INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

Présentée et soutenue publiquement par

Jean-François MARTINÉ

Le 7 Mars 2003

Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle.

=========

Directeur de thèse : Raymond Bonhomme

JURY

Monsieur Bertrand Ney, Président Monsieur Jean-François Ledent, Rapporteur Monsieur Gabriel Claude Soopramanien, Rapporteur Monsieur Ghislain Gosse, Examinateur Monsieur Etienne Hainzelin, Examinateur

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

Présentée et soutenue publiquement par

Jean-François MARTINÉ

Le 7 Mars 2003

Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle.

> alaan ahtai maal kana aana tama maal kana kana kana kana Kana ahaa kana kana tama tama kana kana kana

Directeur de thèse : Raymond Bonhomme

JURY

Monsieur Bertrand Ney, Président Monsieur Jean-François Ledent, Rapporteur Monsieur Gabriel Claude Soopramanien, Rapporteur Monsieur Ghislain Gosse, Examinateur Monsieur Etienne Hainzelin, Examinateur

Remerciements

De nombreuses personnes ont été impliquées de près ou de loin dans ce travail et je voudrais toutes les remercier chaleureusement.

Je souhaite tout d'abord remercier Raymond Bonhomme, directeur de recherches à l'INRA, qui a accepté de diriger ma thèse. Malgré l'éloignement, il a toujours su me conseiller et me soutenir. Son appui scientifique m'a été très précieux.

J'exprime ma vive gratitude aux membres du jury qui ont bien voulu lire et corriger ce mémoire puis assister à la soutenance :

- Monsieur B. Ney qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de cette thèse,
- Messieurs J.F. Ledent et C. Soopramanien, rapporteurs,
- Messieurs G. Gosse et E. Hainzelain, examinateurs

Je remercie M. Hoarau et A. Derevier qui, dès 1992, ont cru en la modélisation, m'ont fait confiance et donné carte blanche pour accomplir ce travail de longue haleine ; Messieurs J. Marquette, E. Hainzelin et R. Domaingue, chefs du programme canne à sucre pour m'avoir encouragé et soutenu.

Je tiens à remercier également mon collègue et ami Pierre-François Chabalier, d'avoir le premier en 1991, attiré l'attention du Cirad sur les premiers travaux de modélisation de la croissance de la canne à sucre et m'avoir permis ainsi de me passionner depuis 10 ans pour ces études. Lors de mon installation à la Réunion, en 1994, son aide fut déterminante dans la réalisation des premiers travaux.

Je voudrais adresser une place toute particulière à Pierre Siband qui a su persuader, maintes fois, les responsables du programme canne de l'importance de la démarche modélisatrice et m'a soutenu lors de missions sur le terrain. Sans compter son temps, il m'a largement prodigué conseils et suggestions pour améliorer ce travail. Je lui en suis très profondément reconnaissant.

Ce travail de recherche a nécessité des milliers d'observations sur le terrain. Toute ma gratitude va à M. Jeannette et Richard de la Richaudy qui ont réalisé ces tâches avec sérieux et efficacité.

Je remercie aussi pour leur contribution les techniciens, VAT et stagiaires qui ont participé à ces travaux.

J'ai bénéficié aussi de l'appui de M. Mezino et J.C. Combres lors de la construction de la plate-forme de simulation Simulex, de l'aide de L. Lemezo, M. Mete et B. Mouny-Latchimy pour les mesures effectuées sur le site de Tirano, de la disponibilité de R. Nativel pour la fourniture de données météo. Je les en remercie vivement.

Mes pensées vont aussi :

- à mes collègues et amis du CIRAD à la Réunion et en Guadeloupe qui m'ont apporté, dans la bonne humeur, aide, conseil et soutien ; je pense tout particulièrement à P. Todoroff, B. Siegmund, D. Pouzet, R. Goebel, J.M. Chastel et J.L. Chopart,
- à B. Gabrielle de l'INRA-Grignon ainsi que G. Soumayet et S. Bouzouina, pour leur aide dans l'intégration du bilan hydrique de Ceres et des procédures d'optimisation.

Enfin, je tiens à remercier Monique, Stéphanie et Etienne qui ont su être compréhensifs et supporter mon manque de disponibilité durant ces années.

Je dédie ce mémoire à mes parents qui auraient été fiers et heureux de ce travail.

TABLE DES MATIERES

GLOSSAIRE

INTRODUCTION 10 I REVUE BIBLIOGRAPHIQUE 11 I.1 Problématique de la canne à sucre 11 I.1.1 Importance économique 11 I.1.2 Cycle de la canne et vocabulaire 11 1.1.3. Problématique générale de la production de canne 15 1.1.4 La canne à la Réunion 17 I.2 La Canne et son fonctionnement 21 I.2.1 Taxonomie et génétique 21 I.2.2 Anatomie et morphologie 21 1.2.3 Physiologie : Photosynthèse, transport, partition et stockage du sucre 24 1.2.4 Fonctionnement de la culture suivant les phases biologiques 24 1.2.5 Autres contraintes 31 1.3 Pertinence des modèles de croissance biophysiques et 32 caractéristiques attendues I.3.1 Pertinence d'un modèle de croissance biophysique 32 1.3.2 Les modèles de croissance de la canne à sucre en 2002 34 1.3.3 Notre choix de modélisation 37 II MATERIEL et METHODES 39 II.1 Le modèle 39 II.1.1 Le module de bilan hydrique 39 II.1.2 Le module de croissance 43 **II.2 Dispositifs** 48 IL3 Mesures at Observations 51

3 Mesures et Observations	51
II.3.1 Variables climatiques	51
II.3.2 Dimensions des parcelles de suivi	51
II.3.3 Apparition et sénescence des limbes	51
II.3.4 Efficience d'interception du rayonnement	53
II.3.5 Evolution de la biomasse et de l'indice foliaire	53
II.3.6 Caractéristiques hydrodynamiques et évolution de l'humidité du sol	59

6

•	
II.4 Traitement des données	59
II.4.1 Première étape du calage : estimation directe des paramètres sans l'aide du modèle.	59
II.4.2 Deuxième étape du calage : estimation des paramètres avec l'aide du modèle et de la méthode du recuit simulé.	60
II.4.3 Bilan hydrique	60
II.4.4 Validation du modèle	60
II.4.5 Analyse de sensibilité aux paramètres du modèle	61
II.5 Applications du modèle	61
II.6 Analyses Statistiques	63
II.6.1 Calage des paramètres des fonctions spécifiques du modèle	63
II.6.2 Analyse de la capacité prédictive du modèle	63
II.6.3 Analyse de sensibilité	64
II.7 Outils de simulation et d'analyse statistique	64
III RESULTATS	65
III.1 Calage du modèle : détermination directe des paramètres	65
III.1.1 Température de base	65
III.1.2 Partition de la biomasse aérienne en biomasse de limbes	67
III.1.3 Paramètres de calcul de l'indice foliaire	67
III.1.4 Surface spécifique des limbes	67
III 1.5 Coefficient d'extinction du rayonnement incident	69
III 1.6 Partition de la biomasse aérienne en biomasse de tiges usinables	69
III 1.6. Partition de la biomasse de tiges usinables en structures et réserves	69
III.1.8 Biomasse morte	71
III.2 Calage du modèle : optimisation à l'aide de la méthode du recuit	72
simulé	12
III.2.1 Dynamique de l'indice foliaire	72
III.2.2 Dynamique des matières sèches aériennes et évaluation de l'efficience de conversion	75
III.2.3 Partition de la matière sèche aérienne et dynamique de la matière sèche de tige usinable	75
III.2.4 Partition de la matière sèche de tiges usinables : rendement sucre	75
III.2.5 Humidité des cannes : rendement canne	79
III.2.6 Richesse	79
III.2.7 Tests d'autres formalisations	82
III.3 Qualité de l'estimation du bilan hydrique	83
	83
III.3.1. Stock d'eau dans le sol	
III.3.1. Stock d'eau dans le sol III.3.2. Etats de croissance de la plante	85
III.3.1. Stock d'eau dans le sol III.3.2. Etats de croissance de la plante III.4 Evaluation du modèle	85 85
III.3.1. Stock d'eau dans le sol III.3.2. Etats de croissance de la plante III.4 Evaluation du modèle III.4.1 Validation du modèle	85 85 85

III.5 Analyse de sensibilité	90
III.5.1 Étude de sensibilité paramètre par paramètre	90
III.5.2 Etude de sensibilité croisée	92
III.6 Applications du modèle	92
III.5.1 Applications réalisées	92
III.5.2 Impact potentiel de l'irrigation dans une zone hétérogène	100

IV DISCUSSION et CONCLUSION

.

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES			
ANNEXE 1	Caractéristiques des sols de la Réunion et des sites utilisés	117	
ANNEXE 2	Analyse de sensibilité (graphiques)	118	
ANNEXE 3	Variabilité de la croissance et des potentialités de la canne à sucre à la Réunion. Utilisation du modèle de croissance Mosicas.	120	
ANNEXE 4	Validation d'un modèle de croissance de la canne à sucre et application à l'optimisation d'un calendrier d'irrigation.	124	
ANNEXE 5 I S	Une plate-forme de simulation comme outil d'analyse et d'aide à la décision : SIMULEX	127	

103

GLOSSAIRE

Liste des variables et paramètres du modèle

Nom	UNITE	DEFINITION
asw	mm	Stock réel d'eau disponible sur le profil racinaire (stock utile)
Awc	mm	Capacité maximale d'eau disponible sur le profil racinaire appellée réserve utile ou ru
Deblai	degré.jour	Levée ou début de l'apparition du lai
Deblaisent	sans	Début de sénescence des limbes par ombrage et température ; il correspond à un seuil d'indice foliaire.
Debmsa	g m ⁻²	Début d'allocation totale (kmsa=1) de la matière sèche non racinaire (dmst-dmsrac) à la matière sèche aérienne (dmsa)
Debmstu	g m ⁻²	Début d'allocation de la matière sèche aérienne (dmsa) à la matière sèche de tige usinable (dmstu)
Dep(i)	cm	Profondeur du milieu de la couche de sol i
dj	degré.jour	Nombre de dégrés.jour
dlai	sans	Accumulation journalière de surface de limbe
Dlayr(i)	cm	Epaisseur de la couche de sol i
Dmsa	g m ⁻² j ⁻¹	Accroissement journalier de la matière sèche aérienne
Dmsl	g m ⁻² j ⁻¹	Accroissement journalier de la matière sèche de limbes
dmsrac	g m ⁻² j ⁻¹	Accroissement journalier de la matière sèche racinaire
dmst	g m ⁻² j ⁻¹	Accroissement journalier de la matière sèche totale
dmstst	g m ⁻² j ⁻¹	Accroissement journalier de la matière sèche de structures de tige usinable
dmstu	g m ⁻² j ⁻¹	Accroissement journalier de la matière sèche de tige usinable
dstwat	g m ⁻² j ⁻¹	Accroissement journalier de la masse d'eau des tiges
dsucre	g m ⁻² j ⁻¹	Accroissement journalier en saccharose
dul(i)	sans	humidité volumique (fraction) à la capacité au champ de la couche de sol i
dulr	mm	Stock d'eau à la capacité au champ sur le profil racinaire
e0	mm	EvapoTranspiration maximale (Pennman-Monteith) appelée etp
ei	sans (0-1)	Efficience d'interception
ер	mm	Transpiration réelle de la plante appelée etr
ep1	mm .	Demande climatique maximale pour la transpiration appelée etm plante
humtig	%	Humidité de la canne usinable
irr	mm	Dose d'irrigation appliquée
ke	sans	Coefficient d'extinction
klaidj	.(degré.jour)	¹ Taux d'accroissement potentiel de surface de limbe
klaisent	(degré.jour) ⁻¹	Taux de sénescence de surface de limbe due à l'ombrage et à la température
klaisenw	Sans	Taux de sénescence de surface de limbe due au stress hydrique
kmsa	Sans	Taux d'allocation de la matière sèche non racinaire à la matière sèche aérienne
kmsadeb	Sans	Taux initial d'allocation de la matière sèche non racinaire à la matière sèche aérienne
kmsl	Sans	Taux d'allocation de la matière sèche aérienne dmsa à la matière sèche de limbes dmsl
kmsl1	Sans	Paramètre de la formule de calcul de kmsl
kmsl2	Sans	Paramètre de la formule de calcul de kmsl
kmsl3	g ⁻¹	Paramètre de la formule de calcul de kmsl

kmstu	Sans	Taux d'allocation de la matière sèche aérienne à la matière sèche de tige usinable
kmstu1	Sans	Paramètre de la formule de calcul de kmstu. Taux d'allocation maximal
kmstu2	Sans	Paramètre de la formule de calcul de kmstu
krac	sans (0-1)	Coefficient d'allocation de la matière sèche totale (dmst) à la matière sèche racinaire (dmsrac)
krdw1	Sans	Paramètre de la formule de calcul de dstwat (effet tige)
krdw2	Sans	Paramètre de la formule de calcul de dstwat (effet sucre)
ksla1	cm ² g ⁻¹	Paramètre de la formule de calcul de slat
ksla2	cm ² g ⁻¹	Paramètre de la formule de calcul de slat
ksla3	g ⁻¹	Paramètre de la formule de calcul de slat
ktconv	°C ⁻²	Paramètre de la formule de Kiniry relative au calcul du coefficient de stress température ktemp
ktemp	Sans	Coefficient de stress température sur la conversion (formule de Kiniry)
ktstru	Sans	Coefficient d'allocation réel de la matière sèche de tige usinable (dmstu) à ses structures (dmstst)
ktstrua	Sans	Coefficient d'allocation théorique de la matière sèche de tige usinable (dmstu) à ses structures (dmstst).
ktstrua1	Sans	Paramètre de la formule de calcul de kstrua
ktstrua2	Sans	Paramètre de la formule de calcul de kstrua
ktstrut	Sans	Coefficient de correction de ktstrua (effet de la température)
ktstrut1	°C ⁻¹	Paramètre de la formule de calcul de kstrut
ktstruw	Sans	Coefficient de correction de ktstrua (effet du stress hydrique)
lai	sans	Indice foliaire (m ² de limbes par m ² de sol)
ll(i)	sans	humidité volumique (fraction) au point de flétrissement de la couche de sol i
llr	mm	Stock d'eau au point de flétrissement sur le profil racinaire
msa	g m ⁻²	Matière sèche aérienne
msl	g m ⁻²	Matière sèche de limbes totaux
mslp	g m ⁻²	Matière sèche de limbes totaux du jour précédent
msrac	g m ⁻²	Matière sèche racinaire
mst	g m ⁻²	Matière sèche totale
mstst	g m ⁻²	Matière sèche de structures de tiges usinables
mstu	g m ⁻²	Matière sèche de tige usinable (structures + sucre)
nlay	sans	Nombre de couches de sol
par	MJ m ⁻²	Rayonnement journalier incident utile à la photosynthèse
pari	MJ m ⁻²	Rayonnement journalier intercepté utile à la photosynthèse
profutile	cm	Profondeur du front racinaire
psicr	bars	Potentiel foliaire critique
rdcan	T ha ⁻¹	Rendement canne (matière fraîche de tige usinable)
rg	MJm ⁻²	Rayonnement journalier global incident
richcan	%	Richesse ou concentration en saccharose dans la matière fraîche de canne usinable
rlv(i)	cm cm ⁻³	densité racinaire dans la couche de sol i
rr	mm	Pluie journalière
ruemax	g MJ⁻¹	Efficience maximale de conversion
sat(i)	sans	humidité volumique (fraction) à saturation de la couche de sol i
sdj	degré.jour	Cumul des degrés.jour depuis plantation ou coupe précédente (temps thermique)
sh	sans	Coefficient de satisfaction hydrique donné par l'équation de Slabbers (Slabbers,1982; Brisson et al, 1992)
sla	cm ² g ⁻¹	Surface massique des limbes verts d'un couvert
slai	sans	Sénescence journalière de limbe
slait	sans	Sénescence journalière de limbe due à l'ombrage et à la température
slaiw	sans	Sénescence journalière de limbe due au stress hydrique

slaj slat slatp	m2g ⁻¹ m ² g ⁻¹ m ² g ⁻¹	Surface massique des limbes produits quotidiennement Surface massique de l'ensemble des limbes d'un couvert Surface massique de l'ensemble des limbes d'un couvert au jour précédent
sucre	g m ⁻²	Saccharose produit
sw(i)	sans	Humidité volumique (fraction) de la couche de sol i
swdef	sans (0-1)	Taux de satisfaction hydrique du sol (stock utile/ réserve utile) sur le profil racinaire
swdf1	sans (0-1)	Coefficient de stress hydrique relatif à l'accumulation de biomasse (photosynthèse, conversion)
swdf2	sans (0-1)	Coefficient de stress hydrique relatif à la croissance linéaire ou surfacique (lai, élongation, structures)
swr	mm	Stock d'eau sur le profil racinaire
tbase	°C	Température seuil d'apparition des feuilles.
tconvopt	°C	Température optimale de conversion relative au calcul du coefficient de stress thermique ktemp
tdiu	°C	Température moyenne diurne journalière de l'air (0,25*tempmn+0,75*tempmx)
tempmn	°C	Température minimale journalière de l'air
tempmx	°C	Température maximale journalière de l'air
tempstru	°C	Seuil de température relatif à l'allocation de matière sèche de tige usinable aux structures de la tige. Paramètre de la formule de calcul de ktstrut
tmo	°C	Température moyenne journalière de l'air (tempmn+tempmx)/2
watstm	g m ⁻²	Masse d'eau contenue dans la tige usinable

Liste des sigles et abréviations

Nom	DEFINITION
APSIM	Agricultural Productions Systems Simulator
BSES	Bureau of Sugar Experiment Stations (Australie)
CERES	Crop Environment Ressources Synthesis
CIRAD	Centre International en Recherche Agronomique pour le Développement
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
CTICS	Centre technique interprofessionnel de la canne et du sucre (Réunion)
DSSAT	Decision Support system for agrotechnology transfert
ICASA	International Consortium for Agricultural Systems Applications
MOSICAS	Modèle de simulation de la croissance de la canne à sucre
MT	Million de tonnes
SASEX	South African Sugar Association Experiment Station
SIMULEX	Simulateur d'expérimentations (Plate-Forme de simulation)

:

Liste des termes utilisés en culture de canne à sucre

Nom	DEFINITION
Campagne	Période de récolte de l'ensemble des parcelles alimentant une sucrerie
Coupe	Récolte d'une parcelle, pratiquée en une seule opération, à un moment décidé à la fois sur des critères biologiques, climatiques, culturaux et industriels. La date de coupe marque la fin d'un cycle de récolte et le début du cycle suivant
Cycle de culture ou cycle total	Temps écoulé entre deux plantations (2 à 10 ans), comprenant une ou plusieurs coupes
Cycle de récolte	Temps écoulé entre deux coupes successives ou entre plantation et première coupe, et souvent appelé improprement cycle annuel.
Fibre	Concentration de matières sèches autres que les sucres (en %) dans la tige usinable fraîche. Elle est constituée en majorité de cellulose
Germination	Démarrage, en début de cycle de récolte, des bourgeons des boutures ou des parties souterraines des tiges coupées
Maturation	Période d'accumulation de sucre, de l'apparition de la tige usinable à la coupe. Ce terme est aussi employé, dans la pratique, pour désigner une phase d'accroissement particulier de la concentration en sucre, sous l'effet de conditions climatiques ou d'un traitement agronomique
Rendement canne	Masse fraîche de tiges usinables par unité de surface que l'on appelle aussi rendement. Dans la pratique, la canne peut incorporer quelques résidus supplémentaires, selon le mode de récolte
Rendement sucre	Masse de sucre (saccharose) par unité de surface
Repousses	Pousses des cycles de récolte suivant une vierge
Richesse	concentration de sucre (saccharose en %) dans la tige usinable fraîche
Tige usinable	Portion inférieure de la tige, constituée d'entre-nœuds ayant achevé leur croissance et contenant du saccharose. Elle correspond à la partie envoyée à l'usine
Vierges ou cannes plantées	Premier cycle de récolte, où les tiges sont issues directement de boutures (plantation)

•

INTRODUCTION

Dans un contexte non plus de production maximale mais d'optimisation économique et durable des ressources, les problèmes posés à la recherche agronomique sont de plus en plus difficiles à résoudre. En effet les solutions recherchées, qui doivent être trouvées rapidement avec des moyens de plus en plus limités, nécessitent de tester une vaste gamme de scénarios possibles dans des milieux très divers et font appel à des processus biophysiques et socioéconomiques complexes. Il en est ainsi pour toutes les cultures et en particulier pour la canne à sucre.

Parmi les outils disponibles, capables de résoudre ce type de questions, les modèles biophysiques occupent une place de choix. Leur essor s'est accru ces 20 dernières années du fait du développement de nos connaissances sur le fonctionnement des plantes, de la facilité de disposer de données nécessaires à la simulation et de l'acquisition d'outils informatiques puissants de traitement de ces données. Concernant la canne à sucre, la modélisation n'a réellement été initiée qu'à la fin des années 80.

En 1991, le CIRAD s'est donné pour objectif de promouvoir cet outil d'aide à la décision sur la canne à sucre en choisissant comme premier site d'étude la Réunion.

Cette thèse présente les choix adoptés et le modèle élaboré, le calage de ses paramètres, son évaluation, les applications réalisées, les limites rencontrées et les perspectives attendues.

Dans un premier temps, l'exposé de la problématique générale de production de canne, et celle spécifique à la Réunion, permet d'analyser la demande et la nécessité d'un modèle. L'étude des conditions pédoclimatiques et culturales de cette île montre l'intérêt du site et définit les choix culturaux et les facteurs auxquels doit être sensible le modèle. L'examen des connaissances du fonctionnement de la canne fait ressortir les caractéristiques spécifiques du modèle et des mesures associées. La comparaison des modèles disponibles souligne la nécessité d'en construire un.

Ensuite nous décrirons le modèle ainsi que les observations, dispositifs et méthodes utilisés pour son calage et son évaluation. Une application analysant l'impact potentiel de l'irrigation sur une région sera proposée.

Enfin, après l'exposé des résultats concernant le calage, l'évaluation et l'application du modèle, nous discuterons de ses limites actuelles et des perspectives.

I REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Problématique de la production de canne à sucre

I.1.1 Importance économique

La canne est intéressante pour le sucre qu'elle contient, mais aussi pour les sous-produits engendrés lors de sa transformation (figure 1).

Ainsi, lors de cette opération, sont recueillis :

- -de la bagasse dont la combustion couvre les besoins en énergie de la sucrerie et, convenablement utilisée, produit de l'électricité pour la consommation locale,
- des écumes riches en chaux qui peuvent servir d'amendement aux parcelles proches de l'usine,
- -de la mélasse recyclée dans la distillation pour produire du rhum, utilisée dans la fabrication d'aliments pour bétail et employée par les industries agroalimentaire et pharmaceutique.

De plus, la canne sert de matière première à la production d'éthanol-carburant, comme c'est le cas au Brésil où, en 1996, 13.9 10⁹ litres d'éthanol ont été produits à partir de 65% des cannes récoltées.

La consommation mondiale de sucre (124 MT en 1999) a été multipliée par 15 depuis 1900 du fait des augmentations de la population mondiale et de la consommation annuelle par habitant qui a quadruplé depuis cette date (de 5.1 à 20.4 kg/habitant/an).

Cette évolution de la consommation en sucre a été essentiellement assurée par l'accroissement de production de canne, qui a dépassé celle de betterave dès 1918. L'écart entre les deux cultures s'est considérablement creusé, notamment dans les années 60 et 90 (figure 2): la canne produit actuellement 70% du sucre mondial, soit près de 96 MT. Sa vaste répartition géographique assure un relative régularité de la production (figure 3).

I.1.2 Cycle de la canne et vocabulaire

La canne est une plante pérenne qui se propage généralement par voie végétative. Elle est plantée à l'aide des boutures de tiges et les repousses de tiges après chaque coupe permettent plusieurs récoltes successives. Le sucre est une réserve carbonée qui s'accumule dans la tige tout au long de la croissance, aussi la date de récolte n'est pas entièrement déterminée par le cycle biologique.

Ces traits conduisent à identifier des caractéristiques et une terminologie particulières.

<u>Coupe</u> : récolte d'une parcelle, pratiquée en une seule opération, à un moment décidé à la fois sur des critères biologiques, climatiques, culturaux et industriels. La date de coupe marque la fin d'un cycle de récolte et le début du cycle suivant

Campagne : période de récolte de l'ensemble des parcelles alimentant une sucrerie.

Cycle de culture ou cycle total (figure 4a) : temps écoulé entre deux plantations (2 à 10 ans), comprenant une ou plusieurs coupes

<u>Cycle de récolte</u> (figure 4a), souvent appelé improprement cycle annuel : temps écoulé entre deux coupes successives ou entre plantation et première coupe



Figure 1. Schéma simplifié décrivant les processus et sous-produits de la transformation de la canne en sucre



Figure 2. Evolutions comparées des productions de sucre de canne et de betterave depuis 1900 (Anonyme. FO Licht 2000)

. .



Figure 3. Localisation des zones de culture de canne dans le monde.



Figure 4b. Cycle biologique de la canne à sucre. Evolution comparée des différents états observés du couvert : indice foliaire (lai) et fraction interceptée du rayonnement (ei) ; tiges vivantes (nbtv) et mortes (ntm) en tiges m⁻² ; biomasses aériennes (msa), de tige usinable (mstu), de sucre, de limbes totaux (msl) et morts (mslm), en gm⁻² en fonction du temps thermique en abscisses (température seuil de 12°C). Les biomasses sont exprimées en matières sèches.



<u>Vierges ou cannes plantées</u>: pousses (tiges) du premier cycle de récolte, issues directement de bouture (plantation)

Repousses : pousses des cycles de récolte suivant une vierge.

Rang de cycle de récolte: Numéro de cycle de récolte (Vierge, repousse 1, repousse 2, ...)

Germination : démarrage, en début de cycle de récolte, des bourgeons des boutures ou des parties souterraines des tiges coupées.

<u>Tige usinable</u> : portion inférieure de la tige, constituée d'entre-noeuds ayant achevé leur croissance et contenant du saccharose. Elle correspond à la partie envoyée à l'usine.

<u>Maturation</u> : période d'accumulation de sucre, de l'apparition de la tige usinable à la coupe. Ce terme est aussi employé, dans la pratique, pour désigner une phase d'accroissement particulier de la concentration en sucre, sous l'effet de conditions climatiques ou d'un traitement agronomique

<u>Rendement canne</u>: masse fraîche de tiges usinables par unité de surface que l'on appelle aussi rendement. Dans la pratique, le canne peut incorporer quelques résidus supplémentaires, selon le mode de récolte

Rendement sucre : masse de sucre (saccharose) par unité de surface

Richesse: concentration de sucre (saccharose en %) dans la tige usinable fraîche

Fibre : concentration de matières sèches en % (non compris les sucres) dans la tige usinable fraîche. La fibre est constituée en majorité de cellulose.

1.1.3. Problématique générale de la production de canne

Certains impératifs sont liés aux caractéristiques de la filière, et se manifestent de façon permanente :

- la recherche de réduction des coûts des infrastructures de la sucrerie implique l'étalement de la récolte à l'échelle du bassin cannier qui l'alimente sur la plus grande durée possible (figure 5),
- de la même façon, la répartition du travail sur une exploitation au cours de la campagne nécessite l'étalement des coupes, ce qui demande une diversification des choix variétaux, et une adaptation de l'itinéraire technique des différentes parcelles, pour concilier à chaque récolte la meilleure richesse avec un rendement canne aussi élevé que possible (figure 5).

A ces problèmes permanents s'ajoutent de nouvelles contraintes :

- d'ici à 2010, la demande annuelle en sucre s'accroîtra de 30 MT qui, compte tenu de la stagnation récente de la production de betterave, devront être produits à partir de canne à sucre (Anonyme, 1998). Ce besoin supplémentaire devra être couvert par des accroissements à la fois de surfaces, gagnées sur des zones moins propices à la culture de la canne, et de rendements de plus en plus difficiles à augmenter,
- l'ouverture rapide des marchés avive la nécessité de poursuivre l'accroissement du niveau de compétitivité de la culture, impliquant une optimisation de plus en plus fine des conditions locales de productivité,
- enfin, la limitation de la ressource en eau, liée à une augmentation des surfaces irriguées et à l'urbanisation accélérée (consommation domestique, industrie, cultures périurbaines) à proximité des sites de production, rend plus impérieuse l'optimisation de son usage.

Il apparaît ainsi une <u>diversité</u> croissante de situations de culture, un poids plus grand d'une multiplicité de facteurs, des exigences de rendements plus élevés qui rendent l'optimisation des solutions agronomique plus <u>complexe</u>, et une évolution <u>rapide</u> du contexte nécessitant des solutions urgentes.



Figure 5. Schéma des cycles de culture de Richard Toll, Sénégal (latitude 16.5°N). Culture irriguée. (d'après Fauconnier, 1991)

La récolte ou campagne correspond à la période de récolte de l'ensemble des parcelles de l'exploitation.

Les parcelles sont de trois types de cycles différents : 'a ou précoce' récoltées en début de campagne (Novembre à Janvier), 'b ou de milieu' récoltées en milieu de campagne (Janvier à Mars) et 'c ou tardive' récoltées en fin de campagne 'Avril à Juin'.

L'âge moyen à la récolte de chaque parcelle de chaque type de cycle, la durée sous culture de canne (somme des âges), la durée entre la dernière récolte et une nouvelle plantation et la durée totale du cycle sont indiquées sur la droite du graphique.

I.1.4 La canne à la Réunion

1.1.4.1 Importance de la canne à sucre pour l'île de la Réunion

La production de canne à sucre date à la Réunion du début du 19^{ème} siècle en remplacement de celle du café atteinte de maladie et régulièrement détruite par les cyclones.

La filière canne-sucre-rhum-bagasse est, à divers titres, d'une importance majeure à la Réunion:

- -d'un point de vue <u>économique</u>, elle représente en valeur 27% de la production agricole, près de 65% des exportations avec un marché garanti (quotas CEE de 296.000 T de sucre) et 50% de la production électrique de l'île grâce à la bagasse (Anonyme, 1997),
- -en outre, la filière canne a un rôle <u>social</u> indéniable, puisqu'elle fait vivre indirectement 10.000 familles, apportant ainsi une cohésion sociale durable, et le maintien d'une population rurale dans un contexte de chômage très élevé (Anonyme, 1997),
- -enfin, la canne joue un rôle <u>environnemental</u> particulièrement important, du fait même qu'elle couvre 60% de la surface agricole utile, et, grâce à ses caractéristiques de culture anti-érosive, qu'elle est propre (peu de produits phytosanitaires appliqués), et, potentiellement, susceptible de recycler les déchets urbains et agro-industriels de plus en plus abondants (Anonyme, 1997).

Sur l'île, 4.930 planteurs cultivent de la canne sur 26.300 ha et des surfaces variant de 0.5 à 300ha (71% cultivent 37% des surfaces) avec un rendement canne moyen de 70 Tha⁻¹ (CTICS, 2001). La production de canne annuelle représente 1.8 à 2 MT pour produire 200 à 220.000 T de sucre. Sur une campagne, les richesse et fibre moyennes annuelles des cannes se situent autour de 14% et 16.5% respectivement (CTICS, 2001). Le traitement industriel de cette production est réalisé, à part égale, par deux sucreries- Le Gol au Sud-Ouest, et Bois Rouge au Nord-Est (figure 6)-, dont la rentabilité n'est assurée qu'avec un tonnage annuel d'au moins 900.000 T. De ce fait, le <u>risque</u> existe qu'une baisse de production sensible dans le secteur qui alimente une usine entraîne d'un coup la disparition de la moitié de la capacité de traitement de l'île. Or, la régression des terres agricoles due à la pression foncière, qui est de 600 ha /an, accroît ce risque.

1.1.4.2 Situation et conditions pédo-climatiques

La Réunion est une île d'origine volcanique de l'Océan Indien située dans l'archipel des Mascareignes, 800 Km à l'est de Madagascar, par 55°30' de longitude Est et 21°05' de latitude Sud. Sa superficie de 2510 Km² occupe une forme ovoïde, compacte et fortement accidentée, où la zone cannière représente une ceinture littorale allant de 0 à 1000m d'altitude dans l'ouest et de 0 à 600m dans l'est (figure 6).

Au cours de l'année, le climat général dépend de la position de l'anticyclone de l'Océan Indien par rapport à la Réunion (Raunet, 1991). Cet anticyclone provoque un fort courant d'alizés venant d'Est-Sud-Est qui délimite deux régions extrêmes : une région 'au vent' et pluvieuse à l'Est et au Sud et une région 'sous le vent' et sèche à l'Ouest (Raunet, 1991).

De part sa situation géographique, la Réunion bénéficie d'un climat tropical sur le littoral et relativement tempéré en altitude, comportant une saison chaude et humide de Novembre à Avril et une saison fraîche de Mai à Octobre, moins pluvieuse dans l'Est et sèche dans l'Ouest.



Figure 6. Situation de la zone cannière, des usines et des stations météorologiques complètes à l'île de la Réunion.

18

a strates

Des cyclones violents, généralement orientés NE-SO, traversent la zone des Mascareignes de Novembre à Mars en pleine saison des pluies. Vents et précipitations y atteignent des records avec des conséquences qui peuvent être désastreuses sur les cultures ; la canne est celle qui résiste généralement le mieux, lorsqu'elle qu'elle n'est pas trop grande. La période de coupe doit être compatible avec cette contrainte.

Ce contexte de courants dominants très orientés, sur une île élevée faisant écran, entraîne de très forts gradients de pluviosités annuelles (600 à 9000mm) auxquels s'ajoute un fort gradient de température (0.7° par 100m) lié à l'altitude. Il s'ensuit une multiplicité de climats sur une faible superficie. La couverture météorologique (MétéoFrance et CIRAD), très importante depuis plus de 10 ans (figure 6), permet de quantifier ces gradients et l'évolution des caractéristiques météorologiques au cours de l'année (figures 7 et 8).

D'origine volcanique à dominante basaltique, les sols ont subi une pédogenèse intense du fait du climat tropical. La variabilité spatiale de ce dernier et des coulées de lave successives a entraîné une multitude d'unités de sols. Concernant la sole cannière, il existe 6 principaux types morphopédologiques (Annexe 1): ferrallitique, vertique, brun, brun andique, andique perhydraté et andique non perhydraté (Raunet, 1991).

<u>L'extrême diversité des climats et des sols</u> a conduit à distinguer 24 micro-régions relativement homogènes pour l'interprétation des analyses de sol et le conseil en fertilisation (Pouzet et al, 1997). Pour répondre à cette diversité, les création et sélection variétales actuelles s'avèrent très coûteuses. Dans certaines conditions extrêmes (basses températures des Hauts de la Réunion), auxquelles la recherche n'a pu consacrer une attention suffisante, des exploitations se situent à la limite de la rentabilité.

1.1.4.3 Culture et récolte

Les plantations ont lieu généralement de Novembre à Mars (période chaude et pluvieuse). Le cycle de culture moyen a pu être abaissé à 8.3 ans et devrait tendre vers un optimum économique de 7 à 8 ans soit une vierge et 6 à 7 repousses. L'âge des cannes à la récolte varie de 10 à 18 mois avec une majorité entre 11 et 13 mois.

La récolte ou campagne, qui est l'opération la plus exigeante en travail, se déroule de juillet à décembre. La main d'œuvre agricole de plus en plus rare et chère met en péril de nombreuses exploitations et entraîne un effort de mécanisation, avec des solutions fonction de la pente du terrain. Un mois avant le début de la campagne, l'usine doit, en se fondant sur les estimations individuelles de production, définir le quota journalier que pourra fournir chaque agriculteur (production/nombre de jours de campagne). Le prix de la tonne de canne livrée dépend de sa richesse et de la richesse moyenne des livraisons de la même période.

La zone irriguée représente actuellement 6.700 ha (un quart des surfaces de canne) concentrés sur la région sèche du Sud Ouest (bras de La Plaine et bras de Cilaos). A ces surfaces, grâce au basculement de l'eau des cirques de Mafate et Salazie, devraient s'ajouter prochainement 5.200 ha (un cinquième des surfaces de canne) situés entre 0 et 660m d'altitude dans la zone Ouest (Anonyme, 1997). D'un autre côté, certaines saisons particulièrement sèches et la concurrence de l'eau d'habitation conduisent à des rationnements en eau de plus en fréquents et nécessitent une optimisation de la gestion de l'eau.



Figure 7. Evolution mensuelle du rayonnement global moyen journalier Rg de 5 stations météorologiques de la zone cannière situées entre 20m et 800m d'altitude. (Sources Cirad et Météo France)



Figure 8. Evolution mensuelle de la température moyenne journalière de 5 stations météorologiques de la zone cannière situées entre 20m et 800m d'altitude. (Sources Cirad et Météo France)

Sept variétés sont cultivées (Anonyme, 1997). Parmi celles ci, la <u>R570</u>, très plastique, introduite dans la décennie 80 occupe encore 70% des surfaces. Les autres variétés sont adaptées à des situations variées d'altitude, de zones sèches ou humides, de précocité ou de zones irriguées (Anonyme, 1997)

1.1.4.4 Principaux problèmes posés à l'agronome

Le maintien de la production est la priorité à la Réunion. La sauvegarde des exploitations menacées par la cherté de la main-d'œuvre, ou les conditions thermiques les plus rigoureuses, demande des adaptations techniques, comme la mécanisation, le calage du cycle de récolte, le choix de variétés adaptées, des écartements de lignes, etc. La mise en culture de nouvelles terres, en compensation des surfaces abandonnées, va accroître la gamme des solutions agronomiques. Enfin, un ajustement plus judicieux des choix techniques par une approche plus intégrée peut laisser espérer des gains de rendements.

Dans les zones soumises aux déficits hydriques, les scénarios d'irrigation ne peuvent plus prétendre à la satisfaction totale des besoins hydriques, mais devront tendre à optimiser l'efficience de l'irrigation.

1.2 La Canne et son fonctionnment

I.2.1 Taxonomie et génétique

Comme le maïs et le sorgho, la canne est une monocotylédone de la famille des Graminées et de la tribu des Andropogonées. Elle appartient au genre Saccharum et comprend 6 espèces. Deux de ces espèces sont sauvages : S. spontaneum et S. robustum. Les autres sont cultivées traditionnellement pour leur sucre - S. officinarum, S. sinense et S. barberi - ou comme légume comme S. elude.

Toutes les espèces du genre Saccharum sont polyploïdes et souvent caractérisées par leur aneuploïdie. Les nombres de chromosomes varient de 2N=36 à 2n=170; les nombres de chromosomes de base sont de 8 chez S. spontaneum et de 10 chez S. officinarum (Glaszmann et al, 1989; D'Hont et al, 1994).

Les variétés produites et cultivées actuellement sont des hybrides interspécifiques résultant de croisements complexes entre une ou plusieurs des 3 espèces cultivées traditionnelles et, généralement, l'espèce sauvage S. spontaneum ou plus rarement S. robustum (Daniels et Roach, 1987; Sreenivasan et al, 1987).

I.2.2 Anatomie et morphologie

Bien que la morphologie de la canne à sucre soit similaire à celle du maïs et du sorgho, sa multiplication en exploitation agricole ne se fait pas par graine mais par voie végétative à l'aide de tiges entières ou de portions de tiges (boutures) plantées généralement dans des sillons. Sur les nœuds de ces boutures, les primordiums racinaires et bourgeons donneront respectivement des racines et des tiges qui porteront les feuilles, talleront et stockeront le sucre. Selon les conditions environnementales, la variété, et l'état de la plante, chaque tige pourra éventuellement fleurir.

I.2.2.1 Racines

Après plantation, les racines de boutures émergent des primordiums racinaires. Ces racines, minces, ramifiées et superficielles, ont une vie passagère et alimentent les jeunes tiges issues des bourgeons jusqu'à ce que ces dernières émettent leurs propres racines appelées racines de tige (figure 9) comprenant 3 types (Evans, 1935; Van Dillewijn, 1960) décrits sur la figure 10:

- Les racines superficielles, fibreuses et ramifiées, qui ont un rôle essentiellement d'absorption,
- Les racines de soutien ou de fixation plus épaisses et plus profondes,
- Les racines cordons, peu nombreuses et capables de descendre jusqu'à 4 à 6 m en conditions de sol favorables.

En général, 50% du poids sec des racines se trouvent dans les 25 premiers cm de profondeur et 90% dans les 60 premiers cm (Van Dillewijn, 1960; Baran et al, 1974; Chopart et Marion, 1994; Ball-Coelho et al, 1992). En repousse, juste après coupe, une partie du système racinaire précédent meurt (17% d'après Ball-Coelho et al, 1992), le reste, qui alimente la nouvelle pousse, dégénère progressivement en étant remplacé par les racines des tiges émises.

1.2.2.2 Feuilles

Les feuilles, simples et alternées, sont composées d'une gaine enveloppant la tige et d'un limbe. Ces deux parties sont reliées par une articulation utilisée pour distinguer les variétés. (figure 11). Les limbes augmentent en largeur, longueur et donc en surface selon leur numéro d'apparition sur la tige, jusqu'à se stabiliser (Inman-Bamber,1994; Védié, 1993; Bonnet 1996, Cheeroo-Nayamuth et al, 2000). A la récolte, et selon les variétés, elles peuvent mesurer entre 2 et 10 cm de large et 60 à 150 cm de long. La surface foliaire peut atteindre 8 à 10 fois la surface du sol occupée par la canne (Van Dillewijn,1960).

1.2.2.3 Tiges

Les tiges sont composées d'entre-nœuds et de nœuds successifs. Les yeux (ou bourgeons), situés au niveau des nœuds, sont alternés comme les feuilles. A la récolte, et selon l'âge des cannes, les tiges comprennent 20 à 50 entre-nœuds dont la longueur varie de 1 à 30 cm selon leur numéro d'apparition et les conditions climatiques et de nutrition qui ont caractérisé la période de croissance de l'entre-nœud concerné. Le profil des longueurs d'entre-nœuds peut constituer ainsi un historique des conditions de croissance de la culture (Van Dillewijn,1960). Leur diamètre, qui dépend dans une moindre mesure des mêmes facteurs que leur longueur, varie généralement de 2 à 4cm.

Le poids de chaque tige à la récolte varie ainsi de 0.5 à 3 kg. Le poids de tiges récoltées, ou rendement canne, peut atteindre 150 à 200 Tha⁻¹ de matière fraîche (70% d'humidité) en cannes récoltées à 12 mois, et 300 Tha⁻¹ en cannes récoltées à 24 mois. La richesse des tiges à la récolte varie généralement de 10% à 17%; elle diminue du bas vers le sommet de la tige et celle des entrenœuds est différente de celle des nœuds.

L'inflorescence (ou flèche) est une panicule branchue à axe vertical, issue de la transformation du méristème terminal végétatif en méristème reproducteur; elle varie en couleur, taille et forme selon le cultivar. Comme chez les céréales, l'inflorescence ne porte pas de graines, mais des caryopses ou grains.





Figure 9. Jeune plant de canne présentant deux sortes de racines : racines de boutures (A) et racines de tiges (B). C : bouture primitive, D : tige mère ou primaire, E : tiges secondaire (d'après Martin, 1938).

Figure 10. Système racinaire de canne à sucre montrant les différents types de racine. A : racines superficielles ; B : racines de soutien ; C : racines cordon (d'après Evans, 1935).



Figure 11. Détails de l'architecture de la tige de canne à sucre. Structures de la feuille (A), du nœud et l'entrenœud (B) (d'après Artschwager, 1940).

1.2.3 Physiologie : photosynthèse, transport, partition et stockage du sucre

Comme le maïs, le cycle photosynthétique de la canne est du type C4; c'est d'ailleurs sur cette plante qu'il a été identifié pour la première fois. Dans les limbes (figure 12), le CO₂ est fixé dans les cellules du mésophylle, et le saccharose, fabriqué dans les gaines entourant les faisceaux vasculaires, est libéré dans le phloème (Lingle, 1999). Les estimations d'assimilation maximale de carbone dans les feuilles en pleine lumière solaire varient de 18 μ molm⁻²s⁻¹ à Hawaii en hiver (Grantz, 1989) à 52 μ molm⁻²s⁻¹ en Australie pendant l'été (Bull et Tovey, 1974). Elles dépendent de l'âge des feuilles et de la structure du couvert (Varlet-Grancher et al, 1981). Le taux d'assimilation du carbone atteint apparemment son maximum pour une densité de flux de photon d'environ 1100 μ molm⁻²s⁻¹ au champ (Grantz, 1989).

Le saccharose est ensuite transporté très rapidement des feuilles vers les tissus de stockage (84cmh⁻¹ Hart, 1965; Hartt, 1970). Le mouvement vers le bas peut continuer jusqu'au 8ème entre-nœud sous l'insertion de la feuille (Hartt et al, 1963).

Dans la tige, le déchargement du saccharose à partir du phloème, et son métabolisme ultérieur, varient suivant l'âge des entre-nœuds :

- La lignification et la subérisation progressives des cellules entourant le phloème limitent le déchargement du saccharose,
- On observe des processus très complexes et simultanés de dissociation du saccharose en glucose et fructose, et de synthèse du saccharose à partir de ces deux sucres. Plusieurs enzymes interviennent dans ces réactions (figure 12) ; leur abondance et leur activité dans les entre-nœuds changent suivant leur stade de développement (Moore, 1995). Ainsi, les enzymes de dissociation du saccharose en glucose et fructose, nécessaires à la croissance, sont plus abondantes et actives dans les entre-nœuds en croissance (Celestine-Myrtil et Parfait, 1987; Lingle et Smith; 1991) et très faibles dans les entre-nœuds âgés (Su et al, 1992).

Généralement, le transport, la croissance et la partition sont plus sensibles aux mêmes facteurs environnementaux que la photosynthèse (Hartt, 1965). Ainsi, la maturation est le résultat d'une altération plus prononcée du transport et de la partition que de la photosynthèse (Hartt, 1965; Hartt, 1967; Lingle, 1999).

Les organes de stockage de la canne ne sont pas de simples puits, mais un système très dynamique (Lingle, 1999). Bien que les dissociations et synthèses parallèles du saccharose au sein la même cellule apparaissent coûteuses en énergie, la présence simultanée de cycles catabolique et anabolique de saccharose permet à la plante de répondre rapidement à des changements environnementaux (Moore, 1995).

1.2.4 Fonctionnement de la culture suivant les phases biologiques

I.2.4.1 Germination et Levée

Après plantation de boutures, ou coupe des tiges à la base, les bourgeons des boutures ou de la partie souterraine des tiges récoltées germent et donnent des tiges dites primaires. De nombreux facteurs interviennent sur le déroulement de la germination : la dominance apicale



Figure 12. Représentation schématique de l'élaboration du saccharose dans la feuille, de son transport dans le phloème, et de son métabolisme de stockage dans le parenchyme (dégradation et synthèse). (d'après Lingle, 1999)

(Benda et al, 1981), la taille des boutures (Van Dillewijn, 1960), la position du bourgeon dans le sol (Clements, 1980), l'âge des bourgeons (Singh et Kanwar, 1986), la teneur en eau de la bouture (Singh, 1975), la teneur en eau du sol (Singh et Srivastava, 1974), la température du sol (Gasho et al, 1973) et le génotype (Van Dillewijn, 1960).

La température et la teneur en eau du sol sont les facteurs abiotiques les plus déterminants de la germination (Van Dillewijn, 1960 ; Clements, 1980).

1.2.4.2 Emission des tiges et des feuilles

Une partie des bourgeons souterrains des tiges primaires émet des tiges secondaires à la base desquelles se développeront des tiges tertiaires et ainsi de suite. Cette phase de tallage, qui dure jusqu'à la fermeture du couvert (Van Dillewijn, 1960), est suivie d'une phase de sénescence des plus jeunes tiges après laquelle la population de tiges reste stable jusqu'à la récolte (figure 4b). Lors de la coupe, le nombre de tiges vivantes peut varier suivant les génotypes de 50 à 150 000 tiges ha⁻¹ ce qui correspond à 25-50% du nombre total de tiges émises au cours du cycle (Van Dillewijn, 1960; Irvine et Benda, 1980). La capacité de tallage de la plante n'est cependant pas définitivement inhibée par la fermeture du couvert car la verse des cannes, qui permet à la lumière de traverser la canopée, favorise l'émergence de nouvelles tiges.

La température de l'air, le rayonnement et les états hydrique et azoté de la plante ont un effet important sur la dynamique de tallage (Van Dillewijn, 1960). Il en va de même de la densité de plantation caractérisée principalement par l'espacement entre rangs (Irvine et Benda, 1980).

L'apparition des feuilles est continuelle et ne s'arrête qu'en cas de floraison. La température seuil d'émission dépend du génotype et peut varier de 7 °C à 12 °C (Ono et Nakanishi, 1983 ; Inman-Bamber, 1994 ; Védié, 1993 ; Campbell et al, 1998). L'état hydrique du sol n'a aucune influence sur le nombre final de feuilles visibles (Inman-Bamber, 1994). Après 10 à 14 feuilles apparues (Inman-Bamber, 1994 ; Védié, 1993), la sénescence des feuilles les plus âgées débute à un rythme proche de celui de l'émission, formant ainsi en conditions optimales un nombre relativement constant de 8 à 14 feuilles vertes déroulées au niveau de la partie supérieure de la tige. Le début de la sénescence et son intensité dépendent essentiellement du degré de fermeture du couvert, de la température et des états nutritionnel et hydrique de la plante.

La structure de feuillage (répartition de l'indice foliaire et inclinaison des feuilles) varie fortement au cours du cycle (Varler-Grancher et al, 1980).

1.2.4.3 Croissance et accumulation de biomasse

L'accumulation de biomasse globale et la croissance en longueur des tiges de canne est généralement décrite par une courbe en S (McMartin, 1979; Coale et al, 1993) durant laquelle trois phases sont observées (figure 13):

 la phase initiale et exponentielle, qui correspond au développement et à la mise en place des nouvelles tiges, et se caractérise par une source en carbone limitée par l'interception du rayonnement (indice foliaire),





Figure 15. Evolution des teneurs en sucres et en eau dans un entrenœud, en fonction de son âge, après le début de l'élongation (d'après Lingle, 2000).



Figure 16. Dessin schématique de la teneur en saccharose (ligne continue) et en glucose (tirets) dans des tiges dont l'âge augmente. Abscisse : portion de la tige de canne depuis la base (gauche) vers le haut (droite) ; d'après van Dillewijn (1960).

- ensuite, la phase linéaire, appelée phase de grande croissance ou 'boom-stage', durant laquelle l'accumulation élevée de biomasse dispose d'une source en carbone peu limitée puisque l'indice foliaire est suffisamment développé. La limite est alors l'intensité du rayonnement incident,
- enfin, un plateau provoqué par les conditions environnementales naturelles ou induites ralentissant la croissance (figure 13).

La durée de chaque phase et le taux de croissance durant la phase linéaire varient suivant les cultivars et sont fortement influencés par la variabilité saisonnière de la température, du rayonnement et de l'humidité (Clements et al, 1952) Dans les zones tropicales où le cycle de récolte est de deux ans, on observe, non pas une évolution en cloche du taux de croissance caractéristique de cannes récoltées annuellement, mais une courbe bimodale (figure 14) avec deux périodes de grande croissance correspondant aux optimums climatiques de chaque année.

Excepté dans le cas des fleurs, les accumulations de biomasses des différentes composantes de la canne débutent en même temps, se chevauchent (figure 4b), et ne présentent pas de véritables stades à partir desquels un début d'accumulation de biomasse dans un organe et arrêt dans un autre seraient observés (Lingle, 1999).

Cependant, l'apparition de la partie aérienne des tiges, la partie qui sera récoltée, peut être considérée comme un stade (Keating et al, 1999; Singels et al, 2000) car elle n'a lieu que bien après le début d'accumulation de biomasse totale de tige.

Parmi les facteurs environnementaux, la température, le rayonnement et les états hydriques et azotés de la canne ont des rôles primordiaux sur la croissance des organes (Lingle, 1999). Ainsi, les sensibilités différentes de ces organes aux températures de l'air et du sol peuvent modifier l'architecture du couvert et son homogénéité (Mongelard et Mimura, 1971; Mongelard et Mimura, 1972). Durant la phase de croissance linéaire, l'accumulation de biomasse aérienne de la canne à sucre est linéairement reliée au rayonnement intercepté (Muchow et al, 1994). Comme pour la majorité des plantes (Hsaio, 1973), le stress hydrique ralentit la croissance avant la photosynthèse, ces deux processus étant aussi fortement affectées par le statut azoté de la plante et particulièrement des feuilles (Clements, 1980).

1.2.4.4 Accumulation du saccharose

Dès le début de la croissance de l'entrenoeud, le saccharose s'y accumule et atteint une teneur maximale (figure 15), dépendante du cultivar et des conditions climatiques (Lingle, 1999). Inversement, les concentrations en sucres réducteurs (glucose et fructose), élevées quand l'entre-nœud est en croissance, diminuent ensuite rapidement pour pratiquement s'annuler (figure 15); il en va de même de l'humidité des entre-nœuds qui décroît progressivement de 90% à 70%.

Du fait de l'émission continuelle d'entre-nœuds et des évolutions de concentration précédemment décrites, chaque tige présente des gradients de teneurs en saccharose, en sucres réducteurs et en eau (figure 16), évoluant avec l'âge de la tige. Le gradient de concentration en saccharose (Das, 1934; Fernandes et Benda, 1985, ; Celestine-Myrtill et Parfait, 1987), très prononcé dans les jeunes tiges, s'atténue lorsqu'elles contiennent un nombre de plus en plus important d'entre-nœuds ayant atteint une teneur en sucre maximale (entre-nœuds 'mûrs').



Figure 17. Relations entre l'élongation de la canne (A), la teneur en saccharose (B) et la teneur en glucose (C). (d'après Das, 1936)
Ainsi, l'accumulation de saccharose est un processus continu (Robertson et al,1996), débutant peu de temps après l'apparition de la tige aérienne, et l'augmentation progressive de la richesse, est due à la fois à une augmentation de la proportion d'entre-nœuds ayant atteint une teneur maximale en saccharose et une diminution progressive de la teneur en eau.

La figure 17 illustre les relations entre conditions environnementales, croissance et richesse à l'échelle de la parcelle (Van Dillewijn, 1960).

1.2.4.5 Floraison

La physiologie de la floraison est complexe (Alexander, 1973). Parmi les conditions principales requises pour initier le méristème apical de la tige (Fauconnier, 1991 ; Alexander, 1973 ; Pereira et al, 1983; Berding et Moore, 1996 ; Julien et al, 1974), nous pouvons citer (Fauconnier, 1991) :

- -la durée du jour, d'abord voisine de 12H30, doit tendre vers 12H,
- -la température minimale doit être supérieure à 18°C (optimum entre 22 et 24°C),
- -un état hydrique et un stade de développement suffisants de la plante ainsi qu'un manque relatif d'azote.

La floraison (% de tiges fleuries) est variable suivant les variétés ; certaines ne fleurissent jamais, d'autres à 100%. A la Réunion, selon les variétés, l'apparition des 1ères fleurs a lieu entre le 1^{er} et le 30 mai sur le littoral et 1 mois plus tard dans les hauts, plus frais. Les principales variétés cultivées, dont la R570 qui représente 60 à 70% des surfaces, ne fleurissent pratiquement pas (0 à 2% de floraison) ; seule la R575 fleurit entre 25 et 40%.

La floraison, du fait de la diminution progressive de la surface foliaire et de la demande en carbone pour la croissance, modifie la courbe de croissance de la tige concernée et provoque une maturation accélérée (Julien et al, 1977; Nuss et Maharaj, 1992).

I.2.5 Autres contraintes

Les maladies et ennemis de la canne sont nombreux et les dommages souvent considérables. Parmi les maladies les plus graves nous pouvons citer le charbon (*Ustilago scitaminea*), le mildiou (*Sclerospora sacchari*), la pourriture rouge (*Physalospora tucumanensis*), et la rouille (*Puccinia melanocephala*) dues à des champignons, l'échaudure des feuilles (*Xanthomonas albilineans*), la gommose (*Xanthomonas vascularum*) et le rabougrissement des repousses (*Clavibacter xyli*) provoquées par des bactéries, et enfin la mosaïque (*Marmor sacchari*) et la maladie de Fidji () d'origine virale.

Les ennemis les plus fréquents sont les prédateurs du système racinaire (vers blancs, cigales, termites et nématodes), les lépidoptères foreurs des tiges ou 'borers', les chenilles défoliatrices et les rats.

A la Réunion, du fait d'une sélection variétale stricte éliminant les variétés sensibles aux maladies, ces dernières sont à l'heure actuelle pratiquement inexistantes (Girard et Payet, 1997). En revanche, les ennemis tels que les borers –*Chilo saccchariphagus*- (Goebel, 1999), et surtout le ver blanc -*Hoplochelus*- (Vercambre et al, 1991) provoquent des chutes de rendements canne considérables.

Parmi les adversités abiotiques, le gel et les cyclones peuvent être, suivant les pays, un facteur limitant. Ainsi les cyclones provoquent à la Réunion, une années sur dix, de fortes chutes de rendements et de richesses lorsque les cannes sont déjà hautes.

I.3 Pertinence de modèles de croissance biophysiques et <u>caractéristiques attendues</u>

I.3.1 Pertinence d'un modèle de croissance biophysique

L'expertise permet d'évaluer des sites nouveaux et d'y implanter assez rapidement une culture de canne. Les solutions dégagées sont généralement approximatives, elles demandent à être affinées par d'autres approches.

L'expérimentation permet de mieux ajuster les itinéraires techniques et peut aussi s'appliquer à l'amélioration de la culture de la canne sur les sites plus anciennement mis en culture, où l'expertise a épuisé ses possibilités. Ses résultats sont plus lents à acquérir, particulièrement pour une culture de cycle long, et peuvent devenir extrêmement coûteux avec une culture de grande dimension (photo 1) nécessitant de grandes parcelles (photo 2), la multiplication des conditions rencontrées ou possibles et celle des solutions envisageables.

L'avancement des connaissances sur les différents aspects de la croissance et du développement des plantes cultivées, le développement des moyens informatiques et des outils de mesure ont favorisé ces dernières décennies la construction de modèles de fonctionnement des cultures. Ces modèles, fondés sur l'organisation des connaissances acquises et des résultats expérimentaux, permettent de simuler dans de nombreuses conditions une infinité de choix techniques situées dans la gamme de ceux qui ont servi à les caler. En appliquant ces modèles à de longues séries climatiques, ils autorisent en outre l'évaluation des risques encourus selon les itinéraires techniques envisagés.

Une telle approche paraît bien adaptée :

- à la culture de la canne à sucre, du fait de la relative simplicité de son fonctionnement et du gain de temps et de moyens qu'on peut espérer sur une culture de grande taille et de cycle long ;
- -à la diversité des situations rencontrées, notamment à la Réunion, où cette diversité constitue un atout pour l'ajustement d'un modèle.

Par contre, la lourdeur des mesures biométriques nécessaires à son calage ou à sa validation impose la recherche de procédures adaptées à la canne.

Partant de cette analyse, les partenaires de la filière canne de la Réunion ont chargé le Cirad, dès 1992, de promouvoir sur canne à sucre cette nouvelle approche en testant les modèles disponibles, ou en développant un nouveau modèle, et en réalisant des applications répondant aux préoccupations du développement.



Photo 1. Parcelle de canne à sucre de 18 mois au Kenya.



Photo 2. Essai de dates de récolte au Kenya (superficie 5 ha).

1.3.2 Les modèles de croissance de la canne à sucre en 2002

La modélisation biophysique a commencé dans les années 1970 (Whisler et al. 1986), Sans tenir compte des modèles très empiriques, sur des sites spécifiques, ou des propositions schématiques et conceptuelles de modèles (Bull et Tovey, 1974), la construction des modèles de croissance de la canne à sucre n'a réellement débuté qu'à la fin des années 80. En Australie, le modèle "Auscane" (Jones et al, 1989) a été élaboré à partir du modèle "Epic" (Williams et al. 1984) et comprenait un module de croissance sommaire de type générique. Au Brésil, en 1986, le modèle "Simcana" (Pereira et Machado, 1986) a été construit mais jamais utilisé. En Afrique du Sud (SASEX), un modèle élémentaire "Canesim" avait été initié en 1991 (Inman-Bamber, 1991) puis modifié en un modèle plus complet "Canegro" qui fut intégré, à partir de 1996 (Inman-Bamber et Kiker, 1997), au DSSAT, plateforme de simulation utilisée dans de nombreux pays. En Australie, le CSIRO intégra à la plate-forme de simulation APSIM (McCown et al, 1996) un modèle canne dès 1995 (Robertson et al, 1995; Keating et al, 1999). A partir de 1984 le BSES Australien construisit le modèle "Q-Cane" (Liu et Kingston, 1995; Liu et Bull, 2001). Actuellement, Apsim-Sugarcane et Canegro sont les deux modèles les plus utilisés. Q-Cane, bien que très performant, n'est plus employé (O'Leary, 2000).

Une comparaison récente des 3 modèles (APSIM-Sugarcane, Canegro et Q-Cane) a été réalisée afin de déterminer leurs intérêts et leurs limites en ce qui concerne la simulation du sucre produit (O'Leary,2000). Cette analyse, malgré une description publiée des modèles souvent insuffisante, permet de les comparer sur l'ensemble des processus physiologiques contribuant à la production du sucre. Ces modèles dynamiques ont un schéma global d'élaboration du rendement canne commun qui comprend les processus physiologiques suivants : interception du rayonnement utile incident par l'indice foliaire modélisé à partir essentiellement des températures, puis conversion du rayonnement utile intercepté en biomasse et enfin partition de cette biomasse en ses différentes composantes, dont le sucre. Suivant les modèles, quelques stades physiologiques sont utilisés pour modifier les lois de partition. Bien qu'issus d'un schéma global identique, les 3 modèles sont structurés différemment en termes de concepts et de définition des variables d'état et de flux (O'Leary, 2000). Leur comparaison, réalisée sur les différents processus physiologiques formalisés et l'intégration des bilans hydriques et azotés, est résumée dans le tableau1.

La confrontation de ces 3 modèles sur un même jeu de données n'a pu être réalisée qu'en conditions optimales d'alimentation hydrique et minérale en 1995 (Keating et al, 1995). Les résultats indiquaient que Q-Cane était de loin le plus performant en biomasse aérienne et biomasse de tige. Depuis, aucune analyse des modèles améliorés n'a pu être réalisée sur un jeu de données commun en conditions d'alimentations hydriques contrastées. La comparaison la plus récente (O'Leary,2000), sur des jeux différents, montre une nette amélioration d'APSIM-Sugarcane dont le critère d'évaluation (RMSE) de la matière sèche des tiges est aussi bon que celui de Q-Cane ; ce dernier reste cependant le plus performant en ce qui concerne le sucre simulé.

De cette comparaison et des évolutions récentes des différents modèles, les avantages et les inconvénients de chacun peuvent être dégagés (tableau 1):

Les points forts de Canegro sont, d'une part, sa formalisation de la conversion faisant intervenir la photosynthèse brute, la respiration de croissance et d'entretien, et, d'autre part, son intégration dans la plate-forme DSSAT (Hoogenboom, 2001) très disponible, bien documentée, et donnant accès à un réseau mondial d'utilisateurs. Cependant, la formalisation très empirique et non dynamique du sucre produit était, jusqu'à 2000, peu performante et difficile à adapter en l'état à d'autres conditions (O'Leary,2000). Ce modèle nécessite donc de profondes transformations dont certaines (élaboration du sucre) sont en cours de réalisation (Singels et Bezuidenhout, 2000) et doivent être validées.

Processus	APSIM-Sugar	CANEGRO	Q-CANE		
Références	Keating et al, 1999; O'Leary, 2000	Inman-Bamber, 1991; Singel et Bezuidenhout, 2001: O'Leary, 2000.	Liu et Kingston, 1995; Liu et Bull, 2001; O'Leary, 2000.		
Bilan hydrique	Bilan hydrique d'APSIM (adapté de celui de CERES)	Bilan hydrique de Ceres inclus dans le DDSAT	Bilan hydrique de Ceres en cours d'adaptation		
Bilan azoté	Bilan azoté d'APSIM (peu différent de CERES)	Bilan azoté inclus dans le DSSAT	Bilan azoté de Ceres en cours d'adaptation		
Phénologie	Stades : germination, levée, apparition de tige et floraison	Stades : levée et apparition de tige	Stades : levée et apparition de tige		
Indice foliaire	L'indice foliaire est fonction de la température et du stress hydrique, du statut N des limbes, de la source carbonée, et de la surface massique. Il fait intervenir un nombre de tiges prédéfini par l'utilisateur, la vitesse d'apparition des feuilles et leur surface en fonction du nombre de feuilles apparues. La sénescence dépend de l'âge, de l'interception du stress hydrique et du froid.	L'indice foliaire est fonction de la température et du stress hydrique. Il fait intervenir le tallage, la vitesse d'apparition des feuilles et leur surface en fonction du nombre de feuilles apparues. Les niveaux de source carbonée et l'état azoté de la plante n'ont pour l'instant aucun effet.	L'indice foliaire est calculé à partir de la matière sèche des limbes verts produits et de la surface massique qui varie avec l'âge.		
Interception	Loi de Beer Lambert	Loi de Beer-Lamber	Loi de Beer-Lamber		
Conversion	Utilisation d'une approche globale par le biais d'une efficience de conversion différente entre vierges et repousses. Celle-ci est corrigée par la température, le stress hydrique et le statut azoté des limbes.	Utilisation de la photosynthèse et des respirations de croissance et d'entretien. L'effet du stress hydrique est pris en compte mais pas ceux de la température et de l'azote.	Utilisation de la photosynthèse et des respirations de croissance et d'entretien. Les effets de la température et le stress azotés ont pris en compte.		

Tableau 1. Comparaison des modèles de croissance APSIM-Sugar, CANEGRO et Q-CANE.

Processus	APSIM-Sugar	CANEGRO	Q-CANE
Partition	Partition dynamique de la biomasse aérienne vers les feuilles, la tige et le reste de la canne suivant les stades. La partition de la tige entre structure et	Partition dynamique de la biomasse aérienne vers la tige inclue récemment. La fraction de tige allouée au sucre dépend de la matière sèche de tige formée, de la température et du stress	Partition dynamique, très mécaniste et ordonnée par organe selon la demande (température et stress hydrique). Le saccharose produit par
	sucre s'effectue en fonction de la température, du stress hydrique et du statut azoté des feuilles.	hydrique	la conversion joue le rôle central de source carbonée nécessaire à chaque organe. Le saccharose non utilisé alimente le stock de sucre.
Etat hydrique de la tige	L'accumulation dynamique de l'eau dépend des accumulations en matières sèches de structure et de sucre dans la tige, du temps thermique et du stress hydrique	Relation empirique non dynamique.	Relation empirique non dynamique

- Q-cane (Liu et Bull, 2001), le plus 'mécaniste', a comme atout principal de refléter le mieux possible les mécanismes réels de formation du saccharose et d'utilisation de ce dernier pour les besoins de croissance (structure) et d'entretien (photosynthèse brute, transport et respirations dans chaque organe). Cependant, s'il se montre très performant en conditions irriguées optimales sur des jeux de données restreints, sa validation en situations de stress hydrique important n'a pas été démontrée. Malgré sa complexité et sa difficulté de calage, il est regrettable que sa mise au point ait été ralentie récemment et qu'il ne soit plus utilisé (O'Leary, 2000).
- L'avantage principal d'APSIM-Sugarcane est son intégration dans un ensemble comportant de nombreux modules (eau, azote, évolution de la matière organique du sol et du paillis) et d'autres plantes. Il peut ainsi être utilisé dans des études de rotations ou environnementales. De plus, ses performances se sont récemment améliorées (même pour le sucre) et il comporte une formalisation dynamique de l'état hydrique de la tige très aboutie. Cependant, la documentation publiée est très imprécise (Robertson et al, 1995; Keating et al, 1999) et les contrats d'utilisation très restrictifs sans fourniture du code source font qu'il n'est plus utilisé ailleurs qu'en Australie. De plus, l'emploi d'efficiences de conversion (RUE) différentes pour les cannes plantées et les repousses reste incohérent et inexpliqué, et indiquerait une formalisation imparfaite entre partition des racines et de la biomasse aérienne (O'Leary, 2000).

Les conclusions de O'Leary (O'Leary,2000) montrent que Apsim-Sugarcane et surtout Canegro nécessitent une révision de la partition de la biomasse en sucre, leur principal point faible. Comme pour Q-cane, ces modifications devraient adopter une approche sourcedemande et une formalisation dynamique de la production des différentes composantes de la biomasse totale.

1.3.3 Notre choix de modélisation

Dans un premier temps, le seul modèle disponible - Auscane - a été testé à la Réunion (Bensimon, 1992). Cependant, cette évaluation d'un modèle de croissance très générique et simplifié n'a pas été concluante, du fait de la prise en compte défectueuse de l'effet température, d'une obligation de spécifier des stades très marqués inapplicables à la canne, et d'une partition adaptée aux plantes à croissance déterminée et transposée à la canne. Ce modèle fut d'ailleurs aussi abandonné quelques années plus tard en Australie.

Le programme canne à sucre du Cirad a finalement décidé dès 1993 de construire son propre modèle de croissance de la canne à sucre (Mosicas) à l'aide d'observations réalisées à la Réunion, dans des conditions climatiques et culturales contrastées. Même si, par la suite, d'autres modèles sont apparus (Apsim-Sugarcane, Q-Cane et Canegro), leurs premiers défauts, associés à une disponibilité et une documentation réduites, ont encore renforcé l'intérêt de disposer de notre propre modèle de croissance, en y incorporant au fur et à mesure des modules de bilans hydriques et azotés, de type du modèle de "Ceres" dont le code était facilement disponible et bien documenté.

Afin de répondre rapidement aux problématiques de la Réunion, une priorité a été donnée à la représentation des situations les plus communes dans cette île, en calant le modèle sur la variété R570, cultivée en repousses, sur des cycles inférieurs à 13 mois. Ce choix a également permis certaines simplifications dans la représentation des processus :

- non prise en compte de la floraison et de ses incidences,
- absence de processus de sénescence de tiges usinables,
- pas de représentation de rang du cycle de récolte dans le cycle de culture.

٠

Une attention particulière a été portée à la sensibilité aux facteurs importants présentant une variabilité sur ce site, et notamment la température et le facteur hydrique.

II MATERIEL et METHODES

Cette thèse ayant comme objectif principal de construire un modèle et de le tester, nous présenterons successivement :

- une description du modèle proposé en répertoriant les para mètres à déterminer et les variables d'état du couvert utilisées à cet effet,
- les <u>méthodologies de mesures</u> de ces états, les <u>dispositifs</u> où elles s'insèrent et une validation de la principale méthode présentée,
- les procédures de <u>calage</u> des paramètres selon leur facilité de détermination (directement observables ou non) et de <u>validation</u> du modèle sur un jeu de données indépendant de celui utilisé pour le calage,
- la méthodologie d'analyse de <u>sensibilité</u> du modèle aux variations des paramètres calés ou non,
- l'objectif, le site et les traitements retenus pour l'application du modèle,
- les <u>critères statistiques</u> et <u>outils informatiques</u> utilisés lors des différentes actions citées (calage, validation et analyse de sensibilité).

II.1 Le modèle

Le modèle global est composé de 2 modules dynamiques à pas de temps journalier : un bilan hydrique et un module de croissance. Leurs liaisons et principaux processus sont schématisés dans la figure 18. Le détail des équations, des paramètres à caler (en italique) et des variables d'état nécessaires au calage ainsi que les références utilisées sont décrits dans le tableau 2. L'ensemble des variables d'état et de flux ainsi que les paramètres sont définis dans le glossaire. Dans la suite de la présentation, les variables sont en caractères normaux et les paramètres du modèle sont en italiques.

II.1.1 Module de bilan hydrique

Le bilan hydrique adopté est celui inclus dans le modèle Ceres (Crop Environment Ressources Synthesis), développé dans les années 1980 aux Etats-Unis pour des cultures de maïs (Ceres-Maize, Jones et Kiniry, 1986), puis pour des plantes et des conditions tropicales (DSSAT, Apsim-Sugar, Canegro). Nous utiliserons la version modifiée par Gabrielle et al. (1995).

Nous avons choisi ce module pour les raisons suivantes :

- son type fonctionnel, dynamique et à pas de temps journalier correspond à celui du module de croissance proposé,
- il est inclus dans un modèle dont le code est disponible et qui possède d'autres modules 'sol' très complets pouvant être employés ultérieurement,
- de plus, le modèle Ceres est utilisé au sein d'un réseau international (ICASA) permettant un accès à des bases pédoclimatiques et des paramètres plantes (canne à sucre),
- il fait enfin l'objet d'une littérature importante et est associé à un nombre croissant de cultures.

PROCESSUS	EQUATIONS	REFERENCES	MESURES	PARAMETRES A déterminer
INITIALISATION	Initialisation des variables d'état en début de simulation et des variables de flux chaque jour. Système racinaire (repousse) (1) RIv(i)=384649.* (1/(dep(i)/2+30))^((3.416)	Chopart et Marion, 1994 Ball-Coelho et al, 1992		
BILAN HYDRIQUE				
Calcul des flux de drainage	Calcul des flux de drainage Calcul des pertes par évaporation du sol Calcul des pertes par transpiration Calcul des remontées capillaires Calcul du taux de satisfaction en eau sur la zone racinaire : (2) swdef=asw/awc=(swr-llr)/(dulr-llr)	Jones et Kiniry, 86 Gabrielle et al, 1995	Rr, irr, e0 Dlayr(i), ll(i), dul(i), sat(i), Sw(i)	
CROISSANCE				
Calcul des coefficients de stress hydrique swdf1 et swdf2	 (3) Sh=0.94-0.26*<i>psicr</i>/ep1 (4) Si (swdef<1.5*sh) alors swdf2=swdef/(1.5*sh) sinon swdf2=1 (5) Si (swdef<sh) alors="" sinon="" swdf1="1</li"> </sh)>	Slabbers, 1980 Brisson et al, 1992 Oier-Lafontaine, 1992		psicr
Phénologie	Calcul du temps thermique sdj. tmo=(tempmn+tempmx)/2 (6) dj = tmo – <i>tbase</i> avec dj=0 si dj<0 alors sdj = sdj + dj		Apparitions feuilles Tempmx, tempmn	Tbase
Calcul de l'Indice foliaire	Accroissement de surface foliaire :dlai (7) Si sdj>deblai alors dlai=klaidj*dj*swdf2 sinon dlai=0 (8) Si dlai>dmsl*slaj alors dlai=dmsl*slaj <u>Sénescence de la surface foliaire</u> slai (Si lai>0) (9) Si lai>deblaisent alors slait=klaisent*dj*(lai-deblaisent) (10) slaiw=klaisenw*(1-swdf2)*lai ; slai=maximum(slait,slaiw) (11) Bilan final : lai = lai + dlai – slai	Keating et al ,1999 O'leary, 2000 Inman-Bamber, 1994	Lai	Deblai Klaidj Deblaisent Klaisent Klaisenw
Interception	(12) par=0.5*rg (13) ei =1 – exp(- <i>ke</i> *lai) (14) pari=par*ei	Jones et Kiniry, 1986 Keating et al ,1999 O'leary, 2000	Ei, lai, rg	Ке
Conversion	Calcul du stress dû à la température : ktemp (15) tdiu=0.25*tempmn+0.75*tempmx (16) ktemp=1- <i>ktconv</i> *(tdiu- <i>tconvopt</i>)^2 Calcul de l'accroissement de biomasse totale : dmst (17) dmst= <i>ruemax</i> *pari*swdf1*ktemp ; mst=mst+dmst	Jones et Kiniry, 1986 Keating et al ,1999 O'leary, 2000	Msa	ktconv tconvopt ruemax

TABLEAU 2. Le Modèle: processus, équations, mesures à effectuer et paramètres à déterminer (en italiques).Les définitions des variables et paramètres sont mentionnées dans le glossaire

PROCESSUS	EQUATIONS	REFERENCES	MESURES	PARAMETRES A
Partition de la biomasse totale dmst entre parties racinaires dmsrac et aériennes dmsa	Calcul des biomasses aérienne msa et racinaire msrac <i>debmsa</i> =350 ; <i>kmsadeb</i> =0.6 ; <i>krac</i> =0.1 (18) dmsrac= <i>krac</i> *dmst ; msrac=msrac+dmsrac (19) kmsa= <i>kmsadeb</i> +(1- <i>kmsadeb</i>) *(mst-msrac)/ <i>debmsa</i>	Van Dillewijn, 1960 Inman-Bamber, 1991 Martiné et al, 2000 Smith et al, 1999		krac debmsa kmsadeb
Partition de la biomasse aérienne dmsa vers les limbes dmsl	$\begin{array}{l} (20) \ dmsa=kmsa^{(dmst-dmsrac)}; \ msa=msa+dmsa\\ Mslp=msl \ ; \ slatp=slat\\ (21) \ kmsl = \ kmsl^{1+kmsl^{2}}exp(-kmsl^{3}msa)\\ (22) \ dmsl=kmsl^{*}dmsa \ ; \ msl=msl+dmsl\\ (23) \ slat=\ ksla^{1+ksla^{2}}exp(-ksla^{3}msl)\\ (24) \ slaj=(msl^{*}slat-mslp^{*}slatp)/dmsl\\ \end{array}$	Liu et Bull, 2001	msa, msl, mslv, lai	Kmsl1 , kmsl2 , kmsl3 Ksla1 , ksla2 , ksla3
Partition de la biomasse aérienne dmsa vers les tiges usinables dmstu	 (25) Si msa<debmstu alors="" kmstu="0" sinon<br="">kmstu= kmstu1*(1-exp(-kmstu2*(msa-debmstu))</debmstu> (26) dmstu=kmstu*dmsa mstu=mstu+dmstu 	Keating et al ,1999 Martiné et al, 2001 Liu et Bull, 2001 Singels et Bezuidenhout, 2000.	msa, mstu	Debmstu kmstu1 kmstu2
Partition de biomasse de tiges usinables dmstu entre structures dmstst et saccharose dsucre	Allocation aux structures de la tige usinable : dmstst (27) ktstrua=1-ktstrua1*(1-exp(-ktstrua2*mstu)) (28) Si tmo <tempstru alors="" ktstrut="1" sinon<br="">ktstrut=1+ktstrut1*(tmo-tempstru) (29) ktstruw=(1-(swdf1-swdf2)) (30) ktstru=ktstrua*ktstrut*ktstruw dmstst=ktstru*dmstu et dmstst<dmstu (31) mstst=mstst+dmstst Allocation au sucre (bilan) : dsucre (32) dsucre=dmstu-dmstst ; sucre=sucre+dsucre</dmstu </tempstru>	Keating et al ,1999 Liu et Bull, 2001 Singels et al, 2000 Singels et Bezuidenhout, 2001. Martiné et al, 2001	mstu, sucre	ktstrua1 ktstrua2 tempstru ktstrut1
Etat hydrique des tiges usinables : masse d'eau watstm contenue dans les tiges Calcul du rendement (rdcan) et de la richesse (richcan)	 (33) dstwat=<i>krdw1</i>*dmstu-<i>krdw2</i>*dsucre (34) watstm=watstm + dstwat (35) rdcan=(watstm+mstu)/100 (36) richcan=sucre/rdcan 	Keating et al ,1999 Martiné et Lebret, 2001.	rdcan	krdw1 krdw2



Figure 18. Schéma simplifié décrivant les principaux processus, flux, états et variables de forçage intégrés dans les deux modules de croissance et de bilan hydrique.





Ce bilan hydrique est multicouche et comprend, dans chacune d'elles, un réservoir possédant trois niveaux d'eau caractéristiques (figure 19). Son fonctionnement se décompose en quatre étapes :

- calcul des flux de drainage dus à la gravité, suite aux apports d'eau de pluies et d'irrigation. Afin de simplifier le calcul, les pertes par ruissellement sont négligées et se retrouvent en fait dans le drainage,
- calcul des pertes en eau dues à la demande climatique avec évaporation directe de l'eau de la couche supérieure du sol et transpiration par l'intermédiaire des racines. Le profil de densité racinaire a été considéré comme fixe et déterminé à partir d'un profil racinaire observé sur sol ferralitique (Chopart et Marion, 1994) dont le type est fréquent à la Réunion. Cette hypothèse vient du fait que le modèle fonctionne sur repousses et que, sur ces dernières, le profil est relativement stable au cours du temps (Ball-Coello et al, 1992),
- calcul des remontées capillaires conduisant à un rééquilibrage des potentiels hydriques,
- calcul, sur le profil racinaire, du stock d'eau utile asw, et de la réserve utile awc .

Le bilan hydrique utilise l'indice foliaire lai calculé par le module de croissance et procure à ce dernier la transpiration potentielle ep1 et le taux de satisfaction hydrique swdef compris entre 0 et 1. Ce dernier correspond, sur le profil racinaire, à la fraction d'eau disponible (stock utile) par rapport à la réserve utile (swdef = asw/awc; Ritchie, 1981).

II.1.2 Le Module de croissance

Le module de croissance est organisé selon trois processus de fonctionnement :

- l'interception du rayonnement utile par l'indice foliaire permettant de calculer le rayonnement utile intercepté,
- la conversion de ce dernier en biomasse,
- la partition de cette biomasse en ses différentes composantes : racines, feuilles, tiges et sucre.

D'autres points essentiels de la croissance tels que l'évaluation des coefficients de stress, la phénologie et l'estimation de l'état hydrique des tiges sont inclus dans le module. Le module conceptuel est schématisé sur la figure 20. Les états du couvert inclus dans le modèle (biomasse totale et ses composantes) sont représentés sur la figure 21. Les biomasses, excepté le rendement canne exprimé en matière fraîche (Tha⁻¹), correspondent à des matières sèches (g m⁻²). Les équations sont décrites dans le tableau 2, Les paramètres et variables sont définis dans le glossaire.

Ce module utilise des formulations issues d'autres modèles, dont nous avons choisi les plus pertinentes, économes en paramètres et qui conduisent aux meilleures estimations.

II.1.2.1 Calcul des coefficients de stress hydrique swdf1 et swdf2

Nous avons employé la formalisation décrite par Slabbers (1980) et utilisée par Brisson et al (1992) qui tient compte du taux de satisfaction hydrique swdef, de la transpiration potentielle ep1 et du potentiel foliaire critique *psicr* (équations 3, 4 et 5 du tableau 2). Ce dernier paramètre est de 12 bars (Ozier-Lafontaine, 1992). Swdf1 et swdf2, compris entre 0 (stress maximal) et 1 (pas de stress), seront appliqués à la mise en place et sénescence des surfaces foliaires, à la conversion et à la partition de biomasse de tige usinable entre structures et saccharose.



Figure 20. Modèle conceptuel d'élaboration du saccharose et de la tige usinable. (Diagramme de type Forrester)

➡ Flux de biomasse et d'eau dans la canne

--> Informations

Mariables d'état et stades comprenant les matières sèches totales (mst), aérienne (msa), de tige usinable (mstu), de structure de tige (mstst), de limbes totaux (msl), le saccharose (sucre) et l'eau contenue dans la tige (watstm).



Variables de flux (voir liste des variables)

) Variables endogènes (voir liste des variables)



Les composantes modélisées sont les matières sèches totale (mst), racinaire (msrac), aérienne(msa), de limbes (msl), de tige usinable (mstu), de structures de tige usinable (mstst) et de saccharose (sucre). Les cadres grisés représentent les parties mortes.

Toutes les composantes indiquées sur le schéma sont mesurées à l'exception des biomasse racinaires et de souches. Les biomasses totales et non racinaires ne sont donc pas observées.

La canne en croissance peut être décomposée en tige en croissance (sommet de la tige) et fouet (ensemble de gaines et limbes du sommet dont les gaines et limbes sont en croissance et dont les limbes sont complètements enroulés)

Figure 21. Composantes de la biomasse.

45

II.1.2.2 Phénologie

La canne n'ayant pas de stades très marqués (Lingle, 1999), la partie phénologie du module se réduit essentiellement au calcul quotidien des degrés.jour (dj) et du temps thermique (sdj) qui correspond au cumul des degrés.jour depuis la coupe précédente (équation 6 du tableau 2). La température seuil d'apparition des feuilles (*tbase*) est utilisée pour estimer dj.

Un seul stade exprimé en degrés.jour intervient dans ce module : la levée ou apparition de l'indice foliaire (*deblai*). D'autres stades sont exprimés en fonction des niveaux de couverture ou de biomasse atteints. Le début de sénescence du lai due à l'ombrage (*deblaisent*) est fonction du lai atteint. L'apparition de la matière sèche de tige usinable (*debmstu*) est définie en fonction du niveau de biomasse aérienne produite, formulation adoptée récemment dans Canegro par Singels et al (2000)

II.1.2.3 Calcul de l'indice foliaire

L'interception du rayonnement s'effectuant par les limbes, l'indice foliaire lai doit être préalablement déterminé. La modélisation adoptée du lai est de type global ('big leaf ') sans calculs intermédiaires d'apparition de tiges et de feuilles, dont la surface maximale des limbes dépend de leur numéro d'apparition (Keating et al, 1999, Inman-Bamber, 1991; Martiné, 1996). La formalisation utilisée est en fait basée sur un bilan entre les surface foliaires quotidiennement élaborée dlai et sénescente slai.

- Calcul de l'indice foliaire élaboré quotidiennement (dlai) (équations 7 et 8 du tableau 2) Dlai, élaboré après le stade levée *deblai*, est proportionnel aux degrés.jour dj et au coefficient de stress hydrique swdf2. Cependant, cet accroissement est limité par la ressource en surface disponible correspondant au produit de l'accroissement journalier de matière sèche de limbes (dmsl) et de leur surface spécifique (slaj).
- Calcul de la sénescence quotidienne de l'indice foliaire (slai) (équations 9, 10 du tableau 2) La sénescence intervient dès qu'il y a stress hydrique prononcé et à partir d'un certain niveau d'ombrage. Dans le premier cas, la sénescence (slaiw) dépend du lai et de swdf2. Dans le second cas, la sénescence (slait) n'apparaît que lorsque l'on a dépassé un seuil de lai (*deblaisent*) ; slait est alors fonction de la température et de l'écart entre le lai réel (lai) et *deblaisent*.

Le slai résultant est le maximum de slait et slaiw.

II.1.2.4 Interception des rayonnements

Le rayonnement incident utile à la photosynthèse (par) est supposé égal à la moitié du rayonnement global incident rg (Spitters et al,1981 ; Inman-Bamber, 1991). (équation 12)

L'efficience d'interception ei, qui correspond à la fraction du rayonnement incident intercepté par les feuilles, est déterminée à partir du lai et du coefficient d'extinction *ke* suivant la loi de Beer Lambert également utilisée dans Canegro et Apsim-Sugarcane (Inman-Bamber, 1991; Keating et al, 1999). Le rayonnement utile intercepté pari correspond au produit de par et de ei (équations 13 et 14 du tableau 2).

II.1.2.5 Conversion

La formalisation de la conversion utilisée dans ce module est basée sur le fait qu'il existe une relation étroite entre la biomasse produite et le rayonnement utile intercepté (Monteith 1981 ; Muchow et al 1994) ; elle correspond à celle utilisée dans APSIM-Sugarcane (Keating et al, 1999). Ainsi, l'accroissement journalier de biomasse totale dmst est égal au produit du rayonnement utile intercepté pari par l'efficience maximale de conversion *ruemax* (équation 17 du tableau 2). Cette production potentielle est limitée par les stress hydriques swdf1 et thermique ktemp; la température ayant un effet significatif sur l'efficience de conversion (Martiné et al, 1999).

La formalisation du stress thermique ktemp (équations 15 et 16 du tableau 2), proche de celle adoptée dans Apsim-Sugarcane (Keating et al, 1999), est identique à celle proposée par Kiniry dans Ceres-Maize (Jones et Kiniry ,1986)

II.1.2.6 Partition de la biomasse totale vers les racines et les parties aériennes

Les études sur la composition végétative de la biomasse totale de canne plantée (Van Dillewijn, 1960; Smith et al, 1999) montrent que les racines représentent une fraction décroissante de la biomasse totale au cours du cycle, allant de 50 à 70% en début de cycle pour aboutir entre 9 à 13% de racines à la récolte. En repousse, le système racinaire existant meurt progressivement et est remplacé par un nouveau système (Ball-Coelho et al, 1992) issu des nouvelles tiges. Nous adopterons donc, en repousse, une allocation constante (*krac*=0.1) de la biomasse totale dmst aux racines dmsrac, le reste (0.9) étant alloué à la biomasse non racinaire (équation 18 du tableau 2).

Les cannes étant issues de bourgeons souterrains, au début du cycle, une partie de l'accumulation de biomasse non racinaire (dmst-dmsrac) s'effectue sous terre et représente 2 à 5% de la biomasse totale à la récolte (Van Dillewijn, 1960) Compte tenu des résultats issus de la littérature (Van Dillewijn, 1960) le taux d'allocation *kmsa* de la biomasse non racinaire à la partie aérienne réelle observable (dmsa) peut être assimilé à une fonction croissante de la biomasse non racinaire (mst-msrac) bornée à 1 (équations 19 et 20 du tableau 2). Les paramètres de l'équation permettant de calculer kmsa sont issus des données présentées par Van Dillewijn (1960).

II.1.2.7 Partition de la biomasse aérienne dmsa vers les limbes dmsl

La formation de limbes a lieu dès l'apparition de biomasse aérienne (équations 21 et 22 du tableau 2). La fraction quotidienne (kmsl) de dmsa allouée aux limbes (dmsl) est une fonction asymptotique de la quantité de biomasse aérienne atteinte (msa).

La surface spécifique de l'ensemble des limbes (slat) dépend de la biomasse de limbes produite (msl). La surface spécifique (slaj) des limbes produits quotidiennement est calculée à partir des msl et slat du jour et de la veille (équations 23 et 24 du tableau 2).

II.1.2.8 Partition de la biomasse aérienne dmsa vers les tiges usinables dmstu

La formation de tige usinable a lieu lorsqu'une quantité de biomasse aérienne debmstu a été formée. La fraction kmstu de dmsa allouée à la tige usinable dmstu est une fonction asymptotique de la quantité de biomasse aérienne atteinte msa-debmstu (équations 25 et 26 du tableau 2). Nous avons choisi ce dernier type de fonction (plus réaliste) au lieu des fonctions en escalier habituellement utilisées (Keating et al, 1999). Ainsi, il n'y a pas de

changement brusque de la fraction allouée (Martiné et al, 2000 ; Singels et Bezuidenhout, 2000).

II.1.2.9 Partition de la biomasse de tiges usinables entre structures et saccharose

La production journalière de biomasse de tige usinable (dmstu) est répartie entre les structures dmstst (fibre, sucres réducteurs et matières minérales) et le saccharose dsucre. La fraction réelle ktstru de dmstu allouée aux structures dmstst est le produit de trois coefficients d'allocation ktstrua, ktstrut et ktstruw (équations 27 à 31 du tableau 2) :

- ktstrua est une fonction asymptotique de mstu,
- ktstruw, fonction de l'état hydrique du couvert, correspond à la formalisation récemment introduite dans Canegro (Singels et Bezuidenhout, 2000),
- Le calcul de ktstrut, fonction de la température, est basé sur les observations d'élongation (Liu et al,1998) et d'évolution de richesse (Yates, 1996) qui montrent que la température critique, correspondant au début de l'élongation (structures), se situe autour de 20°C.

dmstst est borné par dmstu et la biomasse dmstu-dmstst non utilisée pour les structures est allouée au saccharose (équation 32 du tableau 2).

II.1.2.10 Etat hydrigue des tiges usinables, rendement et richesse

Les principaux critères de production, le rendement et la richesse, étant respectivement exprimés en poids frais ou en % de ce dernier, la quantité d'eau contenue dans les tiges doit être modélisée.

L'augmentation du poids d'eau dans la tige dwatstm (équation 33 du tableau 2) dépend de la production journalière de tiges dmstu, représentant le contenant, et de celle en saccharose dsucre (Martiné et Lebret, 2001) qui prend progressivement la place de l'eau (Keating et al,1999). Le poids d'eau total (watstm) étant ainsi déterminé, le rendement (rdcan) et la richesse (richcan) peuvent être calculés (équations 34 à 36 du tableau 2).

La sénescence de la biomasse aérienne n'est pas prise en compte dans le modèle car elle n'affecte pas la biomasse de tiges usinables sur des cycles de 12 mois (Muchow et al, 94).

Cette description du modèle de croissance indique les <u>paramètres</u> à déterminer et les <u>états</u> <u>du couvert</u> correspondants à mesurer (tableau 2). Les valeurs de ces paramètres sont soit issues de la littérature, soit évaluées directement à partir des observations avec ou sans l'aide du modèle.

II.2 Dispositifs

L'évaluation des paramètres du modèle nécessite donc de mesurer les états du couvert (tableau 2) et certaines de ces observations (biomasse, interception) requièrent la mise au point de méthodes. Des dispositifs différents et spécifiques aux objectifs visés ont donc été mis en place, leurs caractéristiques sont décrites dans le tableau 3.

De plus, afin de valider le modèle, nous avons utilisé les observations provenant de tests d'irrigations multilocaux (Généré,1985 ;Langellier,1990) indépendants des essais employées pour le calage. Les caractéristiques de ces tests sont présentées dans le tableau 4.

Code	Site	Alti	Période	Trait	Rep	Surf	OB	HU	Dat	Rg	Т	Р
LB93	LB	50	93	1	30	4.5	Α		6	19.4	24.0	1335
CO293	CO	800	93	PI	30	4.5	А		7	13.4	18.8	815
LPSTL	SLE	550	93	PI	30	4.5	А		5	19.8	15.3	1037
LM4CP	LM	80	94-95	1	3	4.5	В		5	19.5	24.1	1245
LPSED1	LP	100	94-95	1	3	4.5	В		4	19.4	23.1	1010
COP2R1	CO	800	94-95	PI	3	4.5	В		5	13.2	18.5	835
COP4570	CO	800	95	Р	3	4.5	В		5	13.2	18.5	835
LPSED3	LP	100	94-95	1	3	4.5	В		3	19.4	23.1	1010
LMBIO1	LM	80	2/01	PI	5	4.5	С		1	19.3	24.0	1150
LMBIO2	LM	80	2/01	PI	10	4.5	C		1	19.3	24.0	1150
LMBIO3	LM	80	1/01	PI	5	3	С		1	19.3	24.0	1150
LMBIO4	LM	80	2/01	PI	7	4.5	C		1	19.3	24.0	1150
COP296	CO	800	08/94-10/95	Р	3	4.5	D		10	13.1	18.6	577
CO457099	CO	800	08/98-09/99	PI	3	7.5	D	Х	7	13.1	18.3	899
BXT1599	BX	550	10/98-10/99	Р	5	9	D	Х	7	17.4	20.5	2797
T199	TI	150	11/98-10/99	1	10	9	D	Х	6	19.7	21.7	593
TI197IRR	TI	150	04/97-03/98	1	5	9	D	X	5	18.2	22.1	497
TI297STR	TI	150	04/97-03/98	PI	5	9	D	X	5	18.2	22.4	497
LPSE195	LP	100	08/94-10/95	1	3	4.5	D		8	19.3	23	910

 Tableau 3.
 Caractéristiques des parcelles d'observations concernant les études méthodologiques et le calage.

Code : code de l'essai

Site BX : Barau ; CO: Colimaçons ; LB: La Bretagne; LM : La Mare ; LP : Ligne Paradis ; TI : Tirano (cf situation sur figure 22).

Alti: Altitude en mètres

Période : Période d'observations mois/année

Rep : Nombre de placettes de mesures (Nombre de tiges pour OB = A)

Surf : Surface des placettes de mesures en m²

OB : Objectif des observations

A : Détermination de la température seuil et de la vitesse d'apparition des feuilles.

B : Détermination du coefficient d'extinction ke

C : Validation de la méthode de mesure indirecte de biomasse

D: Calage des paramètres du modèle

Mesures effectuées :

A : Nombre de feuilles apparues et vertes

B : Indice foliaire lai et efficience d'interception ei

C : Biomasses des composantes de la canne

D : Biomasses des composantes de la canne et lai

HU : Suivi de l'humidité du sol (X : suivi effectué)

Dat : Nombre de dates d'observations du couvert.

Trait : Régime hydrique : P, Pluvial ; PI, Pluvial et irrigué ; I, Irrigué.

Rg : Rayonnement journalier moyen (MJm⁻²) durant la période d'étude

T : Température journalière moyenne (°C) durant la période d'étude

P : Pluie cumulée durant la période d'étude (mm)

No	Parcelle	Site	jas	Rg	Tmo	Р	IRR	No	Parcelle	Site	jas	Rg	Tmo	Р	IRR
1	BEDI1_90	BE	341	18.5	21.6	1143	735	30	LELI2_91	SLE	380	17.5	23.4	582	1497
2	BEDI2_90	BE	339	18.5	21.6	1143	801	31	LELI2_92	SLE	362	18.1	23.1	559	1589
3	BEDI2_93	BE	358	17.9	21.8	1634	263	32	LELI2_93	SLE	365	17.1	23.1	851	1314
4	BEDP1_88	BE	373	18.7	22	712	0	33	LELI3_91	SLE	380	17.5	23.4	582	1627
5	BEDP1_90	BE	339	18.5	21.6	1143	0	34	LELI3_92	SLE	364	18.1	23.1	559	1311
6	BEDP1_91	BE	379	18.4	21.7	758	0	35	LELI3_93	SLE	363	17.1	23.1	851	1015
7	BEDP1_93	BE	358	17.9	21.8	1634	0	36	LELI4_91	SLE	380	17.5	23.4	582	1564
8	BEDP2_90	BE	339	18.5	21.6	1143	0	37	LELI4_92	SLE	361	18.1	23.2	559	1545
9	BEDP2_91	BE	379	18.4	21.7	758	0	38	LELI4_93	SLE	366	17.1	23.1	851	1106
10	BEDP2_92	BE	370	18.8	21.4	1692	0	39	LELT1_91	SLE	380	17.5	23.4	582	1129
11	BEDP2_93	BE	358	17.9	21.8	1634	0	40	LELT1_92	SLE	364	18.1	23.1	559	994
12	BEFI1_90	BE	354	18.2	21.5	1076	626	41	LELT1_93	SLE	362	17.1	23.1	851	606
13	BEFI1_92	BE	366	18.9	21.3	1601	612	42	LELT2_91	SLE	380	17.5	23.4	582	1111
14	BEFI2_90	BE	354	18.2	21.5	1076	434	43	LELT2_93	SLE	364	17.1	23.1	851	391
15	BEFI2_91	BE	372	18.6	21.8	667	603	44	SBDP1_86	SB	364	18	22.7	3376	Ó
16	BEFI2_92	BE	366	18.9	21.3	1601	341	45	SBDP3_86	SB	364	18	22.7	3376	0
17	BEFI2_93	BE	292	17.4	22.2	1627	266	46	SBDP3_87	SB	362	17.9	23.6	5701	0
18	BEFP1_88	BE	364	18.9	21.9	825	0	47	SBFP3_86	SB	362	17.7	22.7	3478	0
19	BEFP1_90	BE	354	18.2	21.5	1076	0	48	SBFP3_88	SB	365	19	23.4	2559	0
20	BEFP1_91	BE	372	18.6	21.8	667	0	49	TBDP3_86	TB	366	13.4	16.1	1332	0
21	BEFP1_92	BE	365	18.9	21.3	1601	0	50	TBDP3_87	TB	364	13.5	17	2491	0
22	BEFP1_93	BE	293	17.4	22.2	1627	0	51	TBFP3_86	ТВ	365	13.8	16.1	1376	0
23	BEFP2_90	BE	354	18.2	21.5	1076	0	52	LPSE1_96	LP	369	18.7	22.7	1328	675
24	BEFP2_91	BE	372	18.6	21.8	667	0	53	LPSE2_95	LP	363	19	23	938	690
25	BEFP2_92	BE	365	18.9	21.3	1601	0	54	LPSE2_96	LP	366	19.1	22.7	1275	605
26	BEFP2_93	BE	293	17.4	22.2	1627	0	55	LPSE3_95	LP	190	19.7	24.6	763	426
27	LELI1_91	SLE	380	17.5	23.4	582	1555	55	LPSE3_95	LP	363	19	22.9	1042	740
28	LELI1_92	SLE	361	18.1	23.2	559	1636	56	LPSE3_96	LP	372	19.1	22.7	1198	712
29	LELI1_93	SLE	364	17.1	23.1	851	1067								

Tableau 4. Caractéristiques des parcelles d'essais utilisées pour la validation.

No : Numéro de la parcelle indiqué sur les figures (***) Parcelle : Nom de la parcelle. Les deux derniers chiffres correspondent à l'année de récolte Site BE : Bérive (285m) ; SLE: Saint Leu (221m) ; SB: Saint Benoit (40m); TB : Trois Bassins (1000m); LP: Ligne Paradis (150m)

TR : Régime hydrique : P, Pluvial ; PI, Pluvial et irrigué ; I, Irrigué.

Rg : Rayonnement journalier moyen (MJm⁻²)

Tmo : Température journalière moyenne (°C)

P : Pluie cumulée durant la période d'étude (mm)

IRR : Irrigation cumulée durant la période d'étude (mm)

Répétitions : 1 répétition par parcelle sauf pour le site LP (4 répétitions)

Les sites comportant des expérimentations ayant servi au calage et à la validation du modèle sont localisés sur la carte de la Réunion représentée en figure 22 et les principales caractéristiques des sols sont présentées dans le tableau 13 de l'annexe 1. Toutes les parcelles observées sont constituées de repousses de R570 dont l'écartement entre lignes est de 1.5m. Les fertilisations moyennes employées (180N-90P2O5-180K2O) sont optimales pour la croissance de la canne à la Réunion.

II.3 Mesures et Observations

II.3.1 Variables climatiques

La totalité des parcelles d'observations est située sur des sites expérimentaux incluant des stations météorologiques automatiques Cimel ou Campbell. Les variables climatiques journalières suivantes ont été utilisées : les températures minimale (tempmn) et maximale (tempmx), les cumuls de rayonnement global incident rg et de pluviométrie rr ; l'évapotranspiration potentielle e0 est calculée en utilisant la formule de Penman-Monteith.

II.3.2 Dimensions des parcelles de suivi

Les études menées par Chabalier et Gay (Gay et al, 1997) sur la variabilité spatiale des composantes du rendement à la récolte montrent qu'en utilisant des placettes supérieures à 3 m linéaires, les coefficients de variation des biomasses se stabilisent. L'ensemble des mesures de biomasse décrites ci-après pour le calage (tableau 2) a donc été réalisé sur des placettes de 3 à 5 mètres linéaires suivant les cas.

II.3.3 Apparition et sénescence des limbes

Ces mesures servent à déterminer essentiellement leur température seuil d'émission correspondant à la température de base (*tbase*) utilisée dans le module. Elles permettent aussi d'évaluer leur vitesse d'apparition et le début de la sénescence.

Sur la partie inférieure de la tige, la canne à sucre porte des feuilles dont l'articulation entre limbe et gaine est visible et, au sommet de la tige, des feuilles (1 à 3) dont l'articulation n'est pas visible. Périodiquement, nous avons donc compté les nombres de limbes apparus et les limbes verts, de la base de la tige jusqu'à la feuille la plus haute portant une articulation visible (Védié, 1993). Cette feuille, appelée feuille TVD (terminal visible dewlap) est marquée à chaque observation.

Ces comptages de nombres de limbes sont effectués toutes les 3 à 6 semaines, selon les conditions thermiques, sur 30 à 40 tiges choisies 1 à 2 mois après coupe. Ces tiges, étiquetées, correspondent à des tiges primaires.





II.3.4 Efficience d'interception du rayonnement

Sur des couverts d'âges différents, les mesures de l'efficience d'interception journalière ei et du lai associé permettent de déterminer le coefficient d'extinction ke (tableau 2)

Comme le montre la figure 23, plusieurs types de rayonnement peuvent être évalués au niveau du couvert. Bien qu'il serait plus judicieux d'employer le rayonnement absorbé et donc de mesurer tous les rayonnements, la plupart des études sur l'efficience d'utilisation de l'énergie (Muchow et al, 1994) et les modèles de croissance de la canne à sucre (Inman-Bamber, 1991; Keating et al, 1999) ne prennent en compte que le rayonnement intercepté. De plus, la complexité et l'hétérogénéité d'un couvert de canne font qu'il est très difficile de mesurer tous ces rayonnements de façon fiable.

Pour toutes ces raisons nous n'avons mesuré que les rayonnements utiles à la photosynthèse incidents (par) et transmis sous la culture (part) qui permettent de calculer le rayonnement utile intercepté pari (par-part).

L'ensemble du dispositif employé est schématisé sur la figure 24 (Martiné, 1995). Une cellule Li-cor type 190SB50 placée au dessus du couvert et dirigée vers le haut mesure le par. Trente cellules SOLEMS type PAR-IR/M, placées sur 6 rampes sous le couvert et dirigées vers le haut, mesurent le part. Une centrale d'acquisition, par l'intermédