara, A. Y., Adnan, A. A., Beah, A., & Adam, A. M. (2020). Modeling planting-date effects on intermediate-maturing maize in contrasting environments in the nigerian savanna: An application of DSSAT model. *Agronomy*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy10060871>
- Tovihoudji, P. G., Akponikpè, P. B. I., Agbossou, E. K., & Bielders, C. L. (2019). Using the DSSAT model to support decision making regarding fertilizer microdosing for maize production in the sub-humid region of Benin. *Frontiers in Environmental Science*, 7(FEB), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00013>
- Traoré O., (1993). *Épidémiologie de la striure du Maïs en zone soudano-sahélienne : cas du Burkina Faso*. Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou (Burkina Faso), 116 p.
- Tsakmakis, I. D., Kokkos, N. P., Gikas, G. D., Pisinaras, V., Hatzigiannakis, E., Arampatzis, G., & Sylaios, G. K. (2019). Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns. *Agricultural Water Management*, 213(October 2018), 419–432. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.029>
- Tucker, C. J., Pinzon, J. E., Brown, M. E., Slayback, D. A., Pak, E. W., Mahoney, R., Vermote, E. F., & El Saleous, N. (2005). An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(20), 4485–4498. <https://doi.org/10.1080/01431160500168686>
- Useni, S., Khoji, M. H., Langunu, S., Gerardy, A., & Bogaert, J. (2019). Amplification of

- Anthropogenic Pressure Heavily Hampers Natural Ecosystems Regeneration within the Savanization Halo Around Lubumbashi City (Democratic Republic of Congo). *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 17(2). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2019.17.555958>
- Useni, S. Y., Ilunga, G. M., Mulembo, T. M., Ntumba, B., & Longanza, L. B. (2014). Amélioration de la qualité des sols acides de Lubumbashi (Katanga , RD Congo) par l ' application de différents niveaux de compost de fumiers de poules. *Journal of Applied Biosciences*, 77, 6523–6533.
- van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., Keulen, H. van, Kropff, M. J., Bastiaans, L., & Goudriaan, J. (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop models On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Europ. J. Agronomy*, 18(January). [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00106-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00106-5)
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., Garcia Vila, M., & Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, 62, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
- Veerakachen, W., & Raksapatcharawong, M. (2020). RiceSAP: An Efficient Satellite-Based AquaCrop Platform for Rice Crop Monitoring and Yield Prediction on a Farm- To Regional-Scale. *Agronomy*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy10060858>
- Venancio, L. P., Mantovani, E. C., do Amaral, C. H., Usher Neale, C. M., Gonçalves, I. Z., Filgueiras, R., & Campos, I. (2019). Forecasting corn yield at the farm level in Brazil based on the FAO-66 approach and soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Agricultural Water Management*, 225(May 2019), 105779. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105779>
- Vitantonio-Mazzini, L. N., Borrás, L., Garibaldi, L. A., Pérez, D. H., Gallo, S., & Gambin, B. L. (2020). Management options for reducing maize yield gaps in contrasting sowing dates. *Field Crops Research*, 251(April), 107779. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107779>
- Vranken, I., Amisi, Y., Munyemba, F., Bamba, I., Veroustraete, F., Visser, M., & Bogaert, J. (2013). The Spatial Footprint of the Non-Ferrous Mining Industry in Lubumbashi. *Tropicultura*, 31(1), 20–27.
- Wan, L., Cen, H., Zhu, J., Zhang, J., Zhu, Y., Sun, D., Du, X., Zhai, L., Weng, H., Li, Y., Li, X., Bao, Y., Shou, J., & He, Y. (2020). Grain yield prediction of rice using multi-temporal UAV-based RGB and multispectral images and model transfer – a case study of small farmlands in the South of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291(June), 108096.

- <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108096>
- Wandan, E. N., Diawara, A., Bernard, T., Kouadio, A. L., & Manne, D. (2008). PREVISION DE RENDEMENTS DE CULTURES DE MAIS AVEC LE MODELE AGROMEORLOGIQUE WOFOST. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 12, 187–204.
- Wang, X., Huang, J., Feng, Q., & Yin, D. (2020). Winter Wheat Yield Prediction at County Level and Uncertainty Analysis in Main Wheat-Producing Regions of China with Deep Learning Approaches. *Remote Sensing*, 12(11), 1744. <https://doi.org/10.3390/rs12111744>
- Wassar, F., Gandolfi, C., Rienzner, M., Chiaradia, E. A., & Bernardoni, E. (2016). Predicted and measured soil retention curve parameters in Lombardy region north of Italy. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.05.005>
- Wellens, J., Raes, D., Traore, F., Denis, A., Djaby, B., & Tychon, B. (2013). Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 127, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.012>
- Wenquan, Z., Pan, Y., He, H., Wang, L., Mou, M., & Liu, J. (2012). A changing-weight filter method for reconstructing a high-quality NDVI time series to preserve the integrity of vegetation phenology. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(4), 1085–1094. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2166965>
- Whisler, J.R., Acock B, Baker D.N., Fye R.E, Hodges H.F, Lambert, J.R., Lemmon H.E., McKinion, J.M., Reddy, V.R. (1986). Crop simulation models in agronomy systems – Advances in Agronomy 40, 141-208; [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60282-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60282-5)
- Williams, R.D., Ahuja L.R., & Naney J.W. (1992). Comparison of methods to estimate soil water characteristics from soil texture, bulk density and limited data. *Soil Science*, 153(3), 172-184.
- Xu, J., Bai, W., Li, Y., Wang, H., Yang, S., & Wei, Z. (2019). Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. *Agricultural Water Management*, 213(October 2018), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.028>
- Xu, Y., Xu, Y., Wang, Y., Wu, L., Li, G., & Song, S. (2017). Spatial and temporal trends of reference crop evapotranspiration and its influential variables in Yangtze River Delta, eastern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(3–4), 945–958. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1928-1>
- You, G., Arain, M. A., Wang, S., Lin, N., Wu, D., McKenzie, S., Zou, C., Liu, B., Zhang, X.,

