

## **Calibration du modèle de prévision de rendement AQUACROP pour la canne à sucre (*saccharum officinarum*) - variété N14 - au Sénégal**

**Auteur** : Warrant, Charlotte

**Promoteur(s)** : Wellens, Joost

**Faculté** : Faculté des Sciences

**Diplôme** : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée pays en développement

**Année académique** : 2018-2019

**URI/URL** : <http://hdl.handle.net/2268.2/8222>

---

### *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



---

# CALIBRATION DU MODÈLE DE PRÉVISION DE RENDEMENT AQUACROP POUR LA CANNE À SUCRE (*SACCHARUM OFFICINARUM*) - VARIÉTÉ N14 - AU SÉNÉGAL

---

**CHARLOTTE WARRANT**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE  
L'ENVIRONNEMENT À FINALITÉ PAYS EN DÉVELOPPEMENT**

**ANNÉE ACADÉMIQUE 2018-2019**

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DU DR. JOOST WELLENS (ULIÈGE)

**COMITÉ DE LECTURE :**

TYCHON BERNARD (DOCTEUR EN SCIENCES – ULIÈGE)

SALL MOR TALLA (DIRECTEUR DES PLANTATIONS – COMPAGNIE SUCRIÈRE SÉNÉGALAISE)

WELLENS JOOST (DOCTEUR EN SCIENCES – ULIÈGE)





*« Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique\* de l'**Université de Liège**.*

*\* L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULg » ;*

Le présent document n'engage que son auteur ;

Auteur du présent document : Charlotte WARRANT, [charlotte.warrant@hotmail.com](mailto:charlotte.warrant@hotmail.com)

## Remerciements

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

Premièrement, je remercie particulièrement la Compagnie Sucrière Sénégalaise et le Centre de Suivi Ecologique pour leur accueil lors du stage de terrain qui a permis la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également Mor Talla Sall qui m'a accompagnée lors de la plus grande partie de mon stage à Richard Toll et a mis tout en œuvre pour faciliter le déroulement de ce travail et la collecte des données sur le terrain.

Ma gratitude va à Amadou NDIAYE et à son équipe pour leur travail de terrain continu et pour avoir partagé avec moi l'étendue de leurs connaissances techniques.

Je souhaite également remercier Joost WELENS, Docteur en Sciences, et Abdoul Aziz DIOUF, Docteur en Sciences au Centre de Suivi Ecologique, pour leur appui scientifique et leurs conseils avisés.

Je voudrais, en outre, mettre à l'honneur Nathalie LOSSEAU et Jean-Pierre WARRANT pour leur relecture attentive.

Enfin, je remercie mon entourage pour leur soutien quotidien pendant toute la durée de ce mémoire.

## Abstract

### Anglais

The AQUACROP plant growth simulation model is a tool developed by the FAO for field operators in the agricultural world. It is mainly based on the calculation of the water balance of the soil to highlight any water stress impacting the crop. Thus, the quantity of water available in the root zone is simulated by linking incoming water flows (rainfall, irrigation and capillary rise) and outflow (evapotranspiration, runoff and deep percolation). It also considers the impact of heat stress and related soil salinity or agronomic operations. In order to allow the most advanced simulations possible, it is necessary to approach closer to the reality observed in the field. To this end, it is essential to calibrate the model by integrating the physiological and phenological parameters specific to the crop under consideration. This calibration is made possible by the comparison between the fCover curves observed in the field (by hemispherical photographs) and those simulated by the tool. The modification of the "Crop file" can be done accordingly.

*Keywords: AQUACROP, calibration, sugar cane, CAN-EYE, Senegal, fCover*

### Français

Le modèle de simulation de croissance végétale AQUACROP est un outil développé par la FAO à destination des opérateurs de terrain dans le monde agricole. Il est principalement basé sur le calcul du bilan en eau du sol permettant de mettre en évidence tout stress hydrique impactant la culture. Ainsi, la quantité d'eau disponible au niveau de la zone racinaire est simulée en mettant en relation les flux d'eau entrant (précipitations, irrigation et remontée capillaire) et sortant (évapotranspiration, ruissellement et percolation profonde). Il considère également l'impact des stress thermiques et ceux liés à la salinité du sol ou aux opérations agronomiques. Afin de permettre des simulations les plus pointues possibles, il est nécessaire de s'approcher au plus près de la réalité constatée sur le terrain. A cette fin, il est indispensable de calibrer le modèle en y intégrant les paramètres physiologiques et phénologiques propres à la culture envisagée. Cette calibration est rendue possible par la comparaison entre les courbes de fCover observées en champ (par photographies hémisphériques) et celles simulées par l'outil. La modification du « Crop file » pourra se faire en conséquence.

*Mots-clés : AQUACROP, calibration, canne à sucre, CAN-EYE, Sénégal, fCover*

# Table des matières

Remerciements .....	i
Abstract .....	ii
Table des matières .....	iii
Lexique .....	v
Liste des figures .....	vii
Liste des tableaux .....	ix
Liste des équations .....	x
Liste des sigles et des abréviations .....	xi
1. Introduction .....	1
2. L'institution d'accueil et son secteur d'activités .....	3
2.1. La culture de la canne à sucre .....	3
2.1.1. Généralités et phénotype .....	3
2.1.2. Cycle végétatif.....	5
2.1.3. Techniques culturales .....	7
2.2. Sucre de canne .....	10
2.3. La Compagnie Sucrière Sénégalaise .....	11
2.4. Le Centre de Suivi Ecologique .....	12
3. Matériel et méthode.....	14
3.1. Objet de l'étude .....	14
3.2. Modèle de prévision de rendement AQUACROP .....	16
3.2.1. Contexte de la recherche .....	16
3.2.2. Description du fonctionnement du modèle AQUACROP .....	17
3.3. Variables d'entrée .....	21
3.3.1. Variables climatiques .....	22



3.3.2.	Variables pédologiques .....	24
3.3.3.	Variables agronomiques.....	24
3.3.4.	Développement de la canopée .....	24
3.3.5.	Rendement effectif et calcul de la biomasse aérienne.....	25
3.4.	Calibration du modèle .....	26
3.4.1.	Stress hydriques .....	26
3.4.2.	Stress thermiques .....	27
3.4.3.	Calendrier phénologique de la culture .....	28
3.4.4.	Couverture de la canopée .....	29
3.4.5.	Productivité de l'eau .....	30
3.4.6.	Indice de récolte.....	31
3.5.	Validation du modèle.....	31
4.	Résultats et discussion.....	34
4.1.	Rendements effectifs en champs .....	34
4.2.	Traitement des photographies hémisphériques .....	35
4.2.1.	Vérification des données .....	35
4.2.2.	Courbes de fCover par parcelle , placette et bande.....	36
4.3.	Résultats de la calibration .....	38
4.3.3.	Modèle par défaut .....	39
4.3.4.	Variables intégrées au modèle calibré.....	39
4.3.5.	Evaluation statistique du modèle calibré.....	41
4.4.	Résultats de la validation.....	43
4.5.	Prévisions de rendement.....	44
5.	Conclusion et perspectives.....	45
	Bibliographie .....	49
	Index .....	54

## Lexique

**Adventice** : Se dit d'une plante indésirable à l'endroit où elle pousse.

**Amendement** : Substance incorporée à un sol pour en améliorer les propriétés physiques.

**Andain** : Bande continue.

**Autogire** : Aéronef à voilure tournante libre[1].

**Bagasse** : Résidu de tiges de canne à sucre après extraction du jus.

**Battance** : Action d'une forte pluie sur l'épiderme d'un sol.

**Binaire** : Composé de deux unités.

**Biomasse** : Masse de matière vivante.

**Canopée** : Etage supérieur d'une végétation.

**Capillarité** : Phénomène physique par lequel un liquide tend à monter le long d'un tube capillaire ou au travers d'un corps poreux[2].

**Coefficient angulaire** : Nombre qui caractérise le sens et la pente d'une droite.

**Collet** : Partie d'une plante située entre la tige et les racines.

**Conductance stomatique** : Capacité des stomates à réaliser plus ou moins d'échange gazeux avec l'extérieur[3].

**Corrélation** : Rapport de dépendance entre deux variables.

**Coupeuse-tronçonneuse** : Machine agricole capable de couper la canne à sucre pour sa récolte.

**Covariance** : Valeur caractérisant une corrélation plus ou moins forte entre deux variables[2].

**Déchaumage** : Action d'incorporer les résidus de culture dans le sol.

**Empirisme** : Théorie d'après laquelle toutes nos connaissances viennent de l'expérience[2].

**Étuve** : Appareil destiné à obtenir une température définie sans échange avec l'extérieur[3].

**Évapotranspiration** : Quantité d'eau évaporée par le sol et transpirée par un couvert végétal.

**Fonction sigmoïde** : Fonction en forme de S.

**Fongique** : Dû à un champignon.

**Fumure** : Fertilisant.

**Germination** : Début du développement d'un nouvel individu[2].

**Gravitropique** : Orientation de la plante due à la gravité.

**Lit de semence** : Couche superficielle du sol destinée à recevoir les semences[3].

**Maturation** : Fait de mûrir.

**Monosaccharide** : Sucre simple.

**Nadir** : Direction verticale, de haut en bas.

**Nématode** : Ver.

**Nodale** : Relatif aux nœuds.

**Pédoclimatique** : Relatif à la fois au sol et au climat.

**Pédologie** : Etude du sol.

**Phénologie** : Etude des phénomènes périodiques de la vie animale et végétale.

**Phloème** : Tissu vasculaire conduisant la sève élaborée[1].

**Phytopathologie** : Relatif à la santé des organismes végétaux.

**Piézométrie** : Relatif à la profondeur de la nappe phréatique.

**Plante pérenne** : Plante pouvant vivre sur plusieurs années.

**Profondeur de champ** : Zone de prise de vue.

**Résilience** : Capacité à surmonter un choc.

**Sarclage** : Opération de désherbage.

**Sénescence** : Processus de ralentissement de l'activité vitale chez les individus âgés[2].

**Service écosystémique** : Services, parfois imperceptibles, rendus par les écosystèmes.

**Sprinkler** : Système d'arrosage tournant[2].

**Talles** : Tige adventice au collet d'une plante.

**Télédétection** : Science de la détection à distance.

**Xylème** : Tissus vasculaires conduisant la sève brute[1].

## Liste des figures

Figure 1 : Apparence de la canne à sucre.....	3
Figure 2 : Régions propices au développement de la canne à sucre .....	3
Figure 3 : Coupe d'une tige de canne à sucre (réalisée à partir d'une image NETAFIM) .....	4
Figure 4 : Coupe d'une tige de canne à sucre (réalisée à partir d'une image NETAFIM) .....	4
Figure 5 : Canne à sucre en fleur.....	4
Figure 6 : Cycle de culture (flèches foncées) et stades phénologiques (flèches claires) de la canne à sucre vierge et repousse.....	5
Figure 7 : Développement du système racine suite à une multiplication par bouturage.....	5
Figure 8 : Touffe de canne après tallage (brûlée).....	6
Figure 9 : Pied de canne à sucre après récolte, Richard Toll .....	6
Figure 10 : Bouturage de la canne à sucre dans les sillons .....	7
Figure 11 : Irrigation gravitaire, Richard-Toll .....	7
Figure 12 : Irrigation gouttes-à-gouttes, Richard-Toll .....	8
Figure 13 : Brûlage de la canne à sucre, Richard-Toll .....	9
Figure 14 : Coupeuse-tronçonneuse vs. récolte manuelle .....	9
Figure 15 : Production (en t) par pays de canne à sucre pour l'année 2014.....	10
Figure 16 : Principaux producteurs de canne à sucre en 2014 (en Mt) .....	10
Figure 17: Compagnie sucrière sénégalaise .....	11
Figure 18 : Usine de la CSS vue depuis les champs de canne à sucre irrigués .....	12
Figure 19 : Richard-Toll et sa région, vues du ciel .....	14
Figure 20 : Schématisation de la procédure d'échantillonnage au niveau des parcelles F5 et F5a	15
Figure 21 : Schéma de calcul d'AQUACROP indiquant (en flèches discontinues) les processus affectés par les stress hydriques (de a à e) et (en flèches continues) les étapes conduisant à la prévision du rendement. ....	17
Figure 22 : Evolution de la couverture de la canopée à travers le cycle de développement idéal de la canne à sucre (en absence de stress). ....	18
Figure 23 : Simulations de l'épuisement en eau de la zone racinaire (Dr), de la couverture de la canopée (CC) et de la transpiration de la culture (Tr).....	19

Figure 24 : Simulation de couverture de canopée verte (CC) quand le stress en eau s'accumule durant le cycle de la culture, comparée avec le développement de la canopée en absence de stress. Légende : (a) pas d'effet de stress en eau sur le développement de la canopée ; (b) stress en eau affectant l'expansion des feuilles ; (c) stress hydrique déclenchant un déclin précoce de la canopée (CCpot).....	20
Figure 25 : Interface AQUACROP.....	22
Figure 26 : Bac d'évaporation de classe A sur substrat sec .....	24
Figure 27 : Traitement d'image par le logiciel CAN-EYE avant et après correction manuelle (photo F5A_2017-05-1).....	25
Figure 28 : Pesée des parcelles échantillonnées .....	25
Figure 29 : Coefficient de stress (Ks) pour différents degrés d'épuisement en eau de la zone racinaire (Dr). TAW = Total Available Water = eau disponible totale de la zone racinaire .....	27
Figure 30 : Pieds de canne une semaine après la récolte.....	28
Figure 31 : Courbe de développement de la canopée.....	29
Figure 32 : Relation entre la biomasse au-dessus du sol et le total d'eau transpirée pour des cultures de type C3 et C4 après normalisation avec le CO2 et ETo .....	30
Figure 33 : Parcelle F5A - photo 1 : biais constaté au niveau de la profondeur de champs entre la prise photographique du 30/11, du 7/12 et du 14/12 (de gauche à droite).....	35
Figure 34 : Parcelle F5A (et son chemin d'accès vers la P1) une semaine avant la récolte .....	36
Figure 35 : Courbes de fCover par parcelle .....	36
Figure 36 : Courbes de fCover par placette .....	37
Figure 37 : Courbes de fCover par bande (sur base des données photographiques collectées par les équipes de la CSS).....	38
Figure 38 : Régression linéaire entre les variables prévues et observées lors de l'étape de calibration .....	42
Figure 39 : Régression linéaire entre les variables prévues et observées lors de l'étape de validation .....	43

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Besoins indicatifs de la canne à sucre pour un rendement en tiges fraîches estimé à 100 t/ha .....	8
Tableau 3 : Chronologie indicative des stades phénologiques de la canne à sucre importants pour la calibration d'AQUACROP , pour une culture tropicale ou subtropicale et pour une canne vierge ou une repousse .....	28
Tableau 4 : Rendements en canne brûlée par parcelle , par bande et par placette .....	34
Tableau 5 : Rendements en matière sèche par parcelle , par bande et par placette .....	35
Tableau 6 : Analyse pédologique par bandes .....	38
Tableau 7 : Courbes de fCover simulées et observées - Modèle par défaut - Etape de calibration .....	39
Tableau 8 : Variables du modèle calibré pour la culture de canne à sucre (variété N14) au Sénégal .....	40
Tableau 9 : Résultats par bande des indicateurs statistiques obtenus lors de l'étape de calibration .....	41
Tableau 10 : Indicateurs statistiques moyens de la calibration .....	42
Tableau 11 : Résultats par bande des indicateurs statistiques obtenus lors de l'étape de validation .....	43
Tableau 12 : Indicateurs statistiques moyens de la validation .....	43
Tableau 13 : Rendements observés et simulés par le modèle calibré et indicateurs statistiques des simulations .....	44

## Liste des équations

Équation 1 : Réponse du rendement à l'eau .....	16
Équation 2 : Biomasse en fonction de la transpiration.....	16
Équation 3 : Transpiration d'une culture.....	19
Équation 4 : Biomasse intégrant les stress thermiques.....	20
Équation 5 : Rendement en fonction de la biomasse et de l'indice de récolte ajusté.....	21
Équation 6 : $ET_0$ par Penman-Monteith .....	23
Équation 7 : $ET_0$ par le coefficient d'évaporation en bac.....	23
Équation 8 : Calcul des degrés-jour ( $^{\circ}C$ ) .....	27
Équation 9 : Couverture initiale de la canopée.....	29
Équation 10 : Première moitié de la courbe de développement de CC .....	29
Équation 11 : Seconde moitié de la courbe de développement de CC.....	30
Équation 12 : Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.....	31
Équation 13 : Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée .....	32
Équation 14 : Coefficient de détermination.....	32
Équation 15 : Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe .....	33
Équation 16: Indice de concordance de Willmott .....	33

## Liste des sigles et des abréviations

**B** : Biomasse

**BAD** : Banque Africaine de Développement

**C<sub>0</sub>** : Canne vierge

**C<sub>2</sub>** : Canne en seconde repousse

**CAC** : Capacité au champ

**CC** : Canopy Cover (couverture de la canopée)

**CC<sub>0</sub>** : Couverture initiale de la canopée

**CC<sub>max</sub>** : Couverture maximale de la canopée

**CDC** : Canopy Decline Coefficient (coefficient de déclin de la canopée)

**CGC** : Canopy Growth Coefficient (coefficient de croissance de la canopée)

**CIRAD** : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

**CO<sub>2</sub>** : Dioxyde de carbone

**CRAAQ** : Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec

**CRDI** : Centre de Recherche pour le Développement International

**CSE** : Centre de Suivi Ecologique

**CSS** : Compagnie Sucrière Sénégalaise

**d** : Indice de concordance de Willmott

**DJC** : Degré-jour de croissance

**EF** : Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe

**ET** : Evapotranspiration

**ET<sub>0</sub>** : Evapotranspiration de référence

**FACC** : Fond d'Adaptation au Changement Climatique

**FAO** : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

**FCover** : Fraction of green Vegetation Cover (fraction de couvert végétal vert)

**FVC** : Fond Vert Climat

**GRET** : Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques



**ha** : hectare = 10.000m<sup>2</sup>

**HI** : Harvest Index (indice de récolte)

**K<sub>2</sub>O** : Oxyde de potassium

**K<sub>c</sub>** : Coefficient cultural

**K<sub>p</sub>** : Pan coefficient (coefficient d'évaporation en bac)

**MDP** : Mécanisme de Développement Propre

**MSE** : Mean Square Erreur (erreur moyenne)

**Mt** : Mégatonne = 1.000.000 tonnes

**N** : Azote

**nRMSE** : Normalized Root Mean Square Error (erreur quadratique moyenne normalisée)

**OCDE** : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

**O<sub>i</sub>** : Variable observée

**ONG** : Organisation Non-Gouvernementale

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** : Pentoxyde de phosphore

**PFP** : Point de Flétrissement Permanent

**pH** : Potentiel hydrogène

**P<sub>i</sub>** : Variable simulée

**r** : Coefficient de corrélation

**r<sup>2</sup>** : Coefficient de détermination

**RFU** : Réserve en eau Facilement Utilisable

**RMSE** : Root Mean Square Error (erreur quadratique moyenne)

**SASRI** : South African Sugarcane Research Institute (institut sud-africain de recherche sur la canne à sucre)

**SAU** : Surface Agricole Utile

**TAW** : Total Available Water (eau disponible totale dans la zone racinaire)

**USAID** : United State Agence for International Développement

**WP** : Water Productivity (productivité de l'eau)

**Y** : Yield (rendement)

# 1. Introduction

Le respect de l'environnement et la prise de conscience qu'il est nécessaire de préserver nos ressources naturelles occupent une place de plus en plus prépondérante dans notre société. De par ses modes de production et du fait de sa relation privilégiée à l'environnement, l'agriculture moderne est directement visée par ces préoccupations, et l'impact qu'elle peut avoir sur la biosphère est régulièrement mis en cause[4]. Parmi toutes les considérations environnementales, s'il en est une déterminante dans une région aride telle que le nord du Sénégal, c'est la gestion des ressources hydriques. De fait, partout dans le monde, le secteur agricole est l'un des premiers consommateurs d'eau et l'irrigation déraisonnée est régulièrement pointée du doigt[5]. L'utilisation d'un logiciel tel qu'AQUACROP, qui permet de mettre en relation la production de biomasse et le bilan hydrique du sol, accorde la possibilité d'établir des calendriers d'irrigation avisés, permettant de s'approcher au plus près des besoins réels de la végétation, et d'ainsi limiter le gaspillage de ressources.

De surcroît, dans le cadre d'une agro-industrie de l'ampleur de celle de la Compagnie Sucrière Sénégalaise, la prévision de rendement rendue possible par le modèle AQUACROP est un atout non-négligeable pour établir le planning de récolte des parcelles. En effet, dans l'optique d'optimiser l'utilisation des ressources techniques et humaines et de minimiser les pertes dues au stockage inadéquat de cannes coupées, il est essentiel de pouvoir approvisionner quotidiennement l'usine sucrière en s'approchant au maximum de sa capacité de traitement journalière.

AQUACROP est un logiciel mis à disposition gratuitement par la FAO à destination du monde agricole depuis 2009[6]. La force du modèle réside dans sa simplicité d'utilisation et dans le nombre réduit de variables qui sont nécessaires à son fonctionnement. Cette volontaire candeur fait d'AQUACROP un outil capable de sortir de la sphère scientifique pour trouver une place auprès des opérateurs de terrain[7]. Les données essentielles afin de proposer une simulation de rendement effective sont des variables climatiques aisément collectables (températures maximales et minimales, évapotranspiration et pluviométrie), une caractérisation du contexte pédologique et piézométrique, les informations relatives à l'irrigation, ainsi que des observations en champs[8]. Les données relevant de pratiques culturales autres que l'irrigation (amendements, lutte contre les invasives, etc.) ont été volontairement écartées dans cet opus pour simplifier l'utilisation ultérieure du logiciel, le postulat de base étant que tous les besoins minéraux et organiques de la plante sont comblés et que la lutte contre les invasives est efficiente.

La base de données du logiciel comporte divers « Crop files » caractérisant, par des variables physiologiques et phénologiques, une trentaine de cultures différentes, dont la canne à sucre[9]. Malheureusement, peu d'informations sont disponibles quant à la méthodologie de rédaction des « Crop files ». En outre, la plus ou moins grande variabilité phénologique et physiologique au sein d'une même espèce, selon la variété considérée, impose que le modèle soit calibré afin de s'approcher au plus près de la réalité agronomique de terrain. C'est cette calibration du logiciel AQUACROP pour la culture de canne à sucre (variété N14) dans le cas particulier du nord du Sénégal qui est au cœur de ce document.

Cette recherche fait suite à un stage réalisé entre le 23 mars et le 1er mai 2018 au Sénégal et s'inscrit dans le cadre de ma formation de Master 2 en sciences et gestion de l'environnement - finalité Pays en développement - à l'Université de Liège. Elle a été rendue possible grâce à une collaboration entre le département Eau, Environnement et Développement de l'ULiège, la Compagnie Sucrière Sénégalaise et le Centre de Suivi Ecologique de Dakar à travers le projet « Research Programme for Earth observation Stereo III : Basic Research In Support to EO Regions (BARISEOR) ». Ce mémoire succède au travail de Pauline LUC qui a œuvré en 2017 à la sélection des placettes-tests et à l'établissement d'un protocole d'échantillonnage photographique[10] qui a servi lors de la calibration de notre modèle.

Cet opuscule est articulé autour de quatre parties, elles-mêmes décomposées en plusieurs chapitres. La première partie est ainsi consacrée aux thématiques générales : la culture de la canne à sucre (phénotypie, cycle végétatif et prérequis agronomiques), la production sucrière (considérations techniques et historiques) et la présentation des institutions d'accueil. La seconde partie s'attache à exposer la méthodologie adoptée et les outils utilisés pour la mise en œuvre de cette recherche. Elle présente l'objet et le contexte de l'étude, décrit le fonctionnement et les besoins du logiciel AQUACROP, les bases de la calibration et dévoile les différents indicateurs statistiques utilisés pour en évaluer la pertinence. La dernière partie, quant à elle, s'attèle à l'analyse critique des résultats obtenus en termes de prévision du couvert végétal et de production de biomasse.

## 2. L'institution d'accueil et son secteur d'activités

### 2.1. La culture de la canne à sucre

#### 2.1.1. Généralités et phénotype

La canne à sucre (*Saccharum officinarum*) est une plante herbacée pérenne de la famille des Poacées. Il s'agit d'une plante de haute stature pouvant atteindre jusqu'à 5 m de hauteur, suivant les variétés. La particularité de cette graminée - outre sa taille impressionnante - est sa faculté à stocker d'importantes quantités de sucre sous forme de jus dans ses tiges fibreuses[11]. Sa croissance est rapide et la biomasse aérienne qu'elle produit est très élevée. Son cycle de culture varie de 12 mois (climat plus chaud) à 24 mois (climat plus froid)[8], mais son cycle végétatif prend cours sur plusieurs années. En fonction des conditions pédologiques et phytosanitaires, il est possible de conduire la culture sur une durée de trois à sept ans[8].



Crédit photo : Fellah Trade

Figure 1 : Apparence de la canne à sucre

Elle nécessite un climat chaud (20 à 35°C), avec une longue période d'ensoleillement, et exempt de période de gel. C'est pourquoi, on la retrouve principalement dans les régions tropicales et subtropicales, à une latitude variant de +35° à -35°[12]. Il s'agit d'une plante dont le besoin en eau est situé entre 1200 et 2000 mm/an, apporté naturellement par les précipitations, ou artificiellement par irrigation[13],[14].

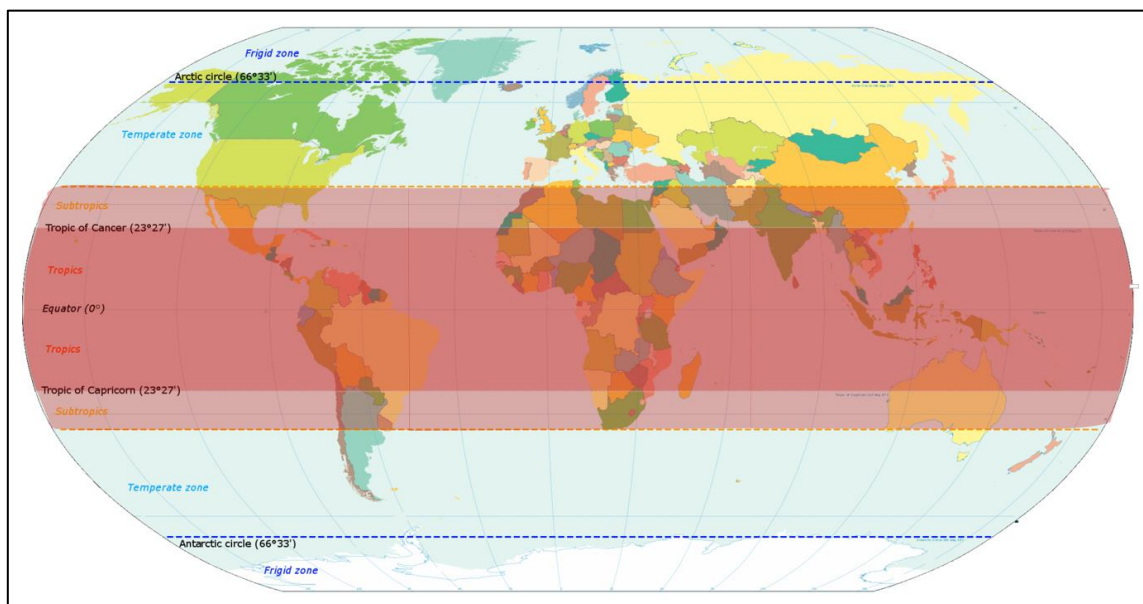


Figure 2 : Régions propices au développement de la canne à sucre (réalisation personnelle à partir d'une carte trouvée internet [12]).

Sa tige, d'une épaisseur de 5 cm, possède un épiderme lisse recouvert de cire, dont la couleur peut adopter différentes nuances de jaune, de vert, ou encore de violet. Elle est divisée par des nœuds en *entre-nœuds* qui peuvent atteindre une longueur de 12 à 18 cm[13]. La tige est composée, à son sommet, d'une section immature à croissance rapide dont la teneur en saccharose est faible[8]. La propagation industrielle de la canne à sucre se fait essentiellement de manière asexuée, par bouturage, en vertu de la présence de bourgeons racinaires dans chacun des nœuds qui la composent[11]. Il s'agit alors simplement de planter un morceau de tige dans le sol pour voir apparaître une nouvelle pousse.

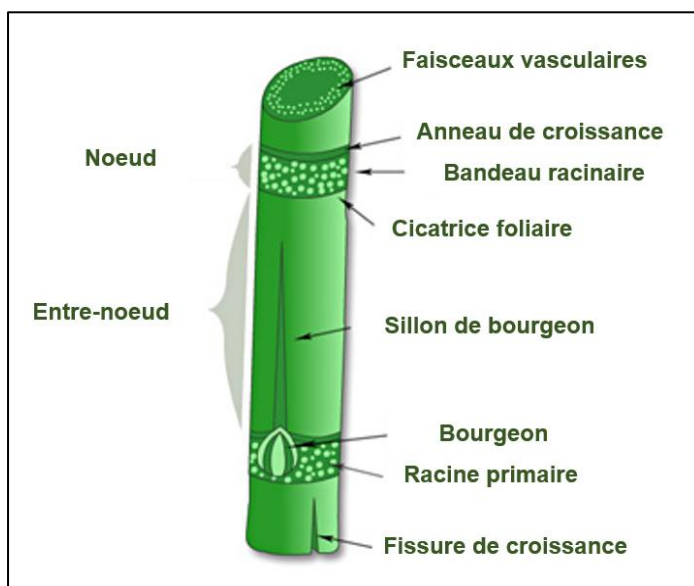


Figure 3 : Coupe d'une tige de canne à sucre (réalisée à partir d'une image NETAFIM)

Les bourgeons prennent naissance au niveau du bandeau racinaire de chaque nœud. Les feuilles sont alternes, enserrant la tige complètement et ont une forme allongée, terminée par une pointe. Elles peuvent mesurer jusqu'à un mètre de longueur[13]. Lors de la plantation de la canne à sucre, chaque bourgeon peut former une racine primaire à partir de laquelle des pousses secondaires, appelées "talles", peuvent se former. Dans les faisceaux vasculaires se côtoient le Xylem, qui conduit l'eau et ses minéraux vers le sommet de la plante depuis les racines, et le Phloème, qui transporte les nutriments (dont le sucre) depuis les feuilles vers les racines et les cellules saccharifères de la tige[15].

Les racines de la canne à sucre sont recouvertes de poils d'absorption, appelés suçoirs, et sont ceinturées d'un tissu protecteur, nommé pilorhize[16] in [10]. Cette coiffe permet de protéger les tissus tendres de la région d'élongation lorsque la racine pénètre dans le sol. Le tissu racinaire de la canne à sucre est très dense et vigoureux. De tendance gravitropique, son étendue dépendra principalement des conditions pédologiques sur lesquelles la culture est établie. Une étude du CIRAD de 2008[17] a démontré qu'en conditions optimales, on peut retrouver des racines jusqu'à 4,7 m de profondeur. Le taux de pénétration des racines est de l'ordre de 20 mm/jour, bien que cette vitesse dépende fortement du type de sol[13],[14].

Après onze ou douze mois de croissance, un jet lisse et sans nœud - appelé flèche - apparaît. Cette flèche est divisée en plusieurs épis qui porteront de petites fleurs blanches généralement stériles[16] in [10]. Si l'on considère le point de vue de l'agro-industrie dont la canne à sucre est le noyau fertile, la floraison n'est pas désirée parce qu'elle arrête de manière drastique le développement des tiges des cultivars[8]. La floraison peut éventuellement être retardée artificiellement par l'utilisation d'un inhibiteur ou la mise en œuvre volontaire d'un stress hydrique[14].



Crédit photo : Théo Crazzolara

Figure 5 : Canne à sucre en fleur

## 2.1.2. Cycle végétatif

Le cycle végétatif de la canne à sucre est composé de plusieurs phases successives, telles qu'illustrées par la **figure X** [15]:

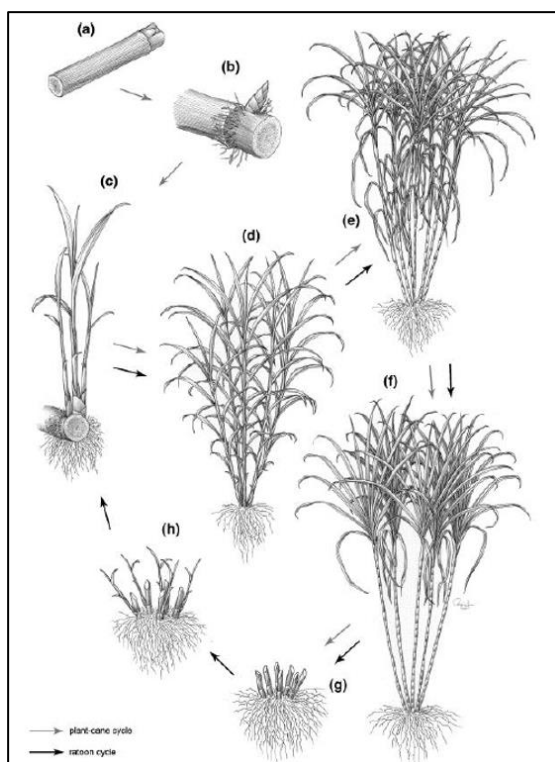


Figure 6 : Cycle de culture (flèches foncées) et stades phénologiques (flèches claires) de la canne à sucre vierge et repousse (15)

### (a) Bouture, (b) germination et développement racinaire

La multiplication de la canne à sucre se fait par bouturage, en prélevant un morceau de tige sur une canne-mère et en le transplantant dans le sol[18].

La phase de germination prend place de la plantation à la fin de la germination des bourgeons végétatifs. Sa durée varie entre 30 et 35 jours[19]. Les premières racines adventives issues de cette bouture sont appelées « racines de bouturage ». Elles se développent au départ du bandeau racinaire présent dans les nœuds de la tige mise en terre (voir **figure X**). Elles sont fines et fortement ramifiées et sont destinées à soutenir la croissance de la plante dans ses premiers jours. Elles sont progressivement remplacées par les « racines de repousse » - plus épaisses et moins superficielles - pour ne finalement représenter que 2% de la biomasse souterraine. Les racines de repousse sont développées par la nouvelle pousse, et non plus par le greffon[13]. Le nombre de racines et leur profondeur dépendent du type de sol : plus le sol est meuble et perméable et plus le développement racinaire sera important[16] in [10].

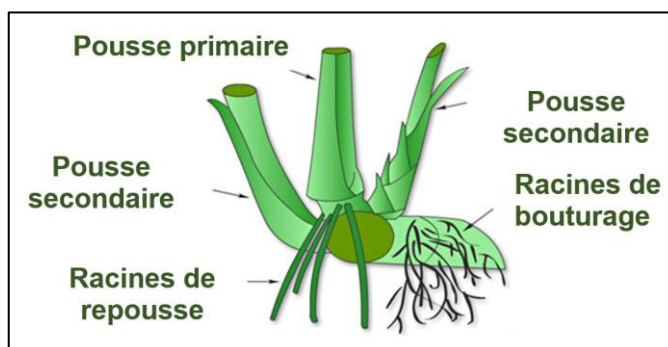


Figure 7 : Développement du système racine suite à une multiplication par bouturage (réalisée à partir d'une image NETAFIM)

### (c) Tallage

Le tallage est un processus de ramification qui a lieu à partir d'une articulation nodale souterraine. Cette multiplication des tiges permet d'augmenter le rendement de la production[15]. Le tallage est donc un phénomène naturel à favoriser - notamment - en respectant l'espacement entre les plants pour permettre leur développement et en procédant à une fertilisation optimale. Il débute environ 40 jours après la plantation et peut durer jusqu'à 120 jours[19].

### (d) Croissance

La phase de croissance maximale commence juste après la phase de tallage et peut durer jusqu'à 270 jours dans une culture conduite sur 12 mois. Environ la moitié des talles produites seront conservées. Il s'agit du processus physiologique durant lequel se produit l'épaississement et l'allongement des tiges, dont environ la moitié arrivera jusqu'à maturation[15]. La croissance est rapide, tant au niveau de la production de feuilles que de croissance des talles. Dans des conditions favorables, on peut espérer que les tiges croissent de 4 à 5 entre-nœuds par mois[19].



Crédit photo : Charlotte WARRANT

Figure 8 : Touffe de canne après tallage (brûlée)

### (e) Début de la maturation et (f) maturité

Une culture de canne à sucre étendue sur 12 mois entre en phase de maturation durant environ 3 mois à la fin de son cycle de développement. Alors que la croissance végétative est réduite, la synthèse du saccharose à partir de monosaccharides (fructose et glucose) est accélérée jusqu'à parvenir à une concentration optimale du jus de la canne à sucre (environ 16%). On parle alors de maturité de la culture[19]. Tout stress hydrique en fin de cycle favorisera la formation du sucre, c'est pourquoi les parcelles de la CSS sont séchées artificiellement en arrêtant toute irrigation afin d'anticiper la sénescence et d'augmenter la production de saccharose[20].

### (g) Récolte et (h) levée des repousses

Les tiges sont coupées au niveau du collet manuellement ou à l'aide de coupeuses-tronçonneuses. La canne à sucre étant une plante vivace, son cycle végétatif se reproduit sur plusieurs années (jusqu'à 7 ans en ce qui concerne les parcelles de la CSS). Des repousses prennent alors forme à partir du nœud de tallage et le système racinaire est conservé[15]. Des chiffres croissants sont attribués aux différents cycles de culture. Lors du premier cycle (qui porte la dénomination  $C_0$ ), la canne est nommée « vierge ». Les cycles suivants, les repousses, sont nommées par des chiffres allant de 1 à 6[20].



Figure 9 : Pied de canne à sucre après récolte, Richard Toll

Crédit photo : Charlotte WARRANT

### 2.1.3. Techniques culturales

#### Préparation du sol

La canne à sucre étant une plante vivace restant en place plusieurs années consécutives, une préparation rigoureuse du sol est nécessaire avant chaque cycle végétatif. Les objectifs principaux

Crédit photo : Frédéric FEDER



de ce travail du sol sont d'assouplir la couche supérieure de substrat et de briser toute éventuelle croûte de battance, d'aérer le sol pour favoriser l'activité microbienne, d'incorporer les résidus racinaires de la culture en place précédemment et de préparer un lit de semence adéquat pour la pénétration et la prolifération précoce des racines[21]. Au niveau de la parcelle, le sol est labouré puis sillonné sur une profondeur avoisinant les 30 cm. Le labour initial peut être réalisé à l'aide d'une charrue à disques, idéale en conditions arides et semi-arides et qui permet le déchaumage[22]. La plantation consistera en un dépôt de boutures au sein des sillons[18]. La canne à sucre a besoin d'un sol fertile, profond, humide et bien drainé pour atteindre son optimum de développement[23]. L'espacement des rangées varie de 1 à 2 m<sup>1</sup> en fonction du climat, des pratiques d'irrigation et des besoins techniques relatifs à la mécanisation[8]. Un sarclage manuel peut être réalisé pour éliminer les éventuelles adventices en champs lorsque le développement des jeunes cannes à sucre est suffisamment limité pour le permettre[24].

Figure 10 : Bouturage de la canne à sucre dans les sillons

#### Irrigation

La culture de la canne à sucre nécessite un apport d'eau important et inégal au fil de son cycle végétatif. Afin d'optimiser le rendement, l'apport devra être suffisant en phase de croissance pour stimuler le développement des tiges, et suivi d'une période sèche durant la maturation pour augmenter la teneur en sucre par unité de biomasse sèche[25]–[27]. La FAO[8] estime dans son document intitulé « Crop yield response to water » que l'irrigation est une intervention nécessaire à la mise en place d'une culture de canne à sucre pour toute pluviométrie qui serait inférieure à 1000 mm/an.

Différentes techniques d'irrigation dont les avantages et inconvénients différent peuvent être mises en œuvre. De ce fait, il est possible d'apporter un complément d'eau au champ en surface, en baignant les pieds des plants d'une lame d'eau directement dans les sillons[14]. Cette irrigation gravitaire - permise par la topographie des parcelles - doit être renouvelée régulièrement, en raison du taux d'évaporation important induit par les conditions climatiques sous lesquelles la canne à sucre est produite[28]. Si l'on ajoute les pertes dues au



Crédit photo : Charlotte WARRANT

Figure 11 : Irrigation gravitaire, Richard-Toll

<sup>1</sup> A la CSS, l'écartement standard est de 1,5 m.



ruissellement et l'inégalité de la dose appliquée en champ selon que l'on se trouve proche ou éloigné de la source d'eau, il ne s'agit pas de la technique la plus efficace d'irrigation. En dépit de ceci, elle reste une technique très plébiscitée, en raison de la simplicité de sa mise en œuvre qui la rend particulièrement peu onéreuse. Il est également possible d'irriguer par aspersion, à l'aide d'un pivot central ou de sprinklers, ou encore d'apporter l'eau directement aux pieds des plants par l'utilisation d'un système de gouttes-à-gouttes. Ces deux dernières solutions bénéficient d'une technologie avancée qui permet un contrôle et une optimisation de l'utilisation de l'eau. Largement automatisées, elles nécessitent une main d'œuvre moindre que l'irrigation de surface. Notons tout de même que l'investissement préalable est bien plus conséquent[14].

Crédit photo : Charlotte WARRANT



Figure 12 : Irrigation gouttes-à-gouttes, Richard-Toll

Un sol gorgé d'eau est un milieu asphyxiant et délétère pour la canne à sucre, c'est pourquoi l'irrigation gravitaire de surface ira toujours de pair avec un système de drainage destiné à récupérer les excès d'apport. Ce drainage aura également un effet bénéfique sur le réchauffement du sol, la maturation et la résistance aux maladies fongiques et aux ravageurs[24].

### Fertilisation

La canne à sucre étant une culture dont la production de biomasse est élevée, elle nécessite un apport relativement important en éléments nutritifs[8]. Les besoins sont logiquement plus conséquents durant la phase de tallage et au début de la croissance végétative, quand le taux d'accumulation de biomasse est élevé. Considérant le développement important de la plante, aucun apport NPK n'est permis une fois la pleine croissance atteinte. La « fertigation » est une solution possible pour optimiser l'apport en engrais chimiques. Il s'agit de fusionner fertilisation et irrigation en incorporant les engrais directement dans l'eau et en l'acheminant au champ grâce à un système d'irrigation gouttes-à-gouttes. Les nutriments sont alors délivrés en quantité exacte directement dans la zone d'activité racinaire, qu'importe le stade de développement de la culture[27], [29]. Toutefois, un apport d'azote n'est pas souhaité en phase de maturation, ce dernier favorisant la croissance végétative au détriment de l'accumulation de saccharose[8].

Les besoins en fertilisation et amendements sont naturellement très fortement corrélés à la pédologie propre à chaque parcelle, c'est pourquoi des analyses de sol devraient être réalisées régulièrement pour établir un diagnostic précis des fumures à apporter[24]. Pour indication, le tableau 1 décrit les besoins moyens en fertilisation de la canne à sucre, bien qu'ils soient substantiellement différents d'une variété à l'autre. Le pH acide du sol peut être corrigé par chaulage afin d'atteindre l'idéal situé entre 6 et 7.5[8], [24].

	<b>N</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
<b>Besoins indicatifs</b>	100-200 kg/ha	40-60 kg/ha	150-300 kg/ha

Tableau 1 : Besoins indicatifs de la canne à sucre pour un rendement en tiges fraîches estimé à 100 t/ha (8), (24)

## Récolte et rendement

Actuellement, la récolte de la canne à sucre au Sénégal se fait manuellement après brûlage. Cette technique controversée d'un point de vue environnemental consiste à bouter le feu à une parcelle pour éliminer au maximum les feuilles afin de faciliter l'accès aux coupeurs et de la débarrasser de sa faune potentiellement dangereuse. Une mécanisation plus intense, impliquant le trafic de machines lourdes telles que des coupeuses-tronçonneuses, entraînerait une dégradation de la topographie du sol[21]. La culture étant menée en moyenne sur 7 ans, il est essentiel que les crêtes et les sillons réalisés lors de la préparation du sol en  $C_0$  soient conservés. Il est également essentiel d'éviter au maximum le compactage du sol qui conduirait à une baisse de rendement des cycles ultérieurs[21]. La canne à sucre doit être récoltée à maturité maximale (ni trop tôt, ni trop tard), en la coupant le plus ras possible afin de récupérer les entre-nœuds de la base de la tige qui sont les plus riches en sucre. Les entre-nœuds supérieurs immatures sont également éliminés et laissés sur champs pour servir de fourrage au bétail. La canne coupée sera ensuite acheminée le plus rapidement possible à l'usine pour ne pas dégrader la qualité de son jus[30].



Crédit photo : Charlotte WARRANT

Figure 13 : Brûlage de la canne à sucre, Richard-Toll

Les cannes sont coupées au ras des souches, puis mises en andains pour être ramassées mécaniquement ou manuellement et acheminées jusqu'à l'usine de traitement pour être broyées. Pour ne pas altérer la qualité du jus, il ne devrait pas s'écouler plus de 24 heures entre le broyage et la récolte pour une canne brûlée, et 48 heures pour une canne fraîche[24].

Le rendement varie fortement selon les variétés et les conditions pédoclimatiques. D'une manière générale, les rendements constatés en cultures irriguées sont plus élevés qu'en cultures pluviales. En situation particulièrement favorable, des rendements expérimentaux de plus de 200 t/ha de tige fraîche et de 24 t/ha de saccharose ont pu être atteints[3] in [22]. En conditions réelles, le rendement en tige fraîche se situera plus probablement entre 80 et 150 t/ha et la production de saccharose oscillera entre 10 et 17 t/ha[32] in [8]. En outre, le rendement tend à décroître au fil des repousses, la  $C_1$  étant généralement la plus productive en t de cannes[33].



Crédit photo : Charlotte WARRANT

Figure 14 : Coupeuse-tronçonneuse vs. récolte manuelle

## 2.2. Sucre de canne

Comme l'illustre la figure 15 transposant géographiquement la production de canne à sucre pour l'année 2014, cette culture est particulièrement prolifique sur le continent américain et en Asie du Sud-Est[34]. Le continent africain, pénalisé par un climat plus aride, connaît une moindre production de canne à sucre, bien qu'elle soit vouée à se développer dans les prochaines années, à l'aide de techniques d'irrigation maîtrisées[35].

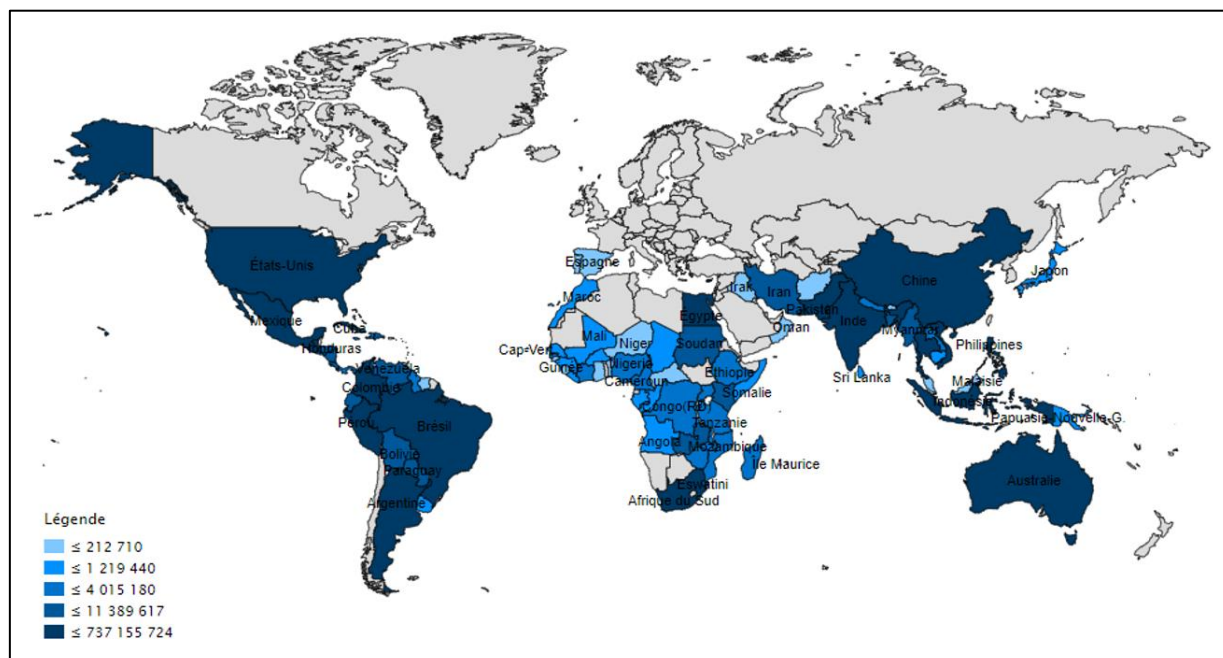


Figure 16 : Production (en t) par pays de cannes à sucre pour l'année 2014 (34)

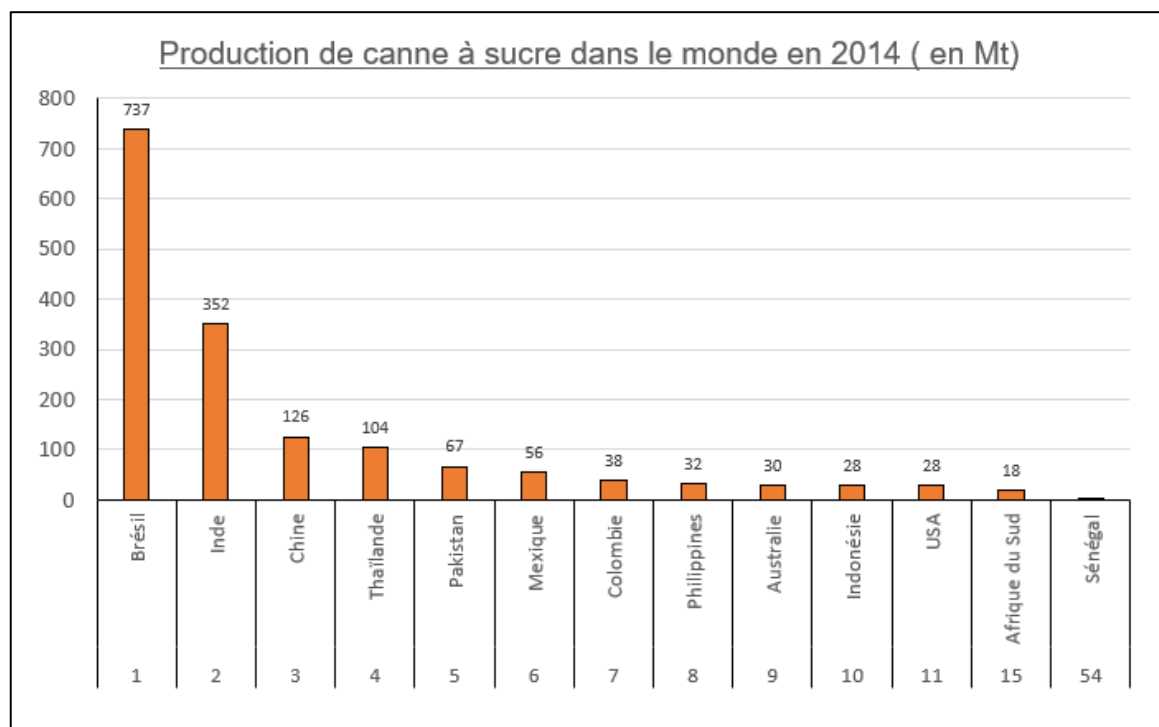


Figure 15 : Principaux producteurs de canne à sucre en 2014 (en Mt) (réalisation personnelle basée sur des chiffres trouvés sur le site de l'Université de Sherbrooke – faculté de politique (34))

Le plus important producteur de canne à sucre est sans conteste le Brésil, avec quelques 737 Mt en 2014, soit plus du double de l'Inde qui arrive en seconde position[34]. Le premier pays producteur africain est l'Afrique du Sud, avec quelques 18 Mt mises sur le marché en 2014. Dans ce classement, le Sénégal arrive à la 54<sup>ème</sup> position, avec un peu plus de 1,2 Mt de canne à sucre produites en 2014[34]. La production mondiale de canne à sucre en 2016 avoisinait 1680 Mt, ce qui la plaçait à la troisième place des cultures les plus conduites au niveau mondial, derrière les céréales (toutes confondues) et le riz[35]. Compte tenu de sa bonne rentabilité à l'hectare par rapport aux cultures concurrentes, la culture sucrière devrait se développer dans de nombreuses régions du monde. La production de canne à sucre devrait ainsi progresser de 1,1 % / an dans les 10 prochaines années[35].

La consommation mondiale de sucre croît en moyenne de 1,48 % / an, ce qui devrait la porter à 198 Mt à l'horizon 2027[35]. L'Afrique, avec une importante demande interne en sucre, serait marquée par une augmentation de 36% au niveau de sa production en sucre grâce au développement des capacités de production[36]. Malgré cette croissance, le continent continuera de ne participer au marché mondial que dans une proportion modeste (7 % en 2027)[35].

Une tige de canne à sucre dont on a ôté le sommet immature contient peu ou prou 70% d'eau, 15% de fibres, 13% de saccharose et 2% d'impuretés[8]. A leur arrivée à l'usine, les cannes à sucre sont débitées en petits tronçons, pressées et broyées dans plusieurs moulins. Séparé de sa bagasse (résidu fibreux de la canne écrasée), le jus de canne obtenu contient cette fois 80 à 85 % d'eau, 10 à 20% de sucre et entre 0.7 et 3 % d'impuretés[37]. Il est donc nécessaire de filtrer ce jus pour éliminer les impuretés et de le porter à ébullition afin d'évaporer au maximum l'eau qui le compose. Le jus concentré résultant de cette opération sera ensuite cristallisé et essoré pour extraire du sucre dit de « premier jet ». Le sirop recueilli à la suite de la cristallisation et de l'essorage, encore chargé en saccharose, sera recuit afin d'obtenir un sucre de « deuxième jet », dont la couleur est plus foncée. Le sirop résiduel sera cuit une troisième et dernière fois pour donner le sucre « de troisième jet », de couleur brune, et un liquide visqueux appelé « mélasse »[37].

### 2.3. La Compagnie Sucrière Sénégalaise

La Compagnie Sucrière Sénégalaise est un complexe agro-industriel appartenant au groupe MIMRAN qui couvre l'ensemble des opérations de la filière sucrière, de la production de canne à sucre, à sa transformation en sucre raffiné. Elle est implantée à Richard Toll, dans le nord du Sénégal, dans la vallée du fleuve homonyme, et s'étend sur plus de 12 000 ha[38]. Sa capacité de production de 145 000 t de sucre par an en fait l'un des leaders de l'industrie sucrière d'Afrique de l'Ouest et le principal pourvoyeur de sucre du Sénégal. L'objectif de croissance de l'usine est d'atteindre 200 000 t par an à l'horizon 2020-2023 et, ainsi, de pouvoir assurer l'autosuffisance en sucre du pays[38]. Avec près de 8 000 employés en période de campagne sucrière (de novembre à juin), la CSS s'avère être un acteur essentiel du paysage économique du pays et est le moteur de l'expansion de la ville de Richard Toll[38].



Figure 17: Compagnie sucrière sénégalaise

Crédit photo : Charlotte WARRANT

En plus de produire du sucre , la maîtrise de l'ensemble de la chaîne de production permet à la CSS de valoriser les résidus de canne par la fabrication de mélasse destinée au bétail et d'éthanol (13 millions de litres par an), ainsi que d'être autosuffisante en énergie. En effet, l'usine utilise les résidus secs de canne à sucre, appelés bagasse, comme combustible dans une chaudière à vapeur qui permet de fournir l'énergie électrique nécessaire à son fonctionnement[37].

Crédit photo : Charlotte WARRANT



Figure 18 : Usine de la CSS vue depuis les champs de canne à sucre irrigués

La production agricole de la CSS avoisine les 1,5 millions de t de canne à sucre et est mise en œuvre sur un périmètre entièrement irrigué de 11 000 ha de SAU. Deux systèmes d'irrigation s'y côtoient : irrigation gravitaire (8 000 ha) et irrigation gouttes-à-gouttes (3 000 ha) [20]. L'irrigation gravitaire consiste en l'écoulement, à l'air libre, d'un film d'eau à l'intérieur des lignes de canne à sucre . Elle est permise par la topographie du terrain et les propriétés hydriques du sol (ruissellement, infiltration, et capillarité). Elle est amorcée manuellement depuis un fossé immergé, et l'eau excédentaire est récoltée par un drain à l'opposé du champ[39]. L'irrigation gouttes-à-gouttes est pratiquement entièrement automatisée et permet un apport précis d'eau. Elle consiste à conduire l'eau à très faible débit au pied des plants de canne à sucre à l'aide de petits tuyaux percés, posés sur le sol ou enterrés. Si l'investissement est conséquent, cette technique permet de limiter les actions humaines et de limiter les pertes d'eau par évaporation, ruissellement ou percolation profonde[29].

Le stage au sein de la CSS s'est déroulé au sein du département de la direction des plantations qui, en plus de mener à bien la production de la canne à sucre, prend en charge la recherche agronomique et le développement du réseau hydraulique (400 km de drains à ciel ouvert, 500 km de canaux d'irrigation ) et routier (plus de 1000 km de pistes aménagées). Le complexe agro-industriel est ainsi pourvu d'un laboratoire, de stations météorologiques, et de différentes parcelles de test[20].

La fondation Marie-Louise MIMRAN, dont la CSS est membre fondateur, œuvre en faveur de la population locale via des initiatives en matière de santé, d'éducation, d'approvisionnement en eau et de maraichage[38].

## 2.4. Le Centre de Suivi Ecologique

Le Centre de Suivi Ecologique (CSE) est une institution établie à Dakar depuis 1986 et reconnue depuis 1993 comme « institution d'utilité publique »[40] . Le CSE est spécialisé dans la production et la diffusion de données environnementales et dans la gestion durable des ressources naturelles, grâce – notamment - à son expertise en matière de télédétection. Il fournit également des services d'alerte précoce en matière de feu de brousse ou de sécurité alimentaire en assurant le suivi du développement de la végétation[41]. Le CSE est un moteur scientifique qui contribue au

développement durable en produisant des données d'aide à la prise de décision à destination de tous – Etat, exécutifs locaux, ONG, secteur privé ou encore particuliers[42].

Les interventions du CSE se sont étendues à de nombreux pays d'Afrique centrale et il est dorénavant une institution de référence au niveau international pour des matières telles que les études d'impact du changement climatique , la gestion des littoraux, la sécurité alimentaire, la dynamique des écosystèmes, l'aménagement du territoire et la valorisation économique des services écosystémiques[41].

Le CSE, bien que placé sous la tutelle du Ministère de l'Environnement Sénégalais, jouit d'une personnalité morale qui lui assure une relative autonomie financière et administrative[40]. La contribution financière de l'Etat est portée à hauteur de 20% du budget de fonctionnement. Le centre est également financé par d'autres institutions telles que – notamment - l'Union-Européenne, l'Agence des États-Unis pour le Développement International (USAID), le Centre de Recherche pour le Développement International (CRDI) ou la Banque Africaine de Développement (BAD)[40].

En 2010 et en 2015, le CSE a été accrédité successivement comme entité de mise en œuvre de projets par le Fond d'Adaptation au Changement Climatique (FACC), puis par le Fond Vert Climat (FVC). Ces fonds sont basés sur le Mécanisme de Développement Propre (MDP) mis en place par le protocole de Kyoto. Le MDP requiert que les pays les plus développés soutiennent financièrement des projets de développement durable ou d'adaptation au changement climatique dans des pays en cours de développement[43].

## 3. Matériel et méthode

### 3.1. Objet de l'étude

La ville de Richard-Toll est située au Nord-Ouest du Sénégal, dans le département de Dagana, au cœur de la région de Saint-Louis[38]. La ville s'est construite autour de l'industrie sucrière. La population a en effet décuplé en 40 ans, passant de 5.000 habitants en 1970 à près de 50.000 en 2007. Etablie sur la rive gauche du fleuve Sénégal, elle bénéficie d'une facilité d'irrigation qui lui permet une agriculture intensive, en dépit du climat aride dont souffre la région.



Figure 19 : Richard-Toll et sa région, vues du ciel (44)

Les près de 500 km de canaux parcourant les champs de la CSS entre le fleuve Sénégal et le lac de Guiers permettent la mise en œuvre de 12.000 ha de canne à sucre sur des terres qui ne pourraient être cultivées sans irrigation[44].

La présente étude porte sur 2 parcelles irriguées gravitairement représentatives de trois types de sol (limono-argileux, argilo-limoneux et argileux), divisées en 6 bandes, elles-mêmes découpées en 12 placettes délimitées à l'aide de piquets de bois. Les photographies hémisphériques ont été réalisées aux quatre coins de chaque placette, ce qui porte le nombre d'images à analyser à 48 pour chaque échantillonnage. Les prises de vues ont été réalisées une fois par semaine, en matinée, à raison d'une parcelle par jour. La largeur des placettes est de 6 sillons et leur longueur est de 9 mètres, soit une superficie de 81 m<sup>2</sup>. Un espace de 2m de large a été dégagé autour des placettes afin de faciliter la prise des photos, ce qui aura un impact très léger sur le rendement final de la parcelle[10].

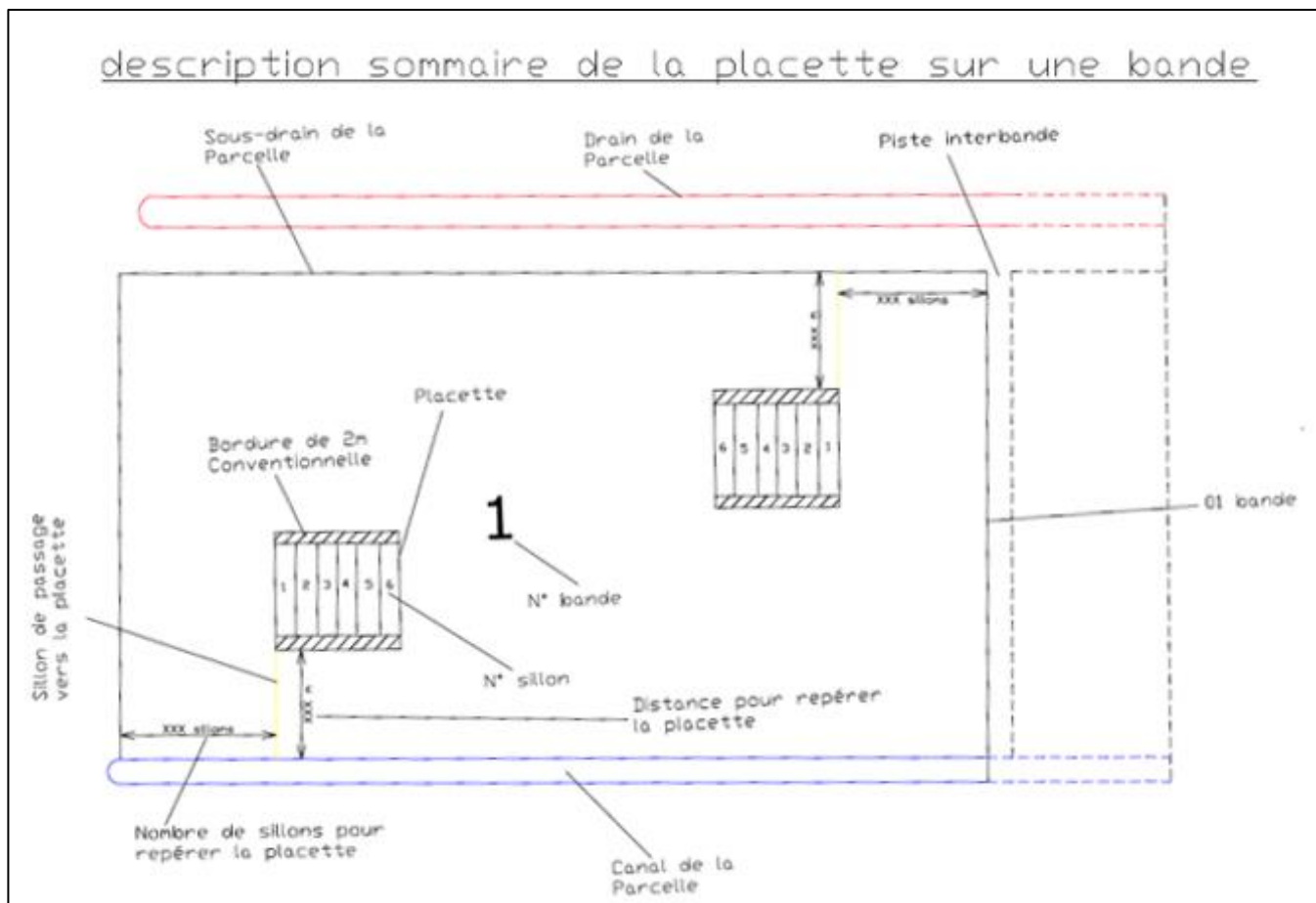


Figure 20 : Schématisation de la procédure d'échantillonnage au niveau des parcelles F5 et F5a (NDIAYE, 2017)

Il existe une multitude de variétés de canne à sucre qui peuvent s'adapter à différentes conditions pédoclimatiques et proposent des rendements et concentrations en sucre variables. Chaque variété est affublée d'une désignation lettrée et chiffrée, selon son pays d'origine. La variété sélectionnée pour cette étude est la N14, qui a été développée en Afrique du Sud. Il s'agit de la variété dominante au sein des parcelles de la CSS. Elle est particulièrement intéressante pour ses hauts rendements en canne et sa concentration satisfaisante en sucre[45]. Il s'agit d'une variété sensible aux stress hydriques[30]. Sa floraison abondante est contrôlée par les équipes de la CSS par application d'un inhibiteur. Les parcelles utilisées pour calibrer le modèle AQUACROP sont en C<sub>2</sub> (seconde repousse). Partir d'une culture déjà installée permet de bénéficier d'un réseau racinaire en place. Le cycle de culture de la canne à sucre sur les champs de la CSS étant en moyenne de 7 années, cet état de fait est le plus courant.



## 3.2. Modèle de prévision de rendement AQUACROP

### 3.2.1. Contexte de la recherche

Dans une région aride telle que celle de Richard Toll, le principal facteur limitant la croissance de la végétation est l'apport en eau. Le concept de « réponse du rendement à l'eau » met en relation le rendement d'une culture avec le stress hydrique qu'elle aurait subi durant sa mise en œuvre[6]. Doorenbos et Kassam[46] ont qualifié cette réponse par une relation empirique :

$$\left[1 - \frac{Y}{Y_x}\right] = K_y \left[1 - \frac{ET}{ET_x}\right]$$

Équation 1 : Réponse du rendement à l'eau

Où	$Y_x$	Rendement maximal (kg)
	$Y$	Rendement réel (kg)
	$ET_x$	Evapotranspiration maximale (mm)
	$ET$	Evapotranspiration réelle (mm)
	$K_y$	Facteur de proportionnalité entre le déclin relatif du rendement $(1 - \frac{Y}{Y_x})$ et la réduction relative de l'évapotranspiration $(1 - \frac{ET}{ET_x})$

AQUACROP pousse plus loin la réflexion en scindant l'évapotranspiration et le rendement en deux composantes distinctes. L'évaporation du sol est ainsi disjointe à la transpiration de la culture, ce qui permet de distinguer la consommation d'eau réellement productive. De même, la composante de rendement fait la distinction entre la biomasse et le rendement réellement commercialisable d'une plante, dont la réponse au stress hydrique n'est pas similaire [7]. La distinction entre ces deux notions sera faite dans le chapitre suivant.

Ces ajustements conduisent AQUACROP à prédire des rendements à partir d'une équation de base[28]:

$$B = WP \cdot \sum Tr$$

Équation 2 : Biomasse en fonction de la transpiration

Où	$B$	Biomasse (kg)
	$WP$	Productivité de l'eau ( $kg\ m^{-2}\ mm^{-1}$ )
	$Tr$	Transpiration de la culture (mm)

La productivité de l'eau pour une culture est une mesure de l'efficacité du processus physiologique de production de biomasse. Elle exprime la quantité de matière sèche produite par unité de surface et par unité d'eau transpirée[8], [28], [47].

Cette équation simple prend sa place dans un modèle plus complexe, composé de paramètres pédologiques, hydrologiques, phénologiques et atmosphériques. En outre, certains aspects de

gestion agronomique ont été intégrés en raison de leur impact sur le bilan en eau ou le développement de la culture (irrigation, fertilisation, produits phytosanitaires, etc.)[6].

La force du modèle AQUACROP réside dans sa simplicité d'utilisation et dans le nombre réduit de variables - aisément collectables et souvent intuitives - qui sont nécessaires à son fonctionnement. Cette volontaire candeur fait d'AQUACROP un outil capable de sortir de la sphère scientifique pour trouver une place auprès des opérateurs de terrain. Nonobstant, la précision du modèle pourrait s'avérer inférieure à celle de ses pairs. Il s'agit donc ici de réussir à concilier de manière optimale simplicité et rigueur pour parvenir à un équilibre satisfaisant entre accessibilité et pertinence.

### 3.2.2. Description du fonctionnement du modèle AQUACROP

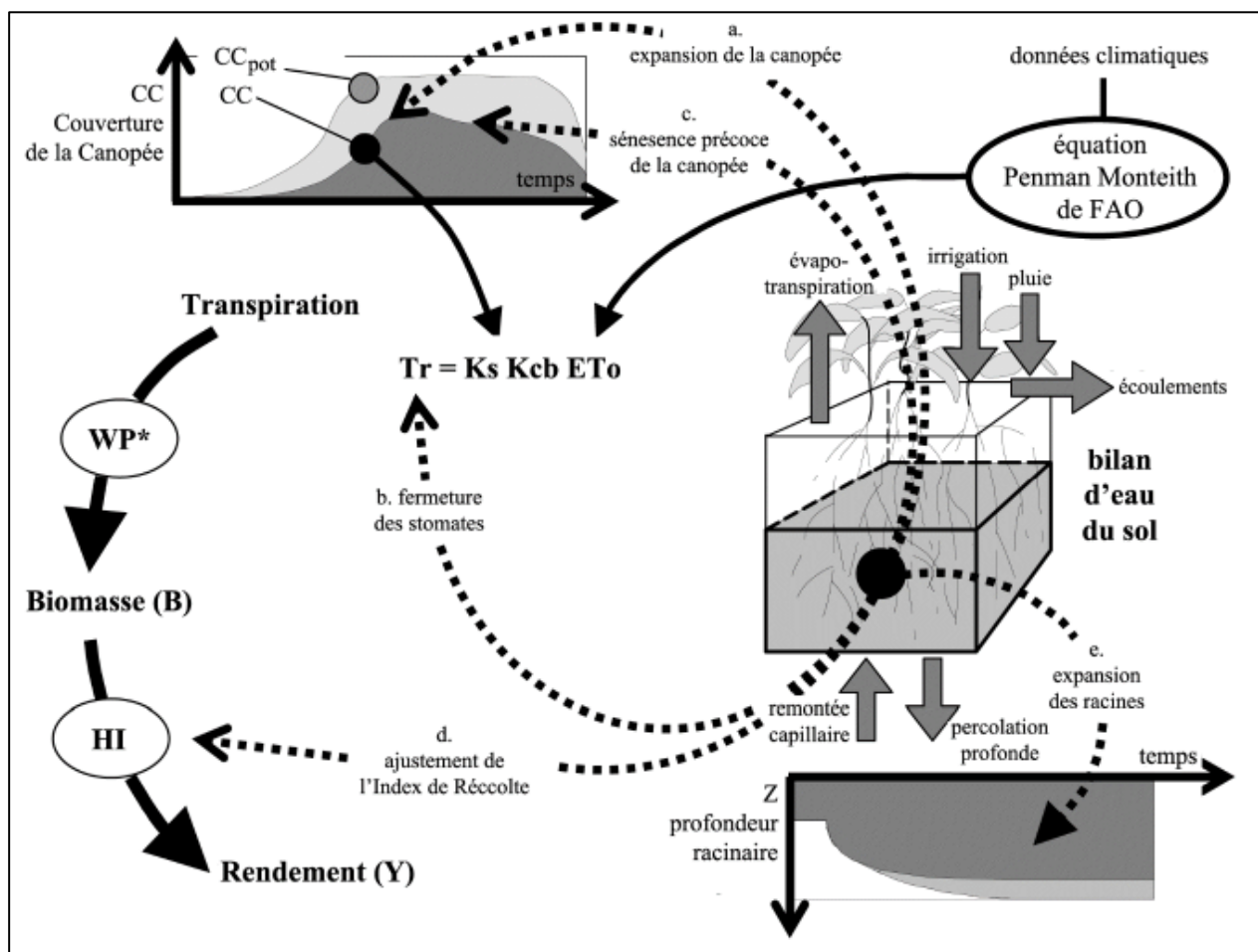


Figure 21 : Schéma de calcul d'AQUACROP indiquant (en flèches discontinues) les processus affectés par les stress hydriques (de a à e) et (en flèches continues) les étapes conduisant à la prévision du rendement ((7)).

Le modèle de simulation de croissance des cultures AQUACROP a été développé et diffusé par la FAO en 2009[6]. Il est basé sur le calcul du bilan en eau du sol permettant de mettre en évidence tout stress hydrique impactant la culture. Ainsi, la quantité d'eau disponible au niveau de la zone racinaire est simulée en mettant en relation les flux d'eau entrants (précipitations, irrigation et remontée capillaire) et sortants (évapotranspiration, ruissellement et percolation profonde). Naturellement, ce bilan est influencé par la profondeur racinaire qui permet une utilisation plus ou

moins soutenue de la réserve d'eau du sol. L'échelle temporelle retenue par AQUACROP est de 24 heures. Le bilan est donc revu journalièrement[7].

Comme l'illustre la figure 21, tout stress hydrique aura un impact non négligeable, que le modèle tente de simuler, sur :

#### a. L'expansion de la canopée

Le modèle AQUACROP utilise la couverture de la canopée (Canopy Cover = CC) comme indice du développement de la culture. Comme l'illustre la figure 22, ce cycle de développement peut être scindé en plusieurs phases successives[7] :

- L'expansion de la canopée, qui s'étend de  $CC_0$  (couverture initiale de canopée pour une émergence de 90% des plantules[8]) jusqu'à la couverture maximale de la canopée ( $CC_x$ ). La pente de la courbe d'expansion de la canopée est déterminée par le coefficient de croissance de la canopée (CGC) ;
- Le seuil de couverture maximale de la canopée ;
- La sénescence, dont la rapidité est déterminée par le coefficient de déclin de la canopée (CDC). Notons que dans la réalité, le Canopy Cover en fin de culture n'est jamais nul, la canne à sucre étant récoltée à sa maturité.

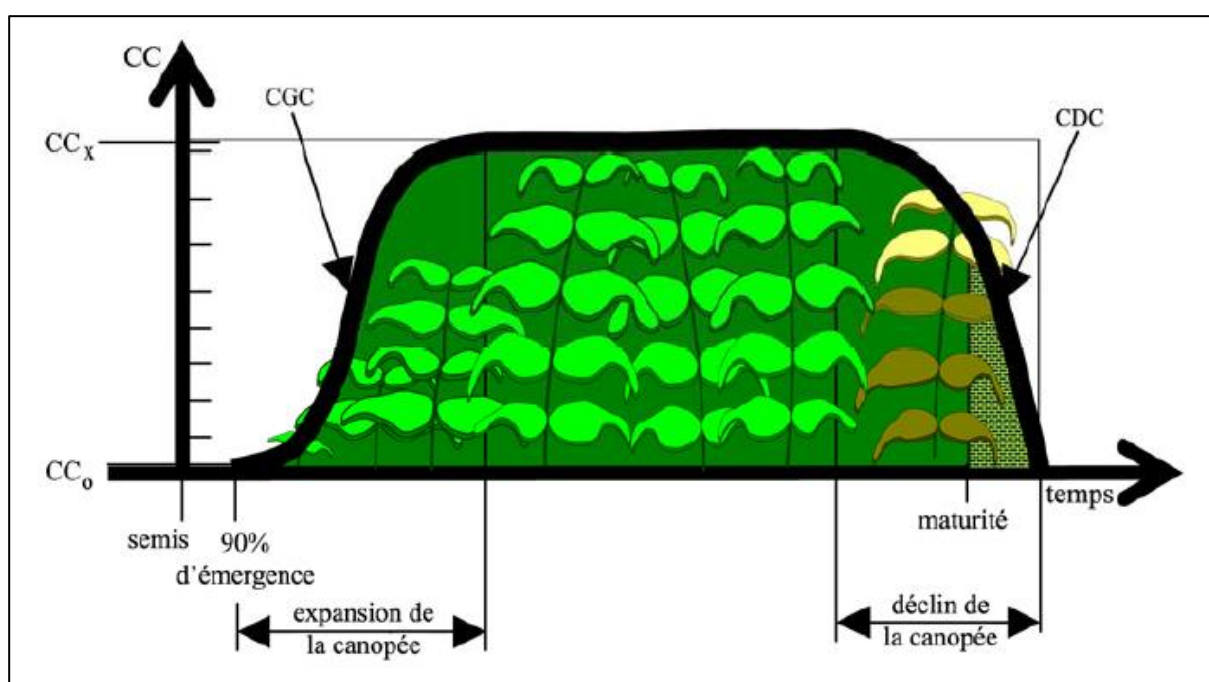


Figure 22 : Evolution de la couverture de la canopée à travers le cycle de développement idéal de la canne à sucre (en absence de stress) (7).

En cas de stress hydrique, le Canopy Cover réellement observé divergera du Canopy Cover potentiel de la culture ( $CC_{pot}$ ), ce qu'indiquent les deux courbes illustrées à la figure 21. Le seuil de développement maximal de la culture sera alors abaissé, conduisant à une baisse irrémédiable de la biomasse produite, et donc du rendement[6].

## b. La conductance stomatique

Un déficit hydrique aura également un impact sur l'ouverture et la fermeture des stomates, et par conséquent sur la transpiration ( $Tr$ )[7]. Les stomates sont les pores à travers lesquels sont possibles les échanges gazeux avec l'atmosphère. En réponse à un stress hydrique, une plante aura tendance à limiter les échanges avec l'extérieur pour conserver au maximum l'eau qui la compose, et donc à fermer ses stomates. Or, la photosynthèse – source de l'énergie nécessaire à la croissance des végétaux - nécessite un apport de  $CO_2$  atmosphérique. On peut donc conclure qu'une végétation qui transpire peu, se développe peu[48].

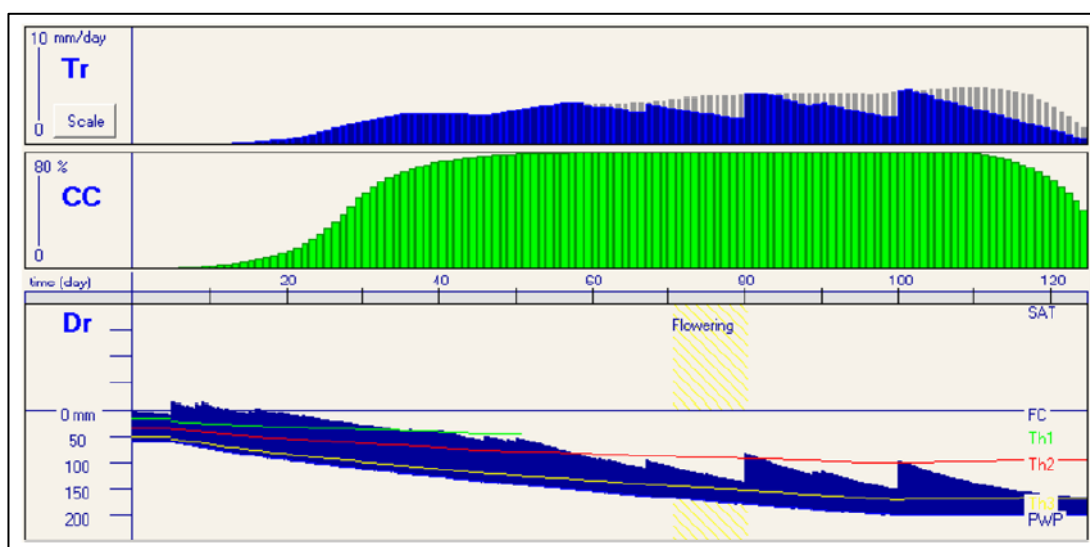


Figure 23 : Simulations de l'épuisement en eau de la zone racinaire ( $Dr$ ), de la couverture de la canopée ( $CC$ ) et de la transpiration de la culture ( $Tr$ ) (7).

La figure 23, issue de l'interface d'AQUACROP schématise la relation entre la transpiration ( $Tr$ ) et l'épuisement en eau de la zone racinaire ( $Dr$ ). La courbe verte ( $Th1$ ) représente le seuil de stress hydrique affectant le développement de la canopée. La courbe rouge ( $Th2$ ) indique le seuil de stress incitant à la fermeture stomatique. Et la courbe jaune ( $Th3$ ) équivaut au seuil de stress conduisant à une sénescence précoce. Nous pouvons ainsi remarquer que chaque pic négatif du bilan en eau passant sous  $Th2$  induit une chute de la transpiration[7]. Lorsque l'eau disponible au niveau de la zone racinaire passe sous la courbe  $Th1$ , le développement de la canopée ( $CC$ ) est ralenti. Sur l'exemple présenté, le bilan hydrique ne traversant jamais le seuil de flétrissement permanent, nous n'assistons pas à une sénescence précoce.

Cette relation entre la transpiration de la végétation et les stress hydriques perçus est au cœur du modèle AQUACROP[6], comme l'illustre l'équation au centre de l'équation 3, reprise ci-dessous :

$$Tr = K_s \cdot K_{cb} \cdot ET_0$$

Équation 3 : Transpiration d'une culture

De cette manière, la transpiration est obtenue par multiplication de l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) par le coefficient cultural ( $K_{cb}$ ) propre à la culture étudiée et par le coefficient de stress hydrique ( $K_s$ )[6]. Le  $K_{cb}$  est fonction du stade de développement de la plante. Contrairement au schéma proposé à la figure 21 qui lie le calcul de l'évapotranspiration de référence à l'équation de Penman-Monteith[7], l' $ET_0$  sera ici simplifiée par le recours au coefficient d'évaporation en bac

explicité lors des chapitres suivants. Si un stress hydrique provoque une fermeture des stomates, le coefficient de stress lié à la conductance stomatique ( $K_s$ , compris entre 0 et 1) diminuera et, par-là, la transpiration.

Rappelons-le, la simulation de rendement ( $Y$ ) d'AQUACROP est effectuée à partir du calcul de la biomasse ( $B$ ), lui-même réalisé en mettant en relation la transpiration de la culture et son coefficient de productivité de l'eau ( $WP$ )[49],[28] (voir équation 2).

### c. La sénescence et le déclin de la canopée

En plus de limiter l'expansion de la canopée, les stress hydriques auront un effet sur l'anticipation de la sénescence de la culture, conduisant à une réduction du cycle de développement et, finalement, à une chute du rendement. La sénescence précoce de la canopée est déclenchée quand le stress devient sévère et que l'on s'approche du point de flétrissement permanent[6].

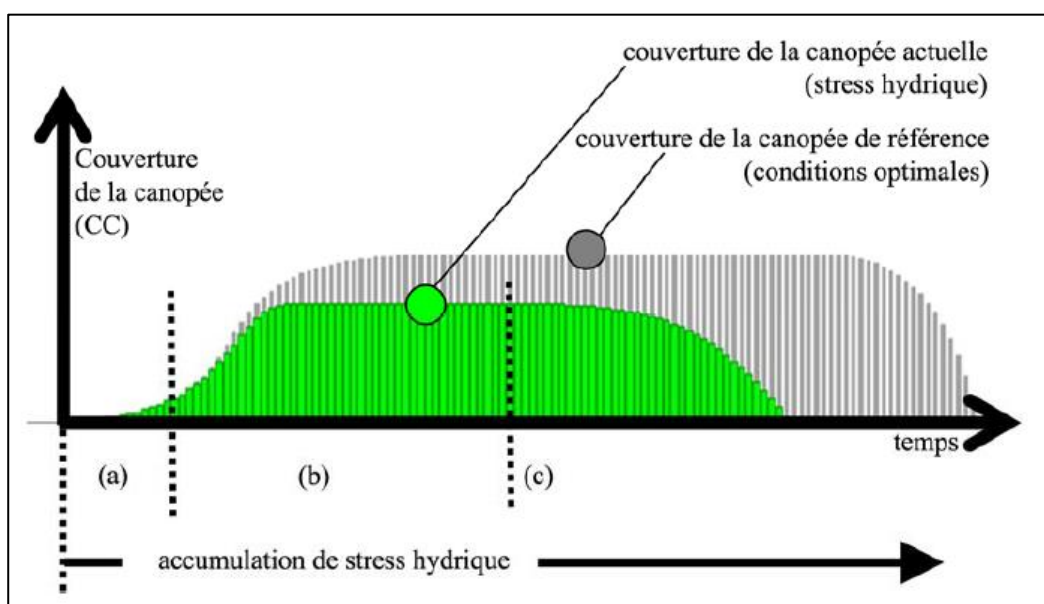


Figure 24 : Simulation de couverture de canopée verte (CC) quand le stress en eau s'accumule durant le cycle de la culture, comparée avec le développement de la canopée en absence de stress. Légende : (a) pas d'effet de stress en eau sur le développement de la canopée ; (b) stress en eau affectant l'expansion des feuilles ; (c) stress hydrique déclenchant un déclin précoce de la canopée (CCpot) (7).

### d. L'indice de récolte

Comme l'indique l'équation 4 étudiée ci-avant, il est possible d'obtenir une estimation de la biomasse aérienne produite lors de chaque jour du cycle cultural en multipliant la productivité de l'eau par la quantité transpirée par la culture. Afin de mettre en évidence la composante de stress hydrique, la transpiration réelle de la culture peut être rapportée à l'évapotranspiration de référence ( $Tr/ET_0$ )[49]. Abstraction faite du bilan en eau du sol, la production de biomasse peut également être impactée par des températures insuffisantes ou excessives. AQUACROP intègre donc un coefficient de stress thermique ( $K_{sb}$ )[7] :

$$B = K_{sb} \cdot WP * \sum \frac{Tr}{ET_0}$$

Équation 4 : Biomasse intégrant les stress thermiques

Dans la mesure où le modèle ne propose pas de partition de la biomasse aérienne entre les différents organes, le calcul du rendement sera fonction de l'indice de récolte de la culture (HI)[49]. Suite à l'évolution journalière des stress hydriques et thermiques, l'indice de récolte est continuellement ajusté durant le cycle de développement de la plante.

Une étude sortie en 2000 a estimé qu'un stress hydrique prolongé sur une durée de 6 semaines au milieu de la phase de croissance végétative pouvait conduire à des baisses de production de biomasse fraîche de l'ordre de 8 à 15% et des diminutions du rendement en sucre de l'ordre de 12 à 19%[50].

Le rendement est obtenu en mettant en relation la biomasse aérienne et l'indice de récolte ajusté en fonction des stress perçus ( $f_{HI}$ )[7] :

$$Y = B \cdot HI_{max} \cdot f_{HI}$$

Équation 5 : Rendement en fonction de la biomasse et de l'indice de récolte ajusté

AQUACROP relève également l'impact des stress hydriques sur l'indice de récolte (HI). Dans un premier temps, notons que HI se construit graduellement au fil du développement de la plante, et ce jusqu'à sa maturité. Il semble dès lors évident qu'une sénescence anticipée, induisant une diminution du cycle de développement de la culture, réduirait le potentiel de son indice de récolte[49].

#### e. L'expansion des racines

Le développement d'une plante ne se limite pas à sa biomasse aérienne. En conséquence, les stress hydriques auront également un impact négatif sur le taux d'enracinement dans la zone racinaire et sur la profondeur des racines (zone sombre représentée sur la figure 21)[7].

### 3.3. Variables d'entrée

Le modèle AQUACROP nécessite l'intégration de différents paramètres pour optimiser sa précision. Le propos principal du stage réalisé à Richard Toll sur la période d'avril à mai 2018 était de collecter les données de terrain manquantes nécessaires à l'élaboration des fichiers d'entrée du logiciel AQUACROP.

Comme l'interface tirée du logiciel le démontre, les données essentielles afin de proposer une simulation de rendement effective sont des données climatiques, pédologiques et piézométriques, les informations relatives à l'irrigation, ainsi que des observations en champs. Les données relevant de pratiques culturales autres que l'irrigation (amendements, lutte phytosanitaire, etc.) ont été volontairement écartées pour simplifier l'utilisation ultérieure du logiciel, le postulat de base étant que tous les besoins minéraux et organiques de la plante sont comblés et que la lutte contre les invasives est efficace.

Le fichier intitulé « Crop » est constitué d'une multitude de paramètres qui permettent de caractériser le cycle de vie et les particularités de la canne à sucre. La modification des paramètres disponibles dans ce fichier devrait permettre de calibrer au mieux le logiciel AQUACROP en le mettant en concurrence avec les données réellement observées en champs.

Les divers fichiers intégrés dans l'interface d'AQUACROP pour faire fonctionner le logiciel ont été collectés et mis en forme tel que décrit dans les paragraphes suivants.

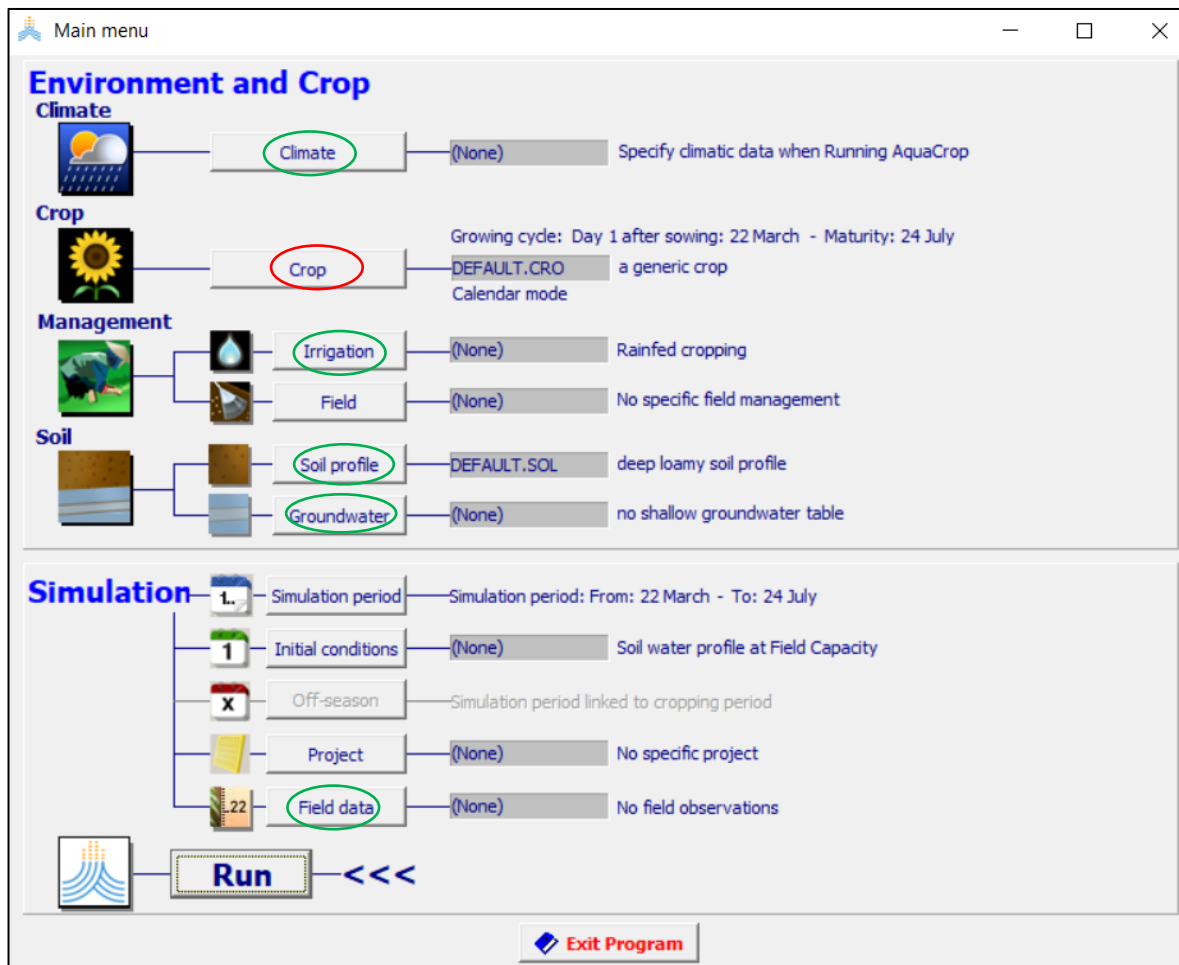


Figure 25 : Interface AQUACROP (7)

### 3.3.1. Variables climatiques

Le fichier climat requiert d'intégrer les données de températures maximales et minimales journalières, ainsi que les données d'évapotranspiration réelle. Plusieurs stations météorologiques prennent place sur le site d'exploitation de la CSS, ce qui a permis d'établir une base de données au plus proche de la réalité de chaque parcelle .

Les températures journalières maximales et minimales sont issues des fichiers dédiés aux années 2017 et 2018.

L'équation de Penman-Monteith est la méthode plébiscitée par la FAO pour le calcul de l'évapotranspiration de référence<sup>2</sup> :

<sup>2</sup> Evaporation d'un peuplement idéal, tel que défini par le document de la FAO « Irrigation and Drainage Paper 56 », disposant d'eau à volonté[72].

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} - u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad 3$$

Équation 6 :  $ET_0$  par Penman-Monteith (51)

Où	$ET_0$	Evapotranspiration de référence (mm jour <sup>1</sup> )
	$R_n$	Rayonnement global (MJ m <sup>-2</sup> jour <sup>1</sup> )
	$G$	Flux de chaleur dans le sol par conduction (MJ m <sup>-2</sup> jour <sup>1</sup> )
	$T$	Température de l'air prise à une hauteur de 2 m (°C)
	$u_2$	Vitesse du vent prise à une hauteur de 2 m (m s <sup>-1</sup> )
	$e_s$	Pression de vapeur saturante (kPa)
	$e_a$	Pression de vapeur réelle (kPa)
	$\Delta$	Pente de la courbe de pression de vapeur (kPa °C <sup>-1</sup> )
	$\gamma$	Constante psychrométrique (kPa °C <sup>-1</sup> )

Malheureusement, les relevés météorologiques journaliers menés par la CSS sur la période 2017-2018 n'intègrent pas les données de vitesse du vent. C'est pourquoi un calcul précis de l'évapotranspiration par cette méthode a dû être rejeté en faveur d'une méthode simplifiée, basée sur l'évaporation en bac. Le document « Irrigation and Drainage Paper N°56 – Crop evapotranspiration » de la FAO[51] nous permet ainsi d'estimer l'évapotranspiration réelle à l'aide d'un coefficient  $K_p$  calculé sur base de la force du vent et de l'évaporation en bac d'eau :

$$ET_0 = K_p \cdot E_p$$

Équation 7 :  $ET_0$  par le coefficient d'évaporation en bac (8)

Où	$ET_0$	Evapotranspiration de référence (mm jour <sup>1</sup> )
	$K_p$	Coefficient d'évaporation en bac ( $p$ pour « pan »)
	$E_p$	Evaporation en bac (mm jour <sup>1</sup> )

Pour parvenir à cette estimation du  $K_p$ , la composante de vitesse du vent sera classée en quatre catégories : « Léger » : moins de 2 m/s ; « Modéré » : 2 à 5 m/s ; « Fort » : 5 à 8 m/s et « Très fort » : plus de 8 m/s[51]. Le  $K_p$  dépendra également du type de bac et de l'environnement dans lequel il est installé. Cet indice a été calculé par décade, sur base de moyennes statistiques de vitesses de vent prises à 2 m de hauteur sur les années précédentes[51].

Le taux d'évaporation en bac (mm/jour) est obtenu en calculant la différence de niveau de l'eau contenue dans un bac standard, et en lui soustrayant le volume des précipitations journalières[52]. Le bac d'eau permet de mesurer l'effet intégré du rayonnement, du vent, de la température et de

<sup>3</sup> Equation de Penman-Monteith de la FAO[51]



l'humidité sur une surface d'eau libre. Il s'agit néanmoins d'une approximation, quelques différences notables subsistant par rapport à une surface cultivée[53]. Notons, notamment, que la profondeur du bac étant limitée, une partie du rayonnement solaire sera réfléchi, et que le bilan énergétique sera impacté par les transferts de chaleur qui ont lieu au niveau des parois du bac. A l'opposé, la chaleur latente contenue dans l'eau peut provoquer une évaporation plus ou moins importante durant le cycle nocturne, or l'évapotranspiration de la canne à sucre est pratiquement nulle de nuit[54].



Crédit photo : Novalynx Corporation

Figure 26 : Bac d'évaporation de classe A sur substrat sec

### 3.3.2. Variables pédologiques

Des carottages ont été effectués au sein de chaque placette pour mettre en évidence l'épaisseur et la couleur des différentes couches de sol. Pour augmenter la précision des informations, des prélèvements réalisés sur les 60 premiers centimètres ont été envoyés au laboratoire de la CSS pour subir une analyse et établir leur composition formelle. Des échantillons d'eau de la nappe phréatique ont alors été prélevés et analysés afin d'obtenir les données de pH[10]. La mesure de salinité est une mesure standardisée pour l'ensemble des parcelles de la CSS, comparée à la salinité basse du fleuve Sénégal (classe C1S1) qui sert à irriguer l'ensemble de l'exploitation.

### 3.3.3. Variables agronomiques

Pour simplifier l'usage du modèle AQUACROP , et considérant la présence d'une unité de recherche agronomique au sein de la CSS, l'hypothèse a été faite que la plante recevait un amendement suffisant pour satisfaire tous ses besoins sur toute la durée de son cycle de développement . L'impact des ravageurs et des adventices (toutefois limité par l'usage de produits phytosanitaires) n'est quant à lui pas considéré par le modèle AQUACROP[7].

Le fichier irrigation a été réalisé sur base du calendrier d'irrigation réel de la saison 2017-2018. La dose d'irrigation appliquée correspond à la RU (208 mm).

### 3.3.4. Développement de la canopée

Une fois l'ensemble des données climatiques et pédologiques collectées et mises en forme, il était nécessaire de proposer un fichier à intégrer dans l'onglet « Field data ». Il s'agit ici du fCover réellement observé en champs. Le fCover (Fraction of Vegetation Cover) est un indice biophysique calculé à partir de prises de vue hémisphériques. Il correspond à la fraction de sol recouverte par la végétation et permet donc de mettre en évidence l'expansion de la canopée[55]. Le calcul de ce fCover a pu être réalisé par analyse de photographies prises en conditions réelles sur champ lors de la campagne 2017-2018. Cette recherche s'inscrit dans une dynamique débutée en avril 2017 par Pauline LUC. Ainsi, le protocole d'échantillonnage photographique a pu être élaboré il y a un an, et une équipe technique de la CSS s'est vue chargée de l'appliquer sur une durée de 9 mois. Les

données photographiques ont été collectées à l'aide d'une perche ajustable qui a permis la prise de photographies au nadir (direction verticale descendante[1]) à hauteur constante au-dessus de la canopée de la canne à sucre tout au long de son développement[10]. Elles sont une ressource majeure pour le calibrage du logiciel AQUACROP , puisqu'elles permettent d'adapter la courbe de fCover théorique proposée par le programme à la courbe de fCover réellement observée.

Le logiciel CAN-EYE permet la conversion d'une photographie polychromique en une image pi lisée binaire (végétation verte/sol ). A partir de cette image, le programme est alors capable de calculer le pourcentage de couverture végétale[56]. Son principal avantage est qu'il permet de traiter plusieurs images en même temps. De cette manière, les 24 photos hebdomadaires de chaque parcelle ont pu être binarisées en une seule manipulation.



Figure 27 : Traitement d'image par le logiciel CAN-EYE avant et après correction manuelle (photo F5A\_2017-05-1)

La segmentation est une étape qui requiert une intervention humaine. En effet, les conditions d'éclairage (zones ombragées ou surexposées), la présence de parasites visuels, ou la mauvaise résolution de certaines images sont autant de facteurs qui peuvent rendre plus difficile la distinction entre le vert de la végétation et le fond. Il est ainsi possible de supprimer sélectivement certaines images au sein de chaque série, de masquer certaines parties indésirables des photographies, d'en modifier l'exposition et - par ce biais - de créer une meilleure discrimination visuelle. Il est également possible de sélectionner manuellement des pixels pour les assimiler ou non à de la végétation[56]. Pour minimiser les biais dus à l'intervention humaine dans le traitement des images, la correction des photographies a été réalisée dans un laps de temps court par une seule et même personne. La génération des fichiers de sortie est quant à elle automatique[56]. Les images sont binarisées en utilisant les résultats de la segmentation et une série de fichiers est produite, dont la valeur de fCover calculée pour chaque photographie, qui a alors pu être intégrée au modèle AQUACROP .

### 3.3.5. Rendement effectif et calcul de la biomasse aérienne

Afin de calibrer le plus précisément possible le modèle AQUACROP , il est nécessaire d'être à même de comparer sa prévision du rendement avec le rendement réellement observé au champ. A cette fin, lors de la récolte, chaque placette a été pesée individuellement à l'aide d'une pince équipée d'un dynamomètre. Les relevés effectués ont alors pu être mis en parallèle avec le fCover observé par photographies.

Une des difficultés rencontrées pour calibrer le modèle AQUACROP est qu'il propose une estimation



Figure 28 : Pesée des parcelles échantillonnées

Crédit photo : Charlotte WARRANT

de la biomasse aérienne totale de la plante[6], [7], [57], alors que la canne à sucre est brûlée avant récolte. Il était donc nécessaire de mettre en évidence un facteur de corrélation entre matière fraîche avant et après brûlage. Pour ce faire, sur chaque placette, 3 tiges entières et pourvues de leur feuillage ont été récoltées avant brûlage, puis broyées. Un échantillon de 300g de chaque tige a alors été prélevé, pressé pour extraire un maximum de jus, puis séché durant 24h dans une étuve. L'opération a ensuite été renouvelée après le brûlage, ce qui a permis une comparaison du taux de matière sèche entre les échantillons prélevés avant et après brûlage, et donc une indication de l'influence du brûlage sur la biomasse aérienne.

### 3.4. Calibration du modèle

La méthode adoptée pour parvenir à une calibration du modèle AQUACROP pour les conditions propres à la station de Richard Toll au Sénégal et pour la variété N14 de canne à sucre tient de l'empirisme guidé.

Comme rapporté plus avant, le modèle AQUACROP autorise la modification du fichier « Crop », dans lequel sont réunies diverses caractéristiques propres à la végétation étudiée[7]. Partant, il est possible d'ajuster ces paramètres afin de coller au mieux à la réalité constatée sur le terrain. AQUACROP permet deux voies de comparaison : la courbe de fCover et la production de biomasse aérienne. Il s'agira donc d'une approche par essais-erreurs afin de parvenir au modèle simulé le plus approché de la courbe de fCover réellement constatée par prises de vues verticales et du rendement effectif établi lors de la pesée. Nonobstant, cette approche de calibration ne sera pas effectuée à l'aveugle. La littérature regorge en effet de diverses informations permettant de baliser notre travail.

Dès lors, il nous sera possible d'influer sur :

#### 3.4.1. Stress hydriques

Comme évoqué aux chapitres précédents, les effets des stress hydriques impactant la croissance végétative, la conductance stomatique et l'anticipation de la sénescence sont médiés par la fonction de réponse au stress ( $K_s$ ) de ces processus (voir [équation X](#))[8]. Pour chacun de ces processus physiologiques, un seuil supérieur et un seuil inférieur de sensibilité aux stress hydriques peuvent être établis et exprimés en fonction de l'épuisement de la réserve d'eau disponible dans la zone racinaire[28], [8], [58]. Au-dessus du seuil supérieur d'épuisement, la plante ne connaît pas de stress ( $K_s = 1$ ). En-dessous du seuil inférieur d'épuisement, le stress est maximal ( $K_s = 0$ ) et va jusqu'à l'arrêt des processus physiologiques décrits[7], jusqu'à atteindre le point de flétrissement permanent (PFP). Entre ces deux seuils, la courbe qui détermine l'ampleur du stress hydrique perçu adopte une apparence convexe, et non linéaire. Cette forme peut être interprétée comme un reflet de la résilience des cultures face aux divers stress dont elles peuvent être l'objet[8]. AQUACROP permet de paramétrer non seulement les valeurs de seuils, mais également l'apparence de cette courbe de stress.

Chacun de ces processus physiologiques répondra d'une façon qui lui est propre aux stress, c'est pourquoi il conviendra de déterminer des seuils différents pour la croissance végétative, la conductance stomatique et l'anticipation de la sénescence[7], [8]. Parmi ceux-ci, le plus sensible aux éventuels stress hydriques est la croissance végétative de la culture[6].

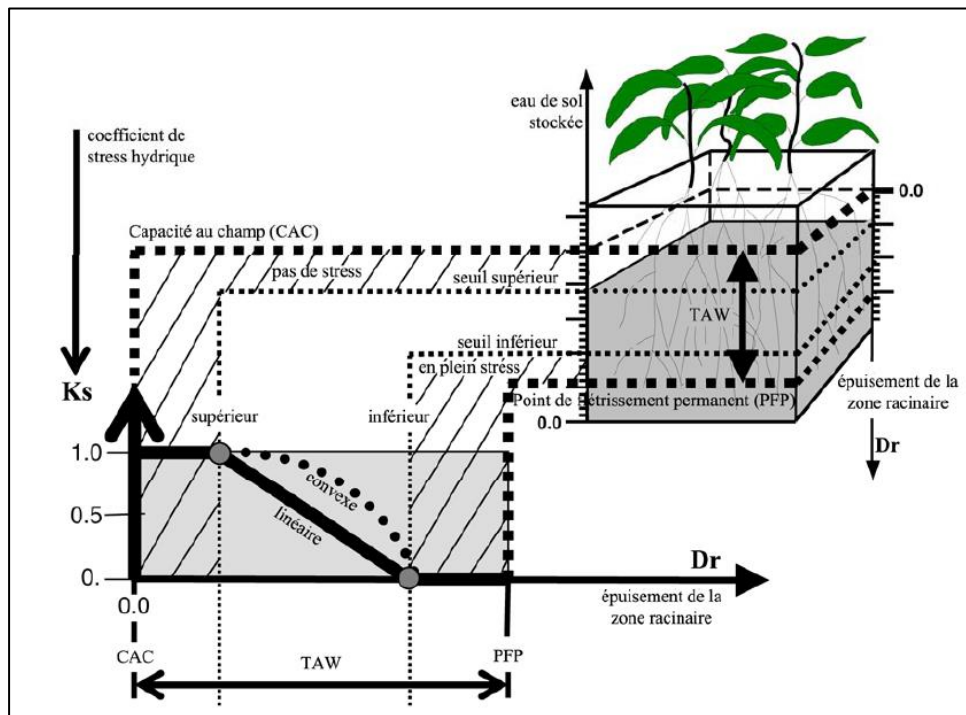


Figure 29 : Coefficient de stress ( $K_s$ ) pour différents degrés d'épuisement en eau de la zone racinaire ( $Dr$ ). TAW = Total Available Water = eau disponible totale de la zone racinaire. (7)

### 3.4.2. Stress thermiques

AQUACROP permet d'intégrer les éventuels stress thermiques en établissant une fourchette de température en-dehors de laquelle le développement de la culture n'est pas permis. Cette contrainte est appliquée par l'utilisation des degrés jours de croissance (DJC) qui traduisent la relation entre développement et température. Cette approche est basée sur un principe physiologique simple : pour toute culture, il existe une température de base en-deçà de laquelle le développement n'est pas permis et une température maximale au-delà de laquelle le développement s'arrête<sup>4</sup>[59], [60]. Il est alors possible d'établir un cumul de températures permettant le développement de la culture en additionnant les valeurs quotidiennes de températures moyennes supérieures à cette température de base, calculées suivant cette équation[61] :

$$DJC = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

Équation 8 : Calcul des degrés-jour (°C) (60)

Où  $T_{max}$  Température maximale journalière

$T_{min}$  Température minimale journalière

$T_{base}$  Température minimale requise pour le développement de la culture

Pour la culture de la canne à sucre, le seuil inférieur a été établi en 2009 par une étude de la FAO à 9°C et le seuil supérieur à 32°C[8]. Certaines études prévoient même une température de base pouvant monter jusqu'à 19°C selon le stade de développement[25], [62], [63] in [8].

<sup>4</sup> Considérant les conditions climatiques sénégalaises, le seuil supérieur est principalement le facteur limitant.

### 3.4.3. Calendrier phénologique de la culture

L'impact des stress hydriques et thermiques étant intimement lié à l'état d'avancement du développement des cultures, la chronologie des différents stades phénologiques est une variable à ne pas négliger. AQUACROP permet ainsi d'ajuster au plus proche de la réalité les dates d'initiation :

#### **Emergence à 90%**

AQUACROP considère la couverture initiale de la canopée ( $CC_0$ ) à partir d'un taux d'émergence des plantules de 90%[8]. Ce stade phénologique initial pour la simulation sera atteint en moyenne 5 à 10 jours après la mise en place de la culture pour une repousse[28].



Crédit photo : Charlotte WARRANT

Figure 30 : Pieds de cannes une semaine après la récolte

#### **Couverture maximale de la canopée**

Ce paramètre peut être intégré dans AQUACROP si le coefficient de croissance de la canopée (CGC) propre à la culture n'est pas connu[8]. La couverture maximale de la canopée est atteinte en moyenne 120 jours après la mise en place de la culture[28].

#### **Sénescence**

AQUACROP considère par défaut le début de la sénescence au moment où l'indice de surface foliaire (LAI) descend sous 4 en raison du jaunissement des feuilles. Le LAI est une grandeur sans dimension qui exprime la surface foliaire d'un couvert végétal par unité de surface de sol[8]. Par ailleurs, il est possible d'ajuster la valeur de ce palier en raison d'un couvert végétal maximal fortement divergent de la moyenne. Le début de la sénescence est une donnée importante pour le fonctionnement du modèle AQUACROP, puisqu'elle induit une diminution de la photosynthèse et, par-là, de l'accumulation de biomasse[8], [58].

#### **Maturité et maturation**

La maturation est fortement liée à l'apparition des premiers signes de sénescence[8]. Elle se déclenche en moyenne 300 jours après la mise en place de la culture, mais cette valeur peut varier plus ou moins fortement selon la variété et les conditions climatiques[19].

Stade de développement	Canne vierge		Repousses	
	Tropical	Subtropical	Tropical	Subtropical
<b>90% d'émergence</b>	De J 21 à J 40	De J 28 à J 70	De J 5 à J 10	De J 7 à J 21
<b>Couverture maximale de canopée</b>	De J 110 à J 130	De J 135 à J 175	De J 85 à J 105	De J 105 à J 145
<b>Maturation</b>	De J 275 à J 395	De J 275 à J 700	De J 275 à J 395	De J 275 à J 700
<b>Récolte</b>	De J 365 à J 425	De J 365 à J 730	De J 365 à J 425	De J 365 à J 730

Tableau 2 : Chronologie indicative des stades phénologiques de la canne à sucre important pour la calibration d'AQUACROP, pour une culture tropicale ou subtropicale et pour une canne vierge ou d'une repousse (8)

### 3.4.4. Couverture de la canopée

Pour sa calibration , AQUACROP permet d'établir des valeurs de référence pour la couverture initiale de la canopée, le coefficient de croissance du couvert végétal, la couverture maximale de la canopée et le coefficient de déclin du couvert végétal afin que la courbe de CC simulée soit la plus ressemblante possible avec la courbe de CC observée par photographies[8], [9]. Néanmoins, pour ne pas paramétrer à l'aveugle, il est essentiel de comprendre les relations qu'entretiennent ces diverses variables entre elles.

La couverture initiale de la canopée ( $CC_0$ ) est calculée en mettant en relation la couverture initiale par plantule ( $cc_0$ ) et la densité de plantation ( $d$ )[8] :

$$CC_0 = cc_0 \cdot d$$

Équation 9 : Couverture initiale de la canopée (8)

Idéalement, il s'agirait de mesurer le Canopy Cover des plantules 10 à 15 jours après la levée, pour atteindre un taux d'émergence d'environ 90% et un couvert végétal vert. A ce stade, on considère que la plante enclenche la capacité de photosynthèse et commence à être autotrophe. Le développement de la plante et, par conséquent, son Canopy Cover (CC) obéit à une fonction sigmoïde dont l'amplitude variera en regard de la densité de plantation[8].

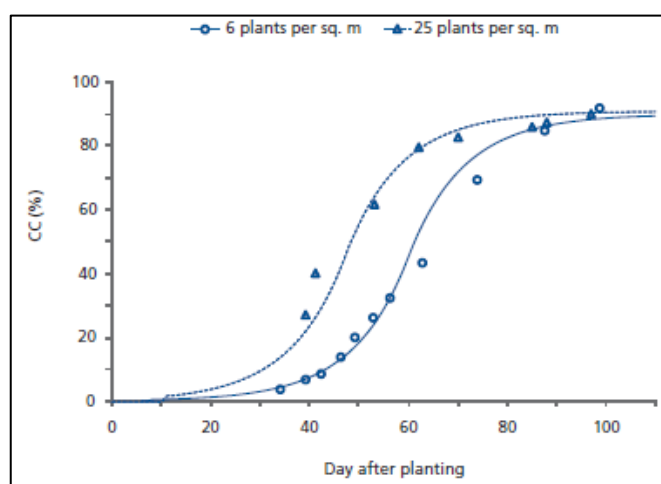


Figure 31 : Courbe de développement de la canopée (8)

Cette courbe de développement est calculée par l'intégration d'un coefficient de croissance de la canopée (CDG). La première moitié de cette fonction sigmoïde est régie par une équation exponentielle croissante :

$$CC = CC_0 \cdot e^{CGC \cdot t}$$

Équation 10 : Première moitié de la courbe de développement de CC (8)

Où  $CC$  Couverture de la canopée au temps  $t$   
 $CC_0$   $CC$  initial ( $t = 0$ )  
 $CGC$  Coefficient de croissance de la canopée au temps  $t$

Pour cette première moitié de la courbe, on considère qu'un CGC de 0,11 induit une augmentation journalière de 11% du Canopy Cover.

Lorsque la culture est suffisamment développée pour couvrir plus de la moitié du sol, l'ombrage mutuel des plants impacte la capacité de photosynthèse, ce qui justifie une croissance ralentie. Cette deuxième moitié de la fonction sigmoïde présentée à la figure 31 est dirigée par une équation exponentielle décroissante[8] :

$$CC = CC_x - (CC_x - CC_0) \cdot e^{-CGC \cdot t}$$

Équation 11 : Seconde moitié de la courbe de développement de CC (8)

Bien que la couverture maximale de la canopée (CC<sub>x</sub>) théorique soit de 100%, il est rare dans la pratique qu'elle dépasse 95%, même pour les variétés dont la densité est exceptionnellement élevée[8].

Le début de la sénescence induit un jaunissement des feuilles et une chute du Canopy Cover qui est caractérisée par le coefficient de déclin de la canopée (CDC)[7].

### 3.4.5. Productivité de l'eau

Dans sa simulation, AQUACROP utilise une valeur normalisée de productivité de l'eau (WP\*) afin de pouvoir la transposer dans divers endroits et saisons. Pour ce faire, la demande évaporatoire de l'atmosphère est normalisée en divisant quotidiennement le total d'eau réellement transpirée par la culture par l'évapotranspiration de référence[8]. En outre, la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> est elle aussi normalisée, considérant comme référence une concentration de 369,41 ppm (parts par million), soit la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> moyenne enregistrée sur l'année 2000 à Hawaï (observatoire de Maunua Loa). Des études réalisées en 2009[6], [9], [64] ont mis en évidence que les cultures ont une productivité d'eau normalisée similaire selon qu'elles aient un cycle photosynthétique de type C4 ou C3<sup>5</sup>. La canne à sucre étant une culture de type C4, sa WP devrait être située entre 30 et 35 g/m<sup>2</sup>. Toutefois, plusieurs études[8], [25], [33] sont arrivées à la conclusion d'une productivité de l'eau plus élevée, de l'ordre de 35 à 55 g/m<sup>2</sup> en termes de production de biomasse aérienne, et de l'ordre de 13 à 22g/m<sup>2</sup> en termes de production de saccharose. Elles sont également parvenues à la conclusion que la teneur en sucre d'une tige fraîche varie autour de 12,5 %, et que cette concentration pouvait atteindre environ 50 % si l'on se réfère à la

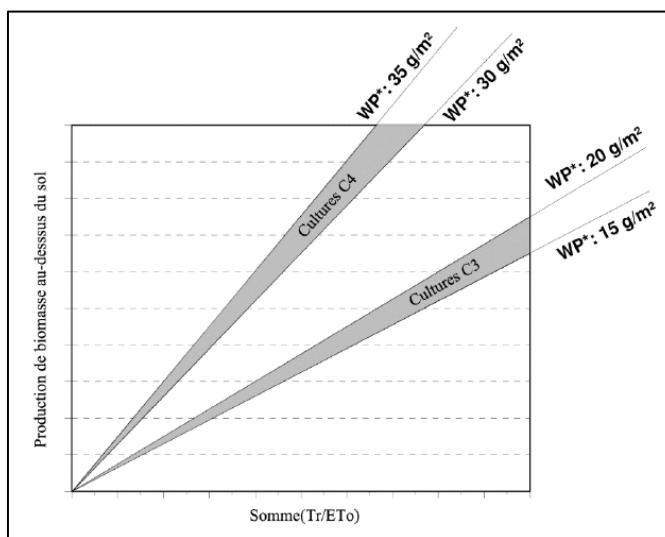


Figure 32 : Relation entre la biomasse au-dessus du sol et le total d'eau transpirée pour des cultures de type C3 et C4 après normalisation avec le CO<sub>2</sub> et ETo (7)

<sup>5</sup> Le type de photosynthèse est caractérisé par le nombre d'atomes de carbone que comporte la première molécule organique formée lors de la fixation du CO<sub>2</sub> par la plante. Partant, les cultures de type C3 convertissent le CO<sub>2</sub> en un composé organique à 3 atomes carbones, tandis que les cultures de type C4 synthétiseront un composé à 4 atomes de carbone[73].

matière sèche. L'indice de récolte, exprimé en masse de saccharose par unité de biomasse aérienne, avoisine quant à lui 35%[8], [25], [26].

La productivité de l'eau pourra être ajustée, notamment en raison d'une concentration atmosphérique en dioxyde de carbone différente de celle proposée comme référence. Elle pourra également être revue à la baisse ou à la hausse suivant le type de produits synthétisés, la synthèse de lipides ou de protéines requérant plus d'énergie que celle d'hydrates de carbone[31]. Elle est également impactée par les pratiques culturales mises en place. En effet, une culture subissant un stress de fertilité verra sa productivité de l'eau chuter, en comparaison avec une culture dont les besoins sont satisfaits[7].

### 3.4.6. Indice de récolte

La valeur de l'indice de récolte de référence proposée par AQUACROP résulte d'une moyenne des indices de récolte établis pour différentes variétés de la culture choisie. Cet indice de récolte peut être adapté légèrement, à condition de rester prudent, parce qu'il nécessite un réétalonnage des paramètres modulant sa réaction aux éventuels stress hydriques[8].

## 3.5. Validation du modèle

La phase de validation<sup>6</sup> est une étape importante qu'il ne faut pas négliger. Elle va permettre de déterminer le degré de précision des prévisions de différents modèles pour opérer un choix objectif entre ceux-ci. Il ne s'agit pas ici d'une vérification<sup>7</sup> qui, elle, cherche à s'assurer que la réalisation du modèle a été faite sans biais[65], mais bel et bien d'un outil permettant d'estimer sa pertinence.

Notre modèle sera éprouvé par validation croisée. La méthode choisie (holdout method) demande de diviser notre échantillon en deux sous-échantillons distincts. Le premier est dit d'apprentissage et servira à la calibration du modèle. Le second est dit de test et sera mis au service de sa validation[66]. La performance du modèle sera alors mesurée à l'aide de divers outils statistiques :

La **racine carrée de l'erreur quadratique moyenne** (RMSE = Root Mean Square Error). Il s'agit de la racine carrée du carré moyen des erreurs (MSE). En d'autres termes, elle mesure l'amplitude moyenne des variations entre prévisions et observations[66].

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

Équation 12 : Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (7)

<sup>6</sup> Résumée par Barry Boehm[74] par la question : Are we building the right product ?

<sup>7</sup> Résumée par Barry Boehm[74] par la question : Are we building the product right ?



Où  $n$  Nombre d'échantillons  
 $P_i$  Variable prédite par le modèle  
 $O_i$  Variable observée

L'avantage de la RMSE est qu'elle prend en considération les variations négatives comme positives, en raison de l'élévation au carré. En outre, elle est exprimée dans la même unité que les variables observées, ce qui en simplifie l'interprétation[67]. Malheureusement, les valeurs extrêmes la pénalise fortement, à l'instar des autres indicateurs statistiques élevés au carré[68] in [7].

La RMSE peut être normalisée en étant divisée par la moyenne de la variable observée. La nRMSE ainsi obtenue est alors exprimée en pourcentage et non plus dans l'unité de la variable observée. On considère qu'une simulation est excellente si la nRMSE est inférieure à 10%. [62] in [7].

$$nRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \times 100$$

Équation 13 : Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (7)

Où  $n$  Nombre d'échantillons  
 $P_i$  Variable prédite par le modèle  
 $O_i$  Variable observée  
 $\bar{O}$  Moyenne des variables observées

Le **coefficient de détermination** ( $r^2$ ) est le carré du **coefficient de corrélation** ( $r$ ). Le coefficient de détermination représente le carré de la covariance multiplié par l'écart-type des observations et des prédictions. Un désavantage du  $r^2$  est qu'il ne s'attache à quantifier que la dispersion, ce qui a pour conséquence qu'un modèle proposant une surestimation ou une sous-estimation systématique des prévisions sera surévalué[68] in [7].

Il s'agit d'un indicateur compris entre 0 et 1 qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire simple. Une régression est l'estimation de l'équation de la relation existant entre deux variables. De cette manière, plus le coefficient de détermination se rapproche de 1, et plus le nuage de points des données observées se resserre autour de la **droite de régression**, preuve d'un modèle cohérent[69].

$$r^2 = \left[ \frac{\sum(O_i - O_{moy}) \times (P_i - P_{moy})}{\sqrt{\sum(O_i - O_{moy})^2 \times \sum(P_i - P_{moy})^2}} \right]^2$$

Équation 14 : Coefficient de détermination (28)

Où  $P_i$  Variable prédite par le modèle  
 $O_i$  Variable observée  
 $P_{moy}$  Moyenne des variables prédites par le modèle  
 $O_{moy}$  Moyenne des variables observées

Le **coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe** (EF) analyse l'erreur résiduelle entre les prévisions du modèle et les observations. Il s'agit d'un indice compris entre  $-\infty$  et 1, comptant qu'une valeur de 1 indique une concordance parfaite entre les valeurs prévues et observées[7]. Notons que comme le coefficient de détermination, le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe n'est pas très sensible aux sous-estimations ou aux surestimations systématiques du modèle[68].

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

Équation 15 : Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (7)

Où  $P_i$  Variable prédite par le modèle  
 $O_i$  Variable observée  
 $\bar{O}$  Moyenne des variables observées

L'**indice de concordance de Willmott** (d) est une mesure sans dimension comprise entre 1 et 0 qui met en évidence le degré d'erreur de prédiction d'un modèle. Il s'agit du rapport entre l'erreur quadratique moyenne et l'erreur potentielle, qui est définie comme « la somme des carrés des valeurs absolues des distances entre les valeurs prédites et la moyenne observée, et des distances entre les valeurs observées et la moyenne observée »[70] in [7]. Une valeur de 1 indique une correspondance parfaite entre les variables prédites et observées. Notons que cet indice de concordance est très sensible aux valeurs extrêmes, en raison de la mise au carré des erreurs[71], mais qu'il sera plus sensible que  $r^2$  ou que EF aux surestimations et sous-estimations systématiques[7].

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - O_{moy}| + |O_i - O_{moy}|)^2}$$

Équation 16: Indice de concordance de Willmott (28)

Où  $P_i$  Variable prédite par le modèle  
 $O_i$  Variable observée  
 $O_{moy}$  Moyenne des variables observées

## 4. Résultats et discussion

### 4.1. Rendements effectifs en champs

Parcelle	Bande	Placette	Production (t)	Surface (ha)	Rendement (t/ha)	Rendement (t/ha)	Rendement (t/ha)
F5	F5B1	F5P1	1.117	0.0081	137.90	126.23	126.11
		F5P2	0.928	0.0081	114.57		
	F5B2	F5P3	1.063	0.0081	131.23	131.48	
		F5P4	1.067	0.0081	131.73		
	F5B3	F5P5	0.958	0.0081	118.27	120.62	
		F5P6	0.996	0.0081	122.96		
F5A	F5AB1	F5AP1	0.815	0.0081	100.62	109.69	114.61
		F5AP2	0.962	0.0081	118.77		
	F5AB2	F5AP3	0.893	0.0081	110.25	111.98	
		F5AP4	0.921	0.0081	113.70		
	F5AB3	F5AP5	0.982	0.0081	121.23	122.16	
		F5AP6	0.997	0.0081	123.09		

Tableau 3 : Rendements en canne brûlée par parcelle, par bande et par placette

Comme détaillé dans le chapitre traitant de la méthodologie de collecte des données, les rendements ont été mesurés pour chaque placette, à l'aide d'une grue équipée d'un dynamomètre, après brûlage.

Nous pouvons remarquer une assez forte disparité des résultats concernant l'ensemble de nos échantillons (de 100,62 t/ha pour F5AP1 à 137,9 t/ha pour F5P1), la parcelle F5 proposant un rendement supérieur à la parcelle F5A (environ 9%). En outre, ce tableau témoigne d'une hétérogénéité relativement importante au sein même des parcelles analysées. Si certaines bandes, à l'instar de F5B2, semblent très homogènes, il n'en n'est pas de même pour la bande F5B1 qui est composée des deux placettes antinomiques de la parcelle F5, ou de la bande F5AB1 qui présente également une disparité importante entre ses deux placettes.

Le modèle AQUACROP propose une simulation de la biomasse aérienne en termes de production de matière sèche avant brûlage, et non de tiges fraîches brûlées, comme exposé dans le tableau 4. Afin d'évaluer notre modèle de prévision de rendement, il est nécessaire de mettre en évidence un facteur de correction qui permette de faire le lien entre la situation mesurée en champs et les contraintes du modèle. A cette fin, trois prélèvements de tiges entières ont été réalisés sur chacune des placettes des parcelles F5 et F5A avant et après brûlage. Les 72 échantillons ainsi récupérés ont été broyés, puis mis à l'étuve pendant 24 heures afin d'être déshydratés complètement et de mettre en lumière leur concentration respective en matière sèche.

Ce procédé a permis de souligner qu'il existe bel et bien une relation entre la concentration en matière sèche avant et après brûlage, et de mettre en exergue que celle-ci diminue suite à cette opération selon un gradient de l'ordre de 10%. En effet, si la moyenne des concentrations en matière sèche avant brûlage atteignait 38,7% (écart-type de 1,6%), elle chute à 34,7% (écart-type de 2,3%) après brûlage.

Afin de pouvoir être comparés avec les prévisions du modèle AQUACROP, les rendements mesurés en champs seront donc multipliés par un facteur de correction dont la valeur est 0,387, de manière à amender l'action du brûlage. Le tableau 5 nous présente les résultats obtenus :

Parcelle	Bande	Placette	Production (t)	Surface (ha)	Rendement (t/ha)	Rendement (t/ha)	Rendement (t/ha)
F5	F5B1	F5P1	1117	0.0081	53.3673	48.85101	48.80457
		F5P2	0.928	0.0081	44.33859		
	F5B2	F5P3	1063	0.0081	50.78601	50.88276	
		F5P4	1067	0.0081	50.97951		
	F5B3	F5P5	0.958	0.0081	45.77049	46.67994	
		F5P6	0.996	0.0081	47.58552		
F5A	F5AB1	F5AP1	0.815	0.0081	38.93994	42.45003	44.35407
		F5AP2	0.962	0.0081	45.96399		
	F5AB2	F5AP3	0.893	0.0081	42.66675	43.33626	
		F5AP4	0.921	0.0081	44.0019		
	F5AB3	F5AP5	0.982	0.0081	46.91601	47.27592	
		F5AP6	0.997	0.0081	47.63583		

Tableau 4 : Rendements en matière sèche par parcelle, par bande et par placette

## 4.2. Traitement des photographies hémisphériques

### 4.2.1. Vérification des données

Considérant l'importance du traitement photographique des parcelles d'essais dans la calibration du modèle AQUACROP, les séries d'images récoltées ont été soigneusement vérifiées dans l'optique de réduire au maximum les erreurs d'échantillonnage. De cette manière, certaines incohérences au niveau de l'angle de prise de vue, de la profondeur de champ ou encore du manque de netteté des images ont pu être extraites des données collectées.



Crédit photo : Amadou NDIAYE

Figure 33 : Parcelle F5A - photo 1 : biais constaté au niveau de la profondeur de champs entre la prise photographique du 30/11, du 7/12 et du 14/12 (de gauche à droite)

Les erreurs constatées se concentrent lors de la fin de la croissance végétative, la prise de photographies étant alors particulièrement complexe, compte-tenu du port très élançé de la canne à sucre (environ 3,5 m de hauteur pour la variété N14) et de la densité de plantation qui rendent les champs de la CSS pratiquement impraticables en pleine saison.



Crédit photo : Charlotte WARRANT

Figure 34 : Parcelle F5A (et son chemin d'accès vers la P1) une semaine avant la récolte

Malheureusement, d'éventuels biais dus à l'intervention humaine nécessaire à la binarisation des photographies par le logiciel CAN-EYE ne peuvent être complètement évités, en dépit de l'effort d'impartialité fourni par l'opérateur.

Notons que pour le bon déroulement de la calibration du modèle, il est dommageable que les échantillonnages photographiques s'arrêtent au mois de décembre, nous privant ainsi de la possibilité de modéliser la sénescence et le coefficient de déclin de la canopée.

#### 4.2.2. Courbes de fCover par parcelle, placette et bande

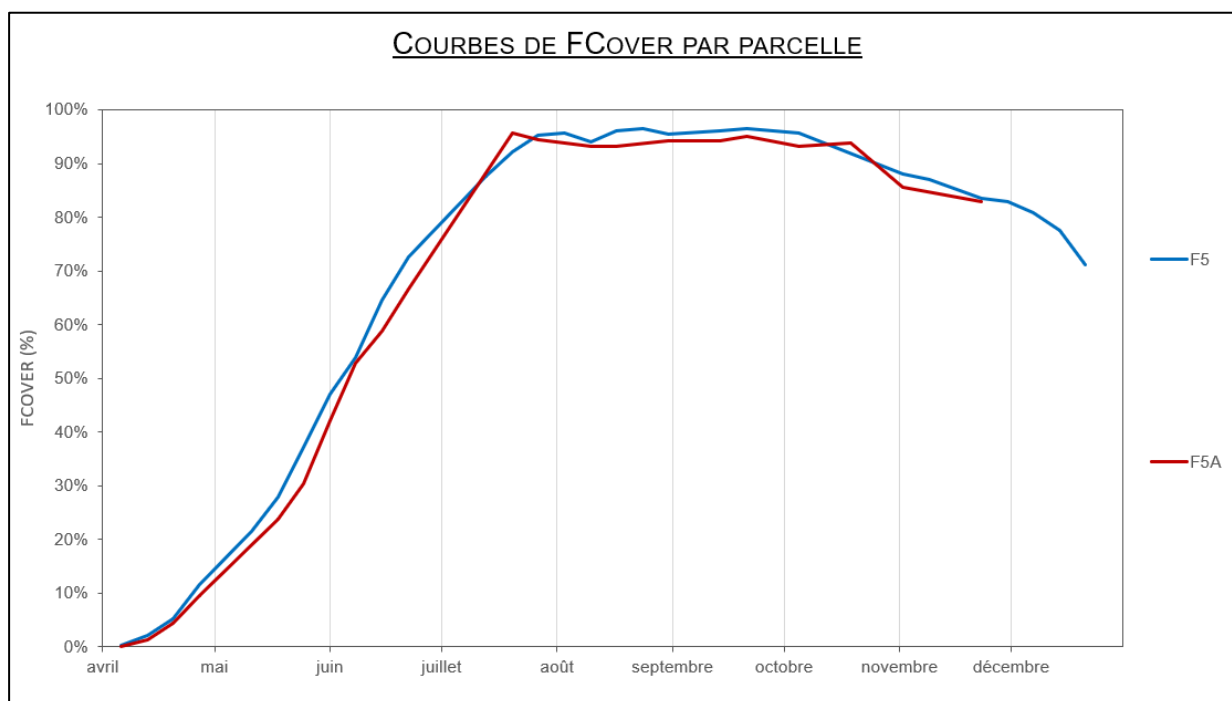


Figure 35 : Courbes de fCover par parcelle (sur base des données photographiques collectées par les équipes de la S)

La présentation des courbes de fCover obtenues par parcelle démontre une bonne cohérence générale avec l'apparence attendue de la courbe théorique. La fonction sigmoïde

déterminant le coefficient de croissance de la canopée est toutefois moins marquée, et la sénescence moins drastique. Comme le démontre la figure 34, le fCover à l'aube de la récolte est loin du zéro prétendu par le modèle théorique, bien qu'il ne nous soit pas possible de le déterminer précisément, faute de prise de vue hémisphérique. Le  $CC_{max}$  se situe entre 95% et 100%, comme attendu suite à la revue bibliographique.

L'allure générale des deux courbes de fCover par parcelle correspond aux rendements obtenus après pesée des placettes, la parcelle F5 ayant été la plus productive et présentant la courbe de fCover la plus favorable. Notons que la parcelle F5A est la plus concernée par les biais photographiques qui ont été éliminés lors de la phase de vérification, ce qui explique l'absence de données à partir de la mi-novembre et certaines courbes moins léchées.

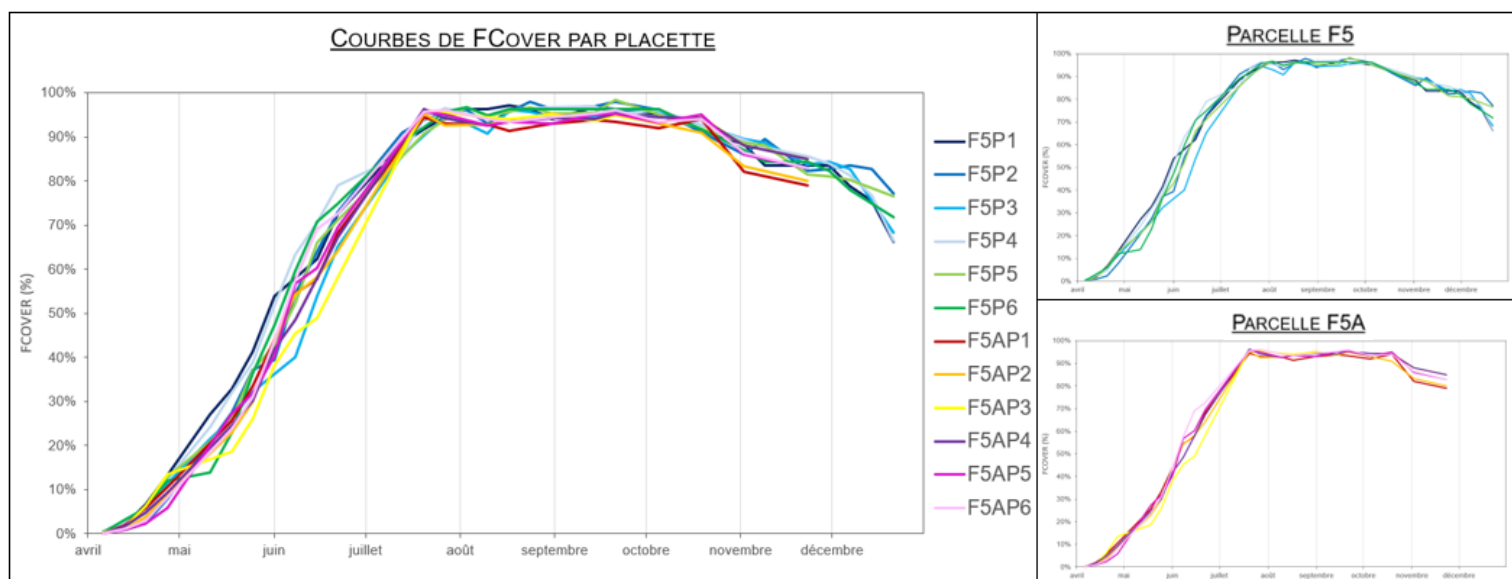


Figure 36 : Courbes de fCover par placette (sur base des données photographiques collectées par les équipes de la CSS)

Les courbes de fCover par placette présentent une certaine harmonie qui semble soutenir la validité du traitement photographique. Cette accordance est encore plus marquée si l'on considère séparément les placettes de la parcelle F5 et de la parcelle F5A. On peut alors apercevoir des points d'inflexion communs qui laissent penser à des stress perçus en champs.

Après première analyse visuelle, les courbes de fCover semblent en congruence avec les rendements obtenus en champ. Ainsi, les placettes F5P1 et F5P4, qui ont été les plus productives, proposent une courbe de fCover qui semble particulièrement favorable ; et les placettes F5AP1, F5AP2 et F5AP3, qui présentent les courbes de fCover les moins avantageuses, montrent le rendement le plus faible.

La courbe F5P6 semble néanmoins légèrement surévaluée en comparaison à son rendement moyen (122,96 t/ha) et la courbe F5AP4 fortement surévaluée, alors que son rendement est faible (110,25 t/ha). La courbe F5P3 semble quant à elle sous-évaluée en comparaison à son rendement performant (131,23 t/ha).

Si l'on analyse la situation par bande, les résultats semblent encore moins dispersés et la cohérence avec la valeur des rendements constatés est renforcée. A nouveau, l'étude ciblée par parcelle révèle une forte similitude entre les courbes de fCover des 3 bandes concernées, et présente des points d'inflexion analogues.

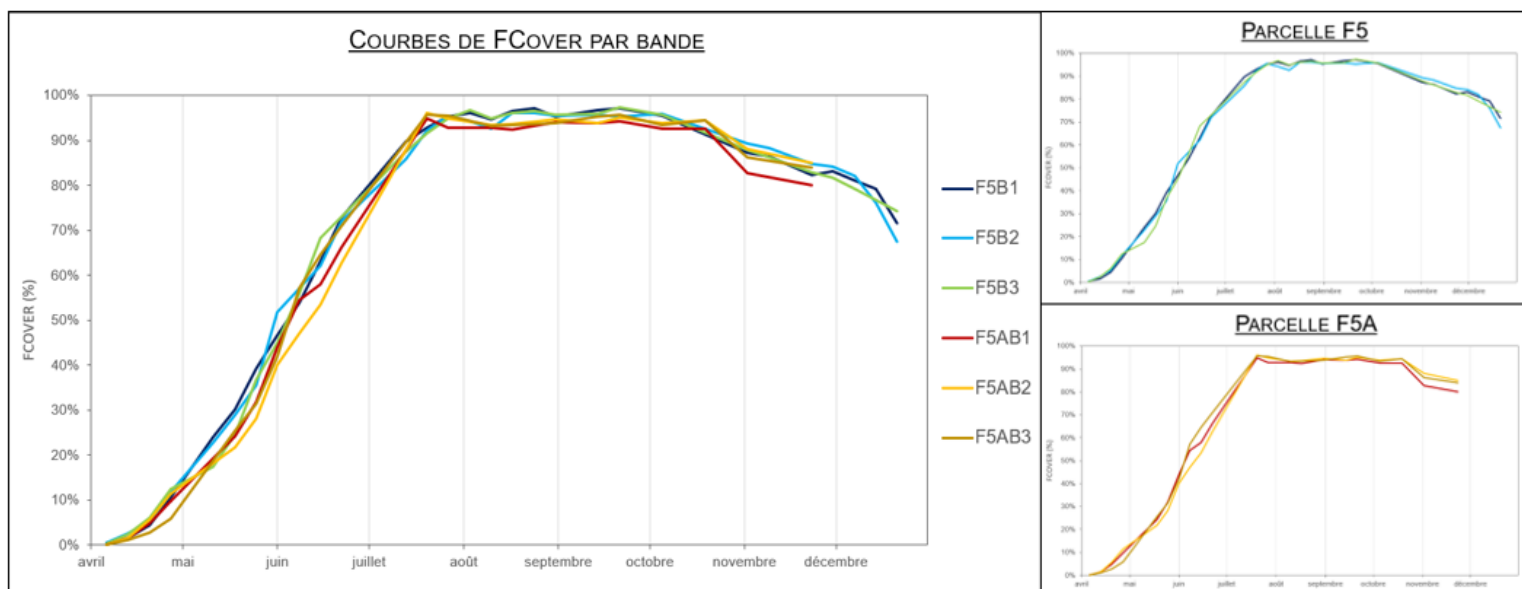


Figure 37 : Courbes de fCover par bande (sur base des données photographiques collectées par les équipes de la CSS)

### 4.3. Résultats de la calibration

L'unité agronomique de référence de la CSS étant la bande, la calibration et la validation du modèle se dérouleront à cette échelle géographique. La valorisation des données par bande permet également une harmonisation statistique des résultats et une atténuation d'éventuels biais dus à un pied de canne moins performant (la moyenne du fCover porte sur 8 photographies et non plus 4).

Le choix des bandes qui serviront à la calibration ou à la validation est réalisé sur base de leur analyse pédologique respective, afin de répartir l'utilisation d'un même type de sol sur ces deux procédés.

Bande	Type de sol
F5B1	Terreau limono-argileux
F5B2	Terreau argilo-sableux
F5B3	Terreau argileux
F5AB1	Argilo-sableux
F5AB2	Argilo-sableux
F5AB3	Terreau argileux

Tableau 5 : Analyse pédologique par bandes

Malheureusement, l'analyse de sol complète réalisée pour mener à bien ce travail peut difficilement être valorisée dans AQUACROP, l'approche entre le laboratoire de la CSS et le logiciel étant divergente. Si ce dernier divise le sol en plusieurs horizons caractérisés grossièrement, les techniciens de l'entreprise procèdent à une analyse scrupuleuse du sol en termes de pourcentages de sable, argile et limon après homogénéisation des horizons. Les profils de sol alors intégrés dans AQUACROP ne seront ainsi artificiellement constitués que d'une seule couche homogène dont la composition sera généralisée, tel que présenté par le tableau 5. Cette imprécision aura indéniablement un impact sur la précision de la calibration et des prévisions de rendement.

Sur base du tableau 5, il a été décidé que la calibration du modèle porterait sur les bandes F5B1, F5B2, FAB2 et F5AB3 et que sa validation serait quant à elle basée sur les bandes F5B3 et F5AB1.

### 4.3.3. Modèle par défaut

Pour rappel, la calibration du modèle AQUACROP consiste en la modification des paramètres physiologiques et phénologiques de la canne à sucre (variété N14) dans le cadre spécifique de sa conduite au Sénégal.

Le logiciel propose un « Crop file » par défaut dont la pertinence est remise en question pour son application au sein de la CSS. Si l'on compare les courbes de fCover simulées et observées, il est aisé de se rendre compte que ce modèle est perfectible :

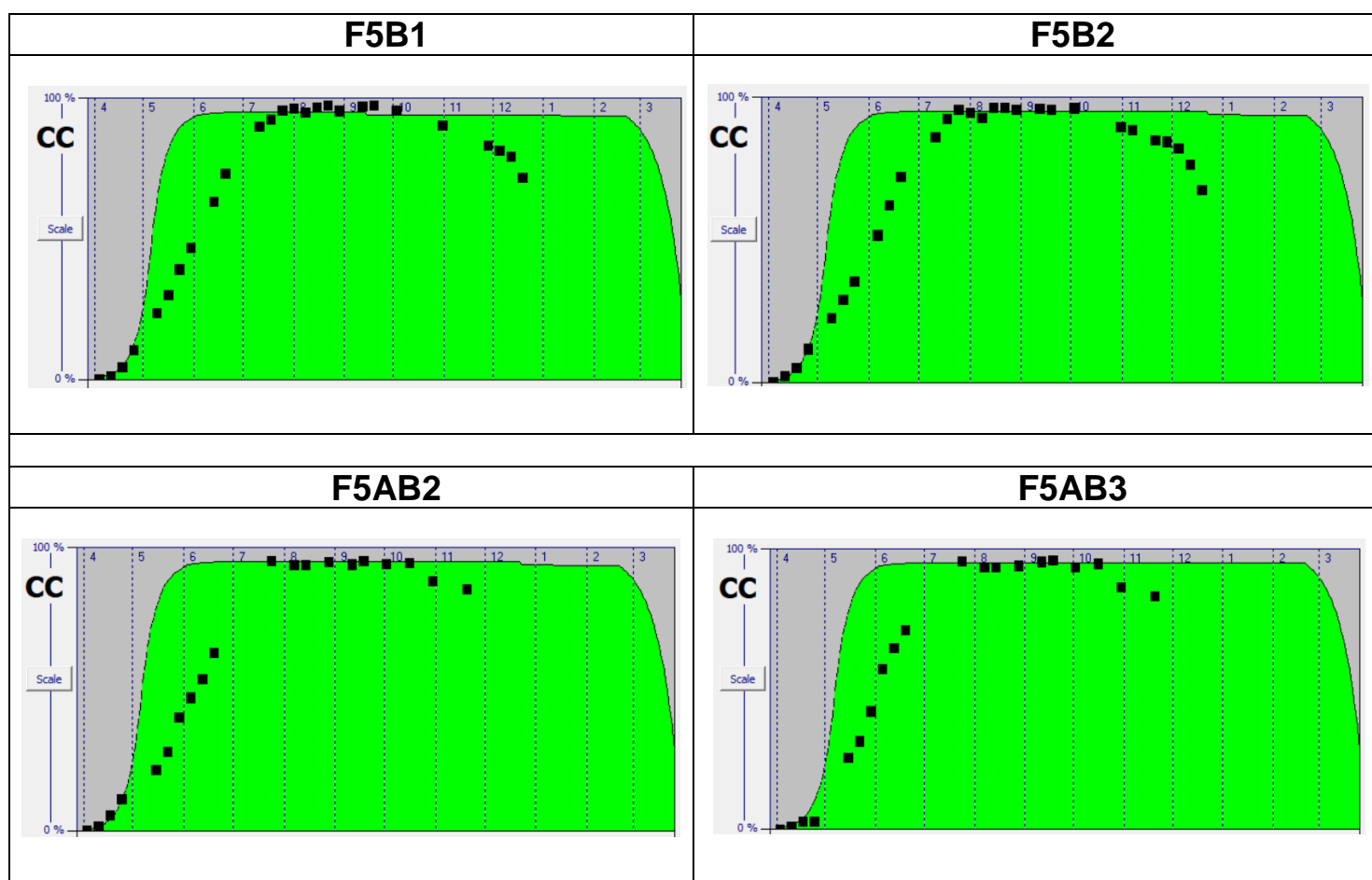


Tableau 6 : Courbes de fCover simulées et observées - Modèle par défaut - Etape de calibration

### 4.3.4. Variables intégrées au modèle calibré

La calibration du modèle s'est faite par empirisme, tout en étant balisée par la revue bibliographique. De nombreux modèles ont dès lors été testés et rejetés dans le but de faire émerger le modèle présenté dans le tableau 7.



<b>Situation initiale</b>		
Surface de sol couverte par un plant à 90% d'émergence	cm <sup>2</sup>	15
Densité de plantation	plants/ha	200.000
<b>Cycle végétatif</b>		
CC0	%	3
CCmax	%	97
Coefficient de croissance de la canopée (CGC)		0.06744
Coefficient de déclin de la canopée (CDC)		0.031
Kc max		1.3
Durée entre la mise en place de la culture et la levée	jours	11
Durée entre la mise en place de la culture et l'enracinement maximal	jours	74
Durée entre la mise en place de la culture et le CCmax	jours	100
Durée entre la mise en place de la culture et le début de la sénescence	jours	205
Durée entre la mise en place de la culture et la maturité	jours	330
<b>Enracinement</b>		
Profondeur minimale d'enracinement	m	0.3
Profondeur maximale d'enracinement	m	1.2
Facteur de courbe de l'expansion racinaire		1.3
Extraction maximale d'eau dans le quart supérieur de la zone racinaire	m <sup>3</sup> d'eau /m <sup>3</sup> de sol	0.048
Extraction maximale d'eau dans le quart inférieur de la zone racinaire	m <sup>3</sup> d'eau/ m <sup>3</sup> de sol	0.012
<b>Stress thermiques</b>		
Température de base	°C	15
Seuil supérieur de température	°C	32
Degrés de croissance minimum pour une transpiration complète de la culture	°C/jour	11.1
<b>Stress hydriques</b>		
Seuil supérieur de développement de la canopée		0.1
Seuil inférieur de développement de la canopée		0.45
Seuil de fermeture des stomates		0.25
Seuil de sénescence précoce		0.35
Facteur de courbe des stress hydriques		3
Saturation à laquelle se produit une aération déficiente	vol%	5
<b>Stress de salinité</b>		
Conductivité électrique à laquelle la culture est affectée par la salinité du sol	dS/m	2
Conductivité électrique à laquelle la croissance de la culture s'arrête	dS/m	15
<b>Formation du rendement</b>		
Productivité de l'eau normalisée (WP*)	g/m <sup>3</sup>	40
Indice de récolte (HI)	%	55
Productivité de l'eau normalisée lors de la formation du rendement	% de WP*	100
Augmentation maximale autorisée du HI	%	15
Coefficient décrivant l'impact positif sur l'IH d'une croissance végétative limitée pendant la formation du rendement		10
Coefficient décrivant l'impact négatif sur l'IH de la fermeture des stomates pendant la formation du rendement		8

Tableau 7 : Variables du modèle calibré pour la culture de canne à sucre (variété N14) au Sénégal

### 4.3.5. Evaluation statistique du modèle calibré

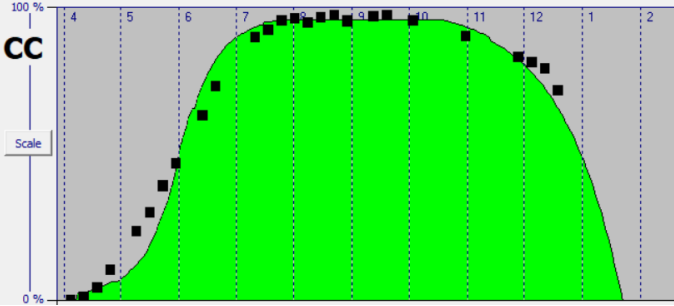
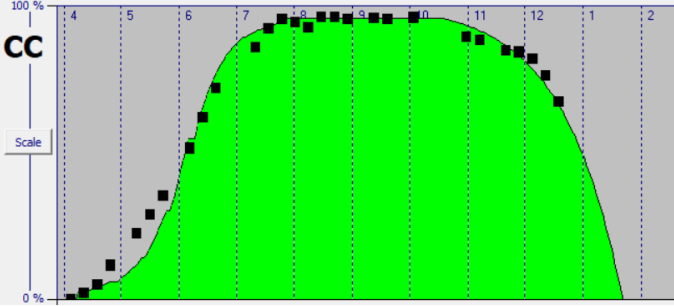
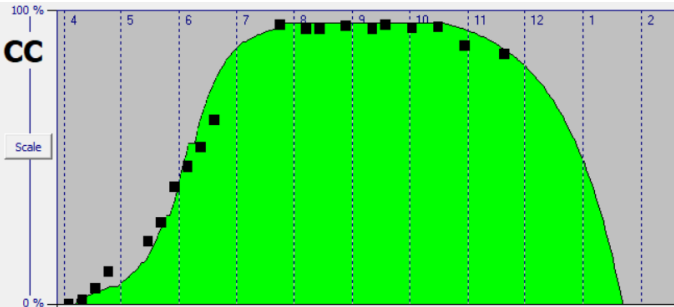
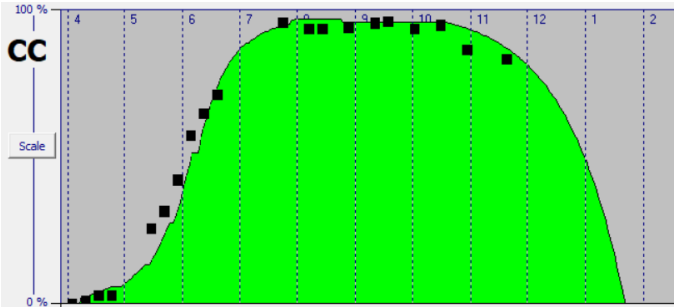
<b>F5B1</b>		<b>F5B2</b>	
			
r	0.9921	r	0.9946
r <sup>2</sup>	0.9843	r <sup>2</sup>	0.9894
RMSE	4.7734	RMSE	4.0430
nRMSE	7.1996	nRMSE	5.9878
EF	0.9804	EF	0.9848
d	0.9953	d	0.9964
<b>F5AB2</b>		<b>F5AB3</b>	
			
r	0.9933	r	0.9938
r <sup>2</sup>	0.9862	r <sup>2</sup>	0.9876
RMSE	4.9878	RMSE	4.3817
nRMSE	8.0624	nRMSE	7.2240
EF	0.9810	EF	0.9856
d	0.9954	d	0.9965

Tableau 8 : Résultats par bande des indicateurs statistiques obtenus lors de l'étape de calibration

Comme l'illustre le tableau 8 présentant les résultats par bande de la calibration du modèle, les courbes de fCover observées sont graphiquement très proches des courbes de fCover prévues par AQUACROP. En outre, les indicateurs statistiques utilisés pour évaluer la pertinence du modèle sont excellents, quelle que soit la bande envisagée.

Notons que les simulations proposées par AQUACROP sont très similaires pour les quatre bandes et que la fonction sigmoïde du développement de la canopée analysé par photographies tend à être moins nette que celle prévue théoriquement par le logiciel. En dépit de nos multiples tentatives, il ne nous a pas été possible de les faire coïncider de manière plus optimale, les lacunes de la calibration étant situées entre 50 et 75% de fCover. Cet état de fait peut être expliqué par

l'impossibilité de simuler une culture en C<sub>2</sub> dont le système racinaire serait déjà en place dans AQUACROP. Il est également primordial de relever que la sénescence modélisée n'a pas pu être confrontée à la réalité de terrain, faute de données photographiques. Malheureusement, AQUACROP ne permet pas de réduire encore le coefficient de déclin de la canopée, ce qui nous amène à un fCover nul après 290 jours, alors que le cycle de culture de la canne à sucre avoisine 365 jours (en fonction des prérogatives techniques de l'usine) et que la canopée est toujours verte et active à la récolte. Ces facteurs auront un impact sur la prévision du rendement analysé dans un chapitre ultérieur.

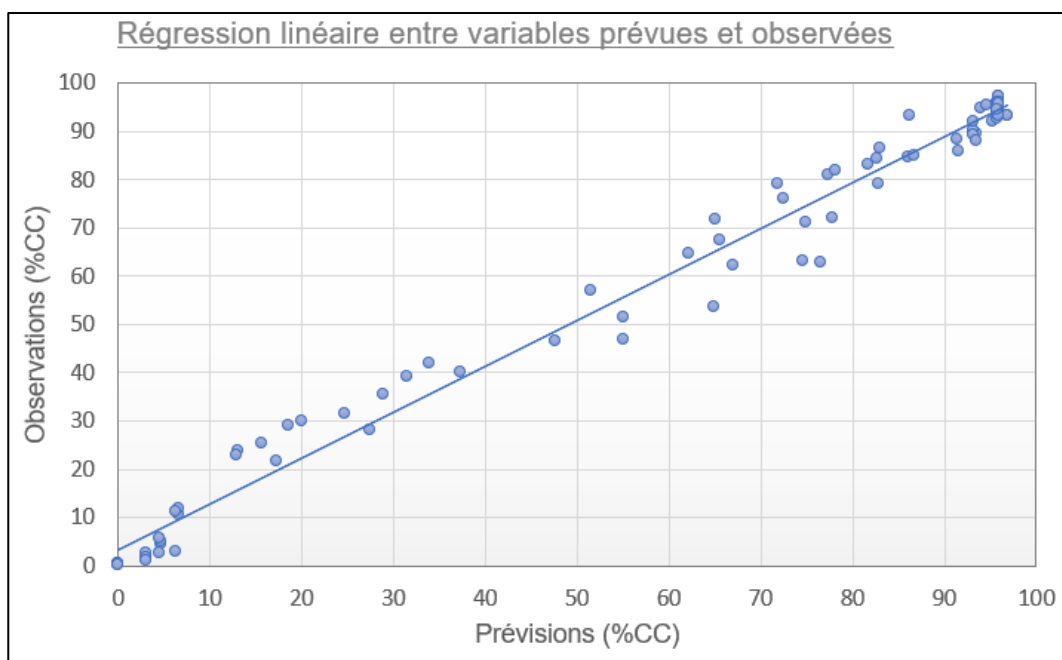


Figure 38 : Régression linéaire entre les variables prévues et observées lors de l'étape de calibration

Moyenne de la calibration	
r	0.9934
r <sup>2</sup>	0.9869
RMSE	4.5465
nRMSE	7.1184
EF	0.9830
d	0.9959

Tableau 9 : Indicateurs statistiques moyens de la calibration

Si l'on compare l'ensemble des variables prédites avec leur pendant observé, on s'aperçoit que le nuage de points obtenu présente une courbe de tendance dont le coefficient angulaire est proche de 1 et dont la dispersion est acceptable. Une nouvelle fois, nous pouvons remarquer que le modèle est le moins performant entre 50 et 75 % de fCover .

Les indicateurs statistiques généralisés présentés dans le tableau 9 nous indiquent que le modèle choisi est très performant quant à la prévision du développement de la canopée . Notons que cet état de fait est favorisé par la forte similitude entre les courbes de fCover obtenues par bande après analyse photographique (voir chapitre 4.2.2)

#### 4.4. Résultats de la validation

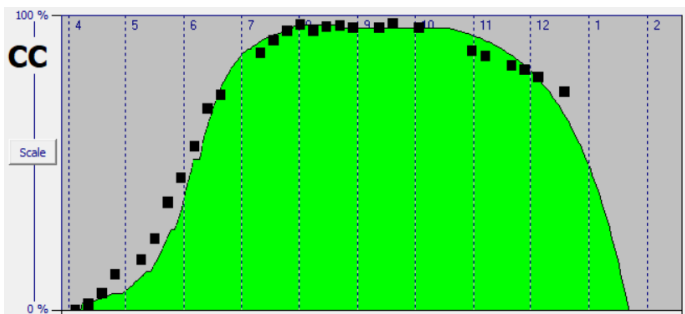
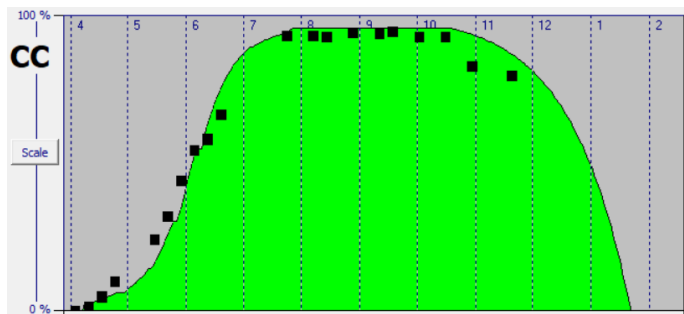
F5B3		F5AB1	
			
r	0.9957	r	0.9942
r <sup>2</sup>	0.9913	r <sup>2</sup>	0.9853
RMSE	4.1313	RMSE	5.0315
nRMSE	6.2994	nRMSE	8.1330
EF	0.9852	EF	0.9795
d	0.9964	d	0.9952

Tableau 10 : Résultats par bande des indicateurs statistiques obtenus lors de l'étape de validation

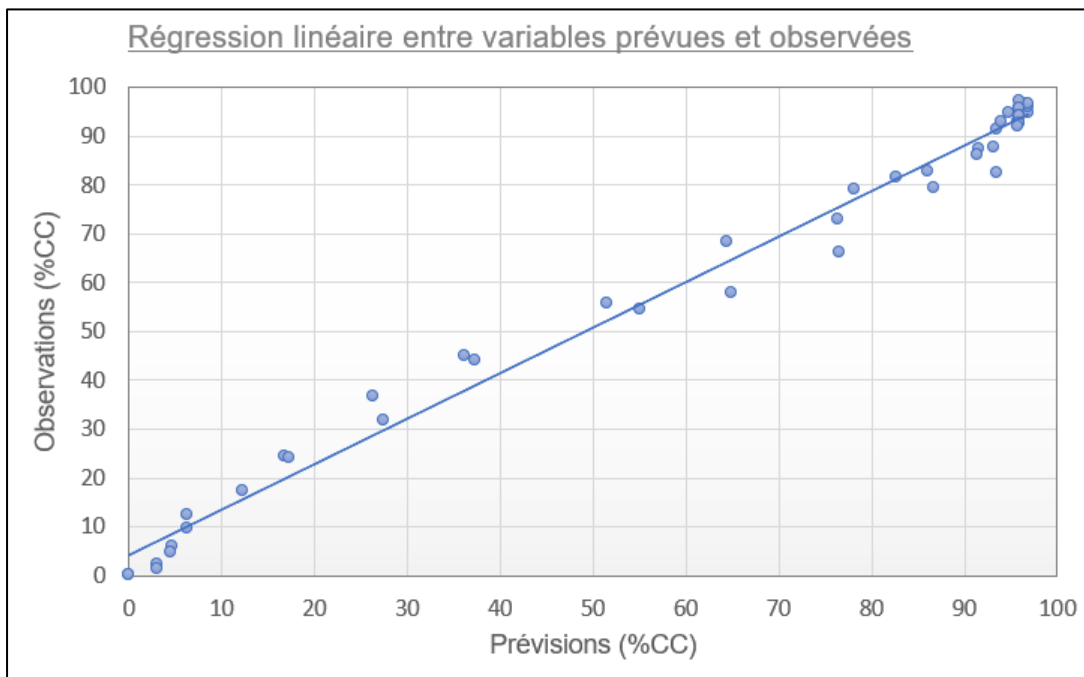


Figure 39 : Régression linéaire entre les variables prévues et observées lors de l'étape de validation

Moyenne de la validation	
r	0.9950
r <sup>2</sup>	0.9899
RMSE	4.5814
nRMSE	7.2012
EF	0.9823
d	0.9959

Tableau 11 : Indicateurs statistiques moyens de la validation

Les résultats statistiques obtenus lors de l'étape de validation sont aussi pertinents que ceux dépendant de l'étape de calibration. Comme l'illustrent les tableaux 10 et 11, les courbes de fCover observées sont graphiquement très proches des courbes de fCover prévues par AQUACROP et les indicateurs statistiques sont excellents, tant individuellement que si l'on considère la moyenne des deux bandes de validation.

La régression linéaire obtenue à partir des valeurs de fCover prévues et observées est légèrement meilleure que pour l'étape de calibration. Le coefficient angulaire est sensiblement identique, mais la dispersion du nuage de points est moindre.

#### 4.5. Prévisions de rendement

Suite à la calibration de la couverture de la canopée, la productivité de l'eau, le seuil de fermeture stomatique et l'indice de rendement ont été étalonnés sur base de la revue bibliographique et par comparaison entre les rendements (en matière sèche) prévus et observés. S'il est possible de s'approcher au plus près de la valeur moyenne des rendements réellement obtenus, le modèle ne semble pas à même de proposer une simulation de rendement probante. La faible valeur des indicateurs statistiques sélectionnés en est le témoin objectif.

	Simulations	Observations	Prévisions de rendement	
<b>F5B1</b>	45.78 t/ha	48.85 t/ha	r	- 0.2194
<b>F5B2</b>	46.37 t/ha	50.88 t/ha	r <sup>2</sup>	0.0481
<b>F5B3</b>	46.65 t/ha	46.67 t/ha	RMSE	30.210
<b>F5AB1</b>	46.37 t/ha	42.45 t/ha	nRMSE	65.156
<b>F5AB2</b>	46.37 t/ha	43.33 t/ha	EF	- 0.0581
<b>F5AB3</b>	46.65 t/ha	47.27 t/ha	d	0.1029

Tableau 12 : Rendements observés et simulés par le modèle calibré et indicateurs statistiques des simulations

La défaillance du modèle est due à l'absence de variabilité entre les différentes simulations et la dispersion des observations. Aucun des modèles testés n'a pu se défaire de cette aberrante constance, ce qui laisse à penser qu'elle pourrait être le facteur d'une faiblesse des bases de données intégrées au logiciel AQUACROP. En effet, le fait que toutes les placettes envisagées dépendent de la même station météorologique et ont été irriguées à la même date, l'homogénéisation des horizons de sol et des données piézométriques, l'omission de la fertilisation jugée par défaut suffisante, ou encore l'irrégularité de l'irrigation selon que la placette soit située côté canal (sous-estimée) ou côté drain (surestimée), sont autant de facteurs de variabilité qui n'ont pas été considérés.

Par ailleurs, il n'est pas à exclure qu'une erreur humaine lors de la pesée ait pu biaiser les rendements observés en champs et intégrés dans AQUACROP – qui sont, eux, très fortement variables malgré la proximité des placettes. Le protocole prévoyait que les cannes coupées au sein des placettes soient collectées dans des andains séparés afin d'être pesées à l'aide d'une grue équipée d'un dynamomètre. Si la pesée a été supervisée par nos soins, la formation des andains était malheureusement antérieure et n'a pas pu être vérifiée. Compte-tenu de la densité d'un champ de canne à sucre à maturité et de la difficulté à repérer les placettes parmi les parcelles (en dépit des 4 petits poteaux en bois érigés à l'endroit des prises de vues photographiques), il n'est pas inconcevable que certaines tiges se soient retrouvées par erreur sur le mauvais andain.

## 5. Conclusion et perspectives

Acteur publiquement reconnu du paysage agricole et industriel du Sénégal, la CSS travaille à amoindrir son impact sur l'environnement et les ressources naturelles dont elle fait usage. Dès lors, la gestion intégrée des ressources en eau est une problématique qui s'impose au sein de son département agronomique. Afin de parvenir à une utilisation plus efficiente des denrées hydriques, il est essentiel de comprendre la relation aiguë qui lie la production de biomasse à la transpiration de la végétation et, par conséquent, au bilan hydrique du sol. Le logiciel de prévision de rendement AQUACROP est un outil parmi d'autres pour parvenir à simuler la réponse d'une culture aux apports en eau. Sa singularité tient à sa facilité d'utilisation qui le rend accessible au plus grand nombre. Des simulations successives de rendement en variant l'apport hydrique de la culture peuvent conduire à établir un calendrier d'irrigation optimal qui permettrait un développement maximal de la biomasse aérienne, tout en évitant le gaspillage d'eau dû à une irrigation excédentaire[8].

L'objectif de ce travail était de calibrer le logiciel AQUACROP pour la canne à sucre (variété N14) dans les conditions particulières du nord du Sénégal. Cette calibration devait s'opérer sur base de la comparaison entre les courbes de fCover observées en champ (par photographies hémisphériques) et celles simulées par l'outil, dans le but de parvenir à une prévision de rendement suffisamment fine pour couvrir les besoins opérationnels de l'usine de production sucrière et établir un calendrier optimal d'irrigation.

La calibration du modèle de prévision de rendement AQUACROP a été réalisée de façon empirique, par une succession d'essais-erreurs qui ont permis d'approcher au plus près la courbe de fCover simulée à celle établie par traitement photographique, via la modification de certains facteurs d'ordre physiologique et phénologique relatifs à la culture considérée. La première démarche mise en œuvre pour l'élaboration de ce travail a donc été la constitution d'un état de l'art suffisamment exhaustif pour permettre de baliser cette calibration. La seconde étape a consisté en l'opération de binarisation des prises de vue de la canopée à l'aide du logiciel CAN-EYE, de manière à parvenir à une ségrégation pixellaire « sol /plante », ce qui a permis de mettre en évidence le pourcentage de canopée verte durant une partie du cycle de développement de la canne à sucre[56]. La calibration du modèle a alors pu être réalisée à partir de ces informations sur 4 bandes, constituées de 8 placettes, caractérisées par 36 images hebdomadaires. La validation a pris cours sur 2 autres bandes. Ces deux étapes ont été évaluées graphiquement par régression linéaire et comparaison des courbes de fCover, ainsi qu'à l'aide d'un panel d'indicateurs statistiques tels que le coefficient de corrélation, le coefficient de détermination, la RMSE, la nRMSE, le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe, ou encore l'indice de concordance de Willmott. Une fois que la calibration réalisée sur base des courbes de fcover a été validée, il a été question de comparer les rendements prévus et observés afin de confronter la pertinence de la simulation de rendement du modèle.

Pour rappel, cet opus fait suite à un travail mené 2017 quant à la sélection des placettes -tests et à l'établissement d'un protocole d'échantillonnage photographique[10]. Cet état de fait implique que nombre des données intégrées dans le logiciel AQUACROP ont été collectées antérieurement à cette recherche, selon un mode opératoire qui s'est parfois avéré lacunaire au fil de la calibration.

Si la calibration du modèle AQUACROP avec les données disponibles pour l'élaboration de ce travail nous a permis de décrire avec précision l'évolution de la canopée verte (jusqu'à une certaine limite, la sénescence n'ayant pu être simulée), elle n'a pas supporté la prévision de rendement. De fait, si nos indicateurs statistiques de pertinence du modèle sont très performants quand il s'agit de

comparer les courbes de fCover simulées et observées ( $r = 0.99$ ,  $r^2 = 0.99$ ,  $RMSE = 4.58$ ,  $nRMSE = 7.2$ ,  $EF = 0.98$  et  $d = 0.99$ ), les indicateurs statistiques de pertinence de prévision du rendement nous laissent penser que le modèle n'est pas convaincant pour simuler la quantité de biomasse aérienne produite ( $r = -0.22$ ,  $r^2 = 0.05$ ,  $RMSE = 3.02$ ,  $nRMSE = 6.51$ ,  $EF = -0.06$  et  $d = 0.1$ ). Nous avons pu nous rendre compte que, quelles que soient les variables phénologiques ou physiologiques modifiées dans le « Crop file », il n'était pas possible de proposer une simulation de rendement cohérente. S'il nous a été loisible d'étalonner la production de biomasse pour nous approcher de la réalité observée, les valeurs proposées par le modèle sont demeurées constantes, sans égard pour la bande considérée.

Plusieurs facteurs liés aux données intégrées dans le logiciel peuvent expliquer le manque de précision du modèle quant à la prévision de rendement :

- L'ensemble des placettes échantillonnées dépendent de la même station météorologique et ont été irriguées simultanément selon une dose équivalente, nos variables climatiques et nos entrées d'eau dans le bilan sont donc identiques et ne peuvent participer à la variabilité des rendements observés.
- Le recours au coefficient d'évaporation en bac ne propose qu'une approximation de l'évapotranspiration. L'intégration de l'équation de Penman-Montheit au modèle permettrait certainement plus de précision au niveau du bilan hydrique.
- Les prélèvements de sol réalisés pour la mise en œuvre des horizons pédologiques n'ont pas permis de caractériser le sol des placettes avec précision, selon les critères requis par AQUACROP. En effet, l'approche entre le laboratoire de la CSS et le logiciel est divergente. Si ce dernier divise le sol en plusieurs horizons caractérisés grossièrement, les techniciens de l'entreprise procèdent à une analyse scrupuleuse du sol en termes de pourcentages de sable, argile et limon après homogénéisation des horizons. Les profils de sol alors intégrés dans AQUACROP n'étaient ainsi artificiellement constitués que d'une seule couche homogène dont la composition a été généralisée.
- Les données piézométriques propres à chaque placette n'ont pu être valorisées, la hauteur de nappe appliquée sur l'ensemble de l'échantillon étant de 1,5m (moyenne historique de la CSS). Or, il est vraisemblable que cette valeur soit plus ou moins hétérogène au sein d'une même parcelle.
- La fertilisation a été jugée suffisante par défaut et a donc été écartée du procédé de calibration. Il n'est pas impossible que l'ensemble des besoins des cultures envisagés n'aient pas été couverts ou que les engrais n'aient pas été assimilés de la même manière selon les placettes.
- L'irrégularité de l'irrigation due à la percolation profonde, selon que la placette soit située côté canal (sous-estimée) ou côté drain (surestimée), n'a pas été considérée. Or, l'irrigation gravitaire souffre d'un manque de précision qui pourrait avoir un impact sur l'hétérogénéité des rendements au sein d'une même bande. Ceci est d'autant plus vrai que le matériel d'irrigation de la CSS présente un diamètre réduit, et donc un débit réduit.

- La taille de l'échantillon photographique est réduite. Une placette n'étant caractérisée qu'à partir de 4 photographies, l'impact d'un pied anormalement peu productif (compactage, maladie, etc.) est lourd et peut conduire à une forte baisse de fCover qui ne sera pas indubitablement perceptible en termes de rendement.

Bien que les courbes de fCover simulées par le modèle correspondent aux courbes observées, elles semblent présenter certaines incohérences en regard de la littérature :

- La fonction sigmoïde du CGC est moins marquée dans la réalité que ce que prévoit le modèle AQUACROP dans ses modélisations.
- La sénescence observée semble débuter aux alentours de 200 jours après la levée, or la littérature semble s'accorder sur un réel déclin de la canopée vers 275 à 300 jours après la levée.
- La sénescence prévue par le modèle conduit à un fCover nul, ce qui est loin d'être représentatif de la situation de terrain. Ceci, couplé à un début de sénescence précoce, conduit à une fin de culture après approximativement 290 jours, alors que les placettes ont été récoltées après 372 jours.

En outre, le modèle AQUACROP présente certaines limites :

- Le logiciel ne permet pas de paramétrer une productivité de l'eau supérieure à 40 g/m<sup>2</sup>, or plusieurs études ont démontré que dans le cadre de la culture de canne à sucre, cette variable pouvait atteindre 55 g/m<sup>2</sup>. Rappelons que la productivité de l'eau caractérise la réponse de la culture à la transpiration en termes de production de biomasse.
- Le coefficient de déclin de la canopée prévu par le modèle semble surestimé en regard des observations de terrain. Malheureusement, AQUACROP ne permet pas l'intégration d'un CDC inférieur à 3%.
- Il n'est pas possible de prévoir précisément l'impact du brûlage sur les rendements observés, ou d'avoir la certitude que ce dernier soit parfaitement homogène. Il paraît opportun d'affirmer que plus un pied de canne à sucre est fourni en feuillage et plus l'impact du brûlage sera conséquent. AQUACROP ne permettant pas une ségrégation de la biomasse aérienne, il ne semble pas acceptable de comparer les rendements qu'il simule avec les rendements constatés en champs.

Finalement, plusieurs erreurs humaines pourraient s'être glissées à différentes étapes de la recherche :

- Au moment des prises de photographies hémisphériques.
- Lors du traitement des images à l'aide du logiciel CAN-EYE.
- Lors de la collecte des données pédoclimatiques.
- Lors de la récolte des placettes.



Ce travail est une première approche concernant la calibration d'AQUACROP à des fins de prévisions de rendement de canne à sucre au Sénégal. Afin de limiter les autres sources d'erreurs discutées ci-avant, il serait intéressant pour les futures recherches à ce propos de prendre quelques mesures destinées à augmenter la précision des prévisions.

Dans un premier temps, notons que la CSS met de nombreux moyens en œuvre pour tendre vers une récolte de canne fraîche mécanisée afin de se passer du brûlage, technique dont l'impact environnemental est très contesté. Le brûlage étant un facteur impossible à simuler dans le modèle, il s'agirait à l'avenir de ne poursuivre les recherches que sur des parcelles non-brûlées. Il pourrait également s'avérer pertinent de travailler sur des parcelles gérées par irrigation gouttes-à-gouttes, dont la fertilisation et l'apport d'eau sont plus homogènes que dans des systèmes gravitaires.

Afin d'augmenter la pertinence des simulations de courbes de fCover, il serait intéressant de porter l'essai sur d'autres parcelles qui présenteraient des conditions climatiques et une gestion quotidienne divergentes. Il semble également indispensable d'augmenter la taille de l'échantillonnage photographique - tant en nombre qu'en durée - afin de réaliser des moyennes de fCover probantes sur l'ensemble du cycle de développement. Il pourrait également être intéressant d'augmenter la profondeur de champs des prises de vue hémisphériques. Ces améliorations pourraient être réalisées à moindre coût, la CSS ayant à sa disposition un autogire équipé d'une caméra et du personnel qualifié pour l'utiliser. Il serait également important d'effectuer des analyses pédologiques par discrimination en horizons de sol, de manière à correspondre aux exigences du modèle et d'obtenir une variabilité des substrats qui pourrait s'avérer déterminante dans la prévision des rendements. Ces analyses devraient idéalement s'accompagner d'une description de la salinité du sol et de la profondeur d'enracinement. Soulignons toutefois que porter cette étude pédologique à l'échelle de l'ensemble des parcelles de la CSS aura un coût significatif. Le recours à l'équation de Penman-Montheith pour la détermination de l'évapotranspiration de référence ne nécessiterait que peu de moyens, puisqu'il ne s'agirait que d'équiper les stations météorologiques d'un anémomètre permettant le calcul quotidien de la vitesse de vent à 2 m de hauteur. Finalement, une discrimination visuelle plus performante des zones d'échantillonnage permettrait de limiter les biais lors du calcul du rendement suite à la récolte.

En dépit des résultats mitigés qu'a rencontrés cette étude, cette première expérience dans un pays en développement s'est révélée particulièrement intéressante, tant d'un point de vue humain qu'académique. D'une part, elle m'aura permis m'immerger dans une culture riche et inconnue, et de rencontrer des personnes remarquables. Et d'autre part, elle m'aura amenée à faire preuve de rigueur et de patience, et m'aura poussée à augmenter ma connaissance de certains outils tels que la suite Office, ou encore les logiciels Mendelej, AQUACROP, ou CAN-EYE. La réalisation de ce mémoire, et le stage qui l'a précédé, resteront deux événements marquant dans mon parcours de vie.

## Bibliographie

- [1] Larousse, “Encyclopédie en ligne,” 2016. [Online]. Available: <http://www.larousse.fr/encyclopedie/>. [Accessed: 14-Aug-2016].
- [2] Dictionnaire Larousse, “Dictionnaire de Français,” 2019. [Online]. Available: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais-monolingue/>. [Accessed: 08-Aug-2019].
- [3] CCM Benchmark, “Dictionnaire de Français,” 2019. [Online]. Available: <https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/>. [Accessed: 08-Aug-2019].
- [4] E. Michel-Guillou, “L’environnement, l’eau et les agriculteurs : entre conscience environnementale et défense du métier,” *Bull. Psychol.*, vol. 502, pp. 381–388, 2009.
- [5] N. Katerji, L. Bruckler, and P. Debaeke, “L’eau, l’agriculture et l’environnement. Analyse introductive à une réflexion sur la contribution de la recherche agronomique,” *Courr. l’environnement l’INRA*, vol. 46, pp. 39–50, 2002.
- [6] P. Steduto, T. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres, “AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles,” *Agron. J.*, vol. 101, no. 3, 2009.
- [7] D. Raes, P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Fereres, *AQUACROP Version 4.0 - manuel d’utilisation*. Rome, 2012.
- [8] P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres, and D. Raes, *Crop yield response to water*, no. 66. Rome, 2012.
- [9] D. Raes, P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Fereres, “AquaCropThe FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description,” *Agron. J.*, vol. 101, no. 3, p. 438, 2009.
- [10] P. Luc, “Calibration du modèle AQUACROP pour la production de canne à sucre au Sénégal,” Université de Liège, 2017.
- [11] L. Mounzeo, B. Mvoulatsieri, B. Foahom, and D. Sonwa, “Facteurs climatiques et productivité des variétés de canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) dans les plantations industrielles de la vallée du Niari (Congo-Brazzaville),” *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 13, no. 1, 2019.
- [12] Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives, “La biomasse aérienne de la végétation de la zone tropicale n’a plus d’impact positif sur le stockage du carbone,” 2019. [Online]. Available: <http://www.cea.fr/presse/Pages/actualites-communiques/environnement/biomasse-vegetation-carbone.aspx>. [Accessed: 18-Mar-2019].
- [13] Department of Agriculture Forestry and Fishery, “Sugarcane - Production guideline,” 2014.
- [14] M. K. V. Carr and J. W. Knox, “The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*saccharum officinarum*) : a review,” *Cambridge Univ. Press*, vol. 47, pp. 1–25, 2011.
- [15] A. Cheavegatti-Gianotto *et al.*, “Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A Reference Study for

the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil.," *Trop. Plant Biol.*, vol. 4, no. 1, pp. 62–89, Mar. 2011.

- [16] N. Basset, *Guide du planteur de cannes : traité théorique et pratique de la culture de la canne à sucre*, CHALAMEL. Paris, 1889.
- [17] J. Chopart, L. Le Mézo, J. Brossier, C. Hoareau, and L. L. Mézo, "Profondeur du système racinaire de la canne à sucre à la Réunion (var.570, repousse).," Saint-Pierre, 2008.
- [18] J. Morel, "Estimation de la biomasse de canne par modélisation et télédétection.," Université de la Réunion, 2014.
- [19] Netafim's Agriculture Department, "Sugarcane - Crop growth phases," 2017. [Online]. Available: [http://www.sugarcane-crop.com/crop\\_growth\\_phases/](http://www.sugarcane-crop.com/crop_growth_phases/). [Accessed: 27-Jun-2019].
- [20] Compagnie Sucrière Sénégalaise, "Plantation de canne à sucre," 2018. [Online]. Available: <https://www.css.sn/index.php/fr/2018-11-07-21-17-20/plantation-de-canne-a-sucre.html>. [Accessed: 25-May-2019].
- [21] NETAFIM's Agriculture Department, "Sugarcane - Agronomic practices," 2017. [Online]. Available: [http://www.sugarcane-crop.com/agronomic\\_practices/](http://www.sugarcane-crop.com/agronomic_practices/). [Accessed: 27-Jun-2019].
- [22] AgroParisTech, "Charrues," 2012. [Online]. Available: <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/SIAFEEAGRONOMIE9cea/document/machinisme/outils/oa-tsol-charrued.htm>. [Accessed: 27-Jun-2019].
- [23] M. J. Robertson, A. W. Wood, and R. C. Muchow, "Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning," *F. Crop. Res.*, vol. 48, no. 1, pp. 11–25, Sep. 1996.
- [24] Chambre d'agriculture de la Martinique, "Fiche technique - canne à sucre," Lamentin, 2007.
- [25] M. K. V. Carr and J. W. Knox, "The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*Saccharum officinarum*): a review," *Exp. Agric.*, vol. 47, no. 1, pp. 1–25, Jan. 2011.
- [26] N. G. Inman-bamber, R. C. Muchow, and M. J. Robertson, "Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa," *F. Crop. Res.*, vol. 76, pp. 71–84, 2002.
- [27] N. G. Inman-Bamber and D. M. Smith, "Water relations in sugarcane and response to water deficits," *F. Crop. Res.*, vol. 92, no. 2–3, pp. 185–202, Jun. 2005.
- [28] O. Bahmani and S. Eghbalian, "Simulating the Response of Sugarcane Production to Water Deficit Irrigation Using the AquaCrop Model," *Agric. Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 158–166, Jun. 2018.
- [29] B. Delaitte, G. Van de Plas, and F. Van der Linden, "Irrigation goutte a goutte."
- [30] SASRI (South African Sugarcane Research Institute), "Information Sheet - variety N14," 2006. [Online]. Available: <http://www.sugar.org.za/sasri/variety/index.htm>. [Accessed: 27-Apr-2018].
- [31] S. N. Lisson, N. G. Inman-bamber, M. J. Robertson, and B. A. Keating, "The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production

systems,” *F. Crop. Res.*, vol. 92, pp. 321–335, 2005.

- [32] A. J. Waclawovsky, P. M. Sato, C. G. Lembke, P. H. Moore, and G. M. Souza, “Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content,” *Plant Biotechnol. J.*, vol. 8, no. 3, pp. 263–276, Apr. 2010.
- [33] F. C. Olivier and A. Singels, “Increasing water use efficiency of irrigated sugarcane production in South Africa through better agronomic practices.”
- [34] Ecole de politique appliquée Université de Sherbrooke, “Production alimentaire: canne à sucre (tonnes) | 2014,” 2019. [Online]. Available: <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BilanEssai?codetheme=5&codeStat=RSA.FA.O.SugarCane&anneeStat1=2014&optionGraphique1=avecNoir&logsUni=sansLogUni&codetheme2=2&codeStat2=x&couleurGraphique=Bleu&taillePolices=11px&langue=fr&noStat=12>. [Accessed: 08-Jul-2019].
- [35] OCDE and FAO, “Perspectives agricoles de l’OCDE et de la FAO 2018-2027,” 2018.
- [36] OCDE and FAO, “Perspectives agricoles de l’OCDE et de la FAO 2016-2025,” 2016.
- [37] Compagnie Sucrière Sénégalaise, “Activités,” 2018. [Online]. Available: <https://www.css.sn/index.php/fr/2018-11-07-21-17-20/production-d-ethanol.html>. [Accessed: 25-May-2019].
- [38] Compagnie Sucrière Sénégalaise, “La CSS en chiffre,” 2018. [Online]. Available: <https://www.css.sn/index.php/fr/>. [Accessed: 25-May-2019].
- [39] J.-R. Thiercelin and A. Vidal, *Traité d’irrigation*, Lavoisier. .
- [40] Centre de Suivi Ecologique, “Historique,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cse.sn/index.php/presentation-cse/historique>. [Accessed: 25-May-2019].
- [41] Ministère de l’Environnement et du Développement Durable, “Centre de Suivi Ecologique - rapport annuel 2017,” 2018.
- [42] Centre de Suivi Ecologique, “Mot du directeur général,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cse.sn/>. [Accessed: 25-May-2019].
- [43] Agence wallonne de l’air et du climat, “Financement climat international,” 2014. [Online]. Available: <http://www.awac.be/index.php/presentation#>. [Accessed: 25-May-2019].
- [44] Google, “Google Maps,” 2019. [Online]. Available: [https://www.google.be/maps/search/place+Victor+Horta+40+1060+Bruxelles/@50.805935,4.432983,594552m/data=!3m1!4b1?source=s\\_q&hl=fr](https://www.google.be/maps/search/place+Victor+Horta+40+1060+Bruxelles/@50.805935,4.432983,594552m/data=!3m1!4b1?source=s_q&hl=fr).
- [45] M. Zhou, “Performance of varieties N14 and NCO376 in the south-east lowveld of Zimbabwe,” 2004.
- [46] J. Doorenbos and A. H. Kassam, “Yield response to water,” *Irrig. Drainage, Pap.* 33, 1979.
- [47] D. Kambou, D. Xanthoulis, K. Ouattara, and A. Degré, “Concepts d’efficience et de productivité

de l'eau (synthèse bibliographique)," *Biotechnol. Agron. Soc. Env.*, vol. 18, no. 1, pp. 108–120, 2014.

- [48] Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) and Groupe de recherche et d'échanges technologiques (GRET), "Mémento de l'agronome," 2010.
- [49] J. Wellens, "Un cadre pour l'utilisation des outils d'aide à la décision à diverses échelles spatiales pour la gestion de l'agriculture irriguée en Afrique de l'Ouest," Université de Liège, 2014.
- [50] by Ryan Louis Rossler, A. Singels Co-supervisors, and J. F. Steyn Olivier, "Water stress effects on the growth, development and yield of sugarcane," University of Pretoria, 2013.
- [51] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, "Crop Evapotranspiration," in *FAO Irrigation and Drainage Paper Crop N 56*, no. 56, .
- [52] F. Bultot and G. L. Dupriez, "L'évaporation d'un bac d'eau libre — Sa signification restreinte," *J. Hydrol.*, vol. 20, no. 1, pp. 83–95, Sep. 1973.
- [53] P. Dehon, "Modélisation De La Température De Surface Des Bacs Évaporométriques," *J. Hydrol.*, vol. 49, no. 3, pp. 369–384, 1981.
- [54] H. G. Gundekar, U. M. Khodke, S. Sarkar, and R. K. Rai, "Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region," *Irrig. Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 169–175, Jan. 2008.
- [55] Universität Hamburg, "Integrated Climate Data Center - ICDC," 2017. [Online]. Available: <https://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/land/vegetation-cover-fraction.html>. [Accessed: 15-May-2019].
- [56] M. Weiss and F. Baret, "CAN\_EYE V6.4.91 User Manual," 2017.
- [57] J. Wellens, F. Traoré, M. Diallo, and B. Tychon, "A framework for the use of decision-support tools at various spatial scales for the management of irrigated agriculture in West-Africa," *Agric. Sci.*, vol. 4, no. 8, pp. 9–15, 2013.
- [58] C. A. Cortés Bello, J. G. Bernal Patiño, E. D. Diaz Almanza, and J. F. Méndez Monroy, "Uso del modelo Aquacrop para estimar rendimientos para el cultivo de caña de azúcar en el departamento del valle del cauca," 2013.
- [59] R. Bonhomme, "Bases and limits to using 'degree.day' units," *Eur. J. Agron.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–10, Jul. 2000.
- [60] G. S. McMaster and W. W. Wilhelm, "Growing degree-days: one equation, two interpretations," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 87, no. 4, pp. 291–300, Dec. 1997.
- [61] M.-P. Lepage and G. Bourgeois, *Modèles bioclimatiques pour la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures*, CRAAQ. 2012.
- [62] N. G. Inman-Bamber, "Temperature and seasonal effects on canopy development and light

interception of sugarcane,” *F. Crop. Res.*, vol. 36, no. 1, pp. 41–51, Jan. 1994.

- [63] S. E. Lingle, “Sugar Metabolism during Growth and Development in Sugarcane Internodes,” *Crop Sci.*, vol. 39, no. 2, p. 480, 1999.
- [64] T. C. Hsiao, L. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes, and E. Fereres, “AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize,” *Agron. J.*, vol. 101, no. 3, p. 448, 2009.
- [65] D. Foures, “Validation de modèles de simulation,” Université de Toulouse, 2015.
- [66] K. A. Ross *et al.*, “Cross-Validation,” in *Encyclopedia of Database Systems*, Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 532–538.
- [67] B. Dumont, “Incertitudes liées à la modélisation agro-environnementale en vue de développer des outils d’aide à la décision,” Université de Liège - Gembloux Agro-bio tech, 2014.
- [68] P. Krause, D. P. Boyle, and F. Bäse, “Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment,” *Adv. Geosci.*, 2005.
- [69] Netmath, “Coefficient de détermination,” 2019. [Online]. Available: <https://lexique.netmath.ca/coefficient-de-determination/>. [Accessed: 08-Jul-2019].
- [70] C. J. Willmott, “Some comments on the evaluation performance,” *Bull. Am.*, 1982.
- [71] H. R. Pereira *et al.*, “On the performance of three indices of agreement: an easy-to-use r-code for calculating the Willmott indices,” *Bragantia*, vol. 77, no. 2, pp. 394–403, Mar. 2018.
- [72] P. Calanca, P. Smith, A. Holzkämper, and C. Ammann, “L’évapotranspiration de référence et son application en agrométéorologie,” *Rech. Agron. Suisse*, vol. 2, no. 4, pp. 176–183, 2011.
- [73] P. Mazliak and D. Laval-Martin, *Physiologie végétale. 1 : nutrition et métabolisme*. Hermann, 1995.
- [74] B. W. Boehm, “Improving Software Productivity,” 1987.

# Index

## A

AQUACROP i, vii, ix, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 36, 37, 40, 41, 43, 46, 47, 48, 49, 53, 55

## B

Bande ii, vii, ix, 16, 17, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 48, 52  
Biomasse ii, iii, vii, x, xi, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 18, 19, 20, 22, 23, 27, 28, 30, 32, 36, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56

## C

Calibration ii, vii, ix, 2, 28, 30, 31, 33, 37, 38, 40, 41, 43, 44, 46, 48, 52, 53  
CAN-EYE vii, 2, 4, 27, 38, 48  
Canne à sure i, vi, vii, ix, xii, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 20, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 32, 37, 41, 42, 44, 47, 48, 51, 52, 53, 54  
Canopée ii, iii, vii, xi, 3, 20, 21, 22, 26, 30, 31, 32, 39, 42, 43, 44, 46, 48, 51, 52, 56  
Centre de Suivi Ecologique i, xi, 2, 3, 14, 15, 54  
Climat i, xi, 1, 2, 4, 5, 9, 12, 14, 15, 16, 24, 26, 29, 30, 50, 53, 54  
Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe x, xi, 35, 43, 44, 45, 46, 48, 52  
Coefficient de corrélation xii, 23, 24, 34, 35, 43, 44, 45, 46, 49, 52, 56  
Coefficient de croissance de la canopée xi, 20, 30, 31, 32, 39, 42  
Coefficient de déclin de la canopée xi, 20, 32, 38, 42, 44  
Coefficient de détermination x, xii, 34, 35, 48, 56  
Compagnie Sucrière Sénégalaise i, vi, vii, xi, 2, 4, 8, 13, 14, 16, 18, 24, 25, 26, 37, 40, 41, 49, 52, 53, 54  
Couverture initiale de la canopée x, xi, 20, 30, 31, 42, 52  
Couverture maximale de la canopée xi, 20, 30, 31, 32, 39, 42, 52

## D

Développement ii, vi, vii, x, xi, xii, 1, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 23, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 42, 43, 44, 48, 49, 50, 51, 54, 55

## E

Echantillonnage 26, 28, 33, 34, 36  
Emergence 20, 30, 31, 42, 49, 50  
Enracinement 23, 26, 42  
Evapotranspiration x, xi, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 32, 48, 55, 56

## F

FCover ii, vii, ix, xi, 26, 27, 28, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 46, 48  
Floraison 6, 18

## I

Indice de concordance de Willmott i, ii, vi, vii, ix, x, xi, xii, 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56  
Indice de récolte ii, iv, x, xii, 18, 22, 23, 32, 33, 42  
Irrigation vi, ix, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 17, 19, 24, 25, 26, 46, 48, 51, 52, 53, 54, 55

**N**

nRMSE xii, 34, 43, 44, 45, 46, 48

**O**

Observation vii, viii, ix, xii, 2, 20, 24, 26, 27, 31, 33, 34, 35, 41, 43, 44, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52

**P**

Paramètres culturaux 41  
 Parcelle ii, vi, vii, ix, 2, 4, 8, 9, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 24, 26, 27, 36, 37, 38, 39, 47, 50, 51, 52  
 Pédologie i, ix, 5, 6, 10, 19, 24, 26, 40, 49, 52  
 Phénologie ii, iv, vi, ix, 2, 19, 30, 48, 50, 51, 56  
 Piézométrie iv, 24, 26  
 Placette ii, vii, ix, 16, 17, 26, 27, 28, 36, 37, 38, 39, 46, 47, 48, 49, 52  
 Prévision i, ii, vii, viii, 1, 2, 18, 27, 33, 34, 35, 36, 37, 40, 43, 44, 46, 48, 56  
 Productivité de l'eau xii, 18, 22, 32, 42

**R**

Racine v, vi, x, 6, 7, 9, 23, 33, 34  
 Régression v, vii, viii, 34, 46, 48, 49, 50  
 Rendement i, ii, vii, ix, x, xii, 1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 18, 20, 22, 23, 24, 27, 28, 36, 37, 39, 40, 42, 44, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 55, 56  
 Richard Toll vi, 4, 13, 18, 23, 28, 52  
 RMSE xii, 33, 34, 43, 44, 45, 46, 48, 50, 52

**S**

Saccharose i, v, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 23, 32, 51, 52, 53  
 Sénégal ix, 2, 3, 11, 13, 16, 26, 28, 41, 42, 48, 53  
 Sénescence v, 8, 20, 21, 22, 23, 28, 30, 32, 38, 39, 42, 44, 48, 49  
 Seuil 20, 21, 28, 29, 42, 46  
 Simulation vii, ix, 2, 3, 19, 22, 24, 28, 30, 32, 34, 36, 41, 43, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 56  
 Solvii, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 16, 17, 18, 19, 22, 24, 26, 27, 30, 32, 40, 42, 46, 48, 49, 51  
 Stomates iii, 21, 28, 46  
 Stress hydrique ii, vii, 6, 8, 14, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 28, 30, 33, 42, 51, 52  
 Stress thermique ii, x, 22, 29, 30, 42

**T**

Tige vi, ix, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 28, 32, 36, 47, 51  
 Traitement photographique ii, vii, 2, 4, 16, 26, 27, 31, 37, 38, 39, 40, 43, 44, 47, 48, 51, 52

**V**

Validation ii, viii, ix, 33, 40, 41, 45, 46, 48, 52, 56  
 Variété N14 ix, 2, 17, 28, 37, 41, 42, 48, 54, 55



## Anglais

The AQUACROP plant growth simulation model is a tool developed by the FAO for field operators in the agricultural world. It is mainly based on the calculation of the water balance of the soil to highlight any water stress impacting the crop. Thus, the quantity of water available in the root zone is simulated by linking incoming water flows (rainfall, irrigation and capillary rise) and outflow (evapotranspiration, runoff and deep percolation). It also considers the impact of heat stress and related soil salinity or agronomic operations. In order to allow the most advanced simulations possible, it is necessary to approach closer to the reality observed in the field. To this end, it is essential to calibrate the model by integrating the physiological and phenological parameters specific to the crop under consideration. This calibration is made possible by the comparison between the fCover curves observed in the field (by hemispherical photographs) and those simulated by the tool. The modification of the "Crop file" can be done accordingly.

*Keywords: AQUACROP, calibration, sugar cane, CAN-EYE, Senegal, fCover*

## Français

Le modèle de simulation de croissance végétale AQUACROP est un outil développé par la FAO à destination des opérateurs de terrain dans le monde agricole. Il est principalement basé sur le calcul du bilan en eau du sol permettant de mettre en évidence tout stress hydrique impactant la culture. Ainsi, la quantité d'eau disponible au niveau de la zone racinaire est simulée en mettant en relation les flux d'eau entrant (précipitations, irrigation et remontée capillaire) et sortant (évapotranspiration, ruissellement et percolation profonde). Il considère également l'impact des stress thermiques et ceux liés à la salinité du sol ou aux opérations agronomiques. Afin de permettre des simulations les plus pointues possibles, il est nécessaire de s'approcher au plus près de la réalité constatée sur le terrain. A cette fin, il est indispensable de calibrer le modèle en y intégrant les paramètres physiologiques et phénologiques propres à la culture envisagée. Cette calibration est rendue possible par la comparaison entre les courbes de fCover observées en champ (par photographies hémisphériques) et celles simulées par l'outil. La modification du « Crop file » pourra se faire en conséquence.

*Mots-clés : AQUACROP, calibration, canne à sucre, CAN-EYE, Sénégal, fCover*

---