- & Gao, J. (2019). Trends of actual and potential evapotranspiration based on Bouchet's complementary concept in a cold and arid steppe site of Northeastern Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279(December 2018), 107684. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107684>
- Zaki, M. K., Komariah, Rahmat, A., & Pujiasmanto, B. (2020). Organic amendment and fertilizer effect on soil chemical properties and yield of maize (*Zea mays L.*) in rainfed condition. *Walailak Journal of Science and Technology*, 17(1), 11–17.
- Zeleke, K. T., Luckett, D., & Cowley, R. (2011). Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. *Agronomy Journal*, 103(6), 1610–1618. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0150>
- Zhang, Y., Zhang, L., Yang, N., Huth, N., Wang, E., van der Werf, W., Evers, J. B., Wang, Q., Zhang, D., Wang, R., Gao, H., & Anten, N. P. R. (2019). Optimized sowing time windows mitigate climate risks for oats production under cool semi-arid growing conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266–267(August 2018), 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.019>
- Zhao, C., Jia, X., Shao, M., & Zhang, X. (2020). Using pedo-transfer functions to estimate dry soil layers along an 860-km long transect on China's Loess Plateau. *Geoderma*, 369(April 2019), 114320. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114320>
- Zhao, Y., Li, F., Wang, Y., & Jiang, R. (2020). Evaluating the Effect of Groundwater Table on Summer Maize Growth Using the AquaCrop Model. *Environmental Modeling and Assessment*, 25(3), 343–353. <https://doi.org/10.1007/s10666-019-09680-y>
- Zheng, B., Myint, S. W., Thenkabail, P. S., & Aggarwal, R. M. (2015). A support vector machine to identify irrigated crop types using time-series Landsat NDVI data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34(1), 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.07.002>
- Zhijun, C., Zhu, Z., Jiang, H., & Sun, S. (2020). Estimating daily reference evapotranspiration based on limited meteorological data using deep learning and classical machine learning methods. *Journal of Hydrology*, 591(April), 125286. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125286>
- Zhou, H., Chen, C., Wang, D., Arthur, E., Zhang, Z., Guo, Z., Peng, X., & Mooney, S. J. (2020). Effect of long-term organic amendments on the full-range soil water retention characteristics of a Vertisol. *Soil and Tillage Research*, 202(November 2019), 104663. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104663>

Annexe

Tableau 1. Valeurs mensuelles des variables climatiques et de l'ET₀ de la ferme Ubuntu pour l'année 2016.

MOIS	TMAX	TMIN	TMOY	HUMITE	PLUIE	RAYONNEMENT	VITESSE VENT	ET ₀
	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(mm)	(J.m-2.j-1)	(m/s)	mm/jour
Janvier	26,1	18,2	22,2	83,9	204,0	18035483,9	1,1	5,645
Février	26,6	18,4	22,5	84,2	139,5	18600000,0	1,0	5,821
Mars	27,5	18,9	23,2	82,3	144,9	19646666,7	1,0	6,150
Avril	26,7	15,9	21,3	79,3	99,6	19203333,3	1,6	6,009
Mai	24,8	11,7	18,3	72,5	2,3	20853333,3	1,6	6,522
Juin	25,1	9,4	17,3	62,3	0,2	20183871,0	1,8	6,317
Juillet	26,5	9,6	18,0	53,7	0,1	20403225,8	1,9	6,392
Août	29,6	13,0	21,3	43,9	1,7	21661290,3	2,5	6,803
Septembre	33,7	15,5	24,6	32,7	1,1	23653333,3	2,2	7,438
Octobre	36,0	19,2	27,6	32,1	3,2	24616129,0	1,9	7,741
Novembre	33,0	20,3	26,6	50,8	66,3	21793333,3	1,4	6,841
Décembre	28,3	18,1	23,2	73,4	161,8	20648387,1	1,0	6,467

Tableau 2. Valeurs mensuelles des variables climatiques et de l'ET₀ de la ferme Ubuntu pour l'année 2017.

MOIS	TMAX	TMIN	TMOY	HUMITE	PLUIE	RAYONNEMENT	VITESSE VENT	ET ₀
	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(mm)	(J.m-2.j-1)	(m/s)	mm/jour
Janvier	25,8	17,7	21,7	82,3	275,7	18151612,9	1,0	5,681
Février	26,0	17,8	21,9	82,7	295,9	17142857,1	0,9	5,365
Mars	26,2	17,3	21,7	82,4	109,6	18687096,8	1,2	5,848
Avril	26,3	16,9	21,6	81,5	89,6	18113333,3	1,7	5,668
Mai	26,9	15,0	21,0	73,5	1,9	18974193,5	1,7	5,940
Juin	26,8	11,6	19,2	62,1	0,4	19690000,0	1,8	6,167
Juillet	27,6	10,6	19,1	52,6	1,7	20332258,1	2,0	6,374
Août	29,8	12,8	21,3	43,7	1,8	21538709,7	2,3	6,764
Septembre	33,3	15,2	24,2	32,3	0,0	23603333,3	2,5	7,426
Octobre	33,4	18,9	26,2	45,5	53,4	21325806,5	1,9	6,702
Novembre	29,1	18,7	23,9	67,6	189,8	20283333,3	1,4	6,359
Décembre	26,0	18,0	22,0	83,0	388,6	18719354,8	1,0	5,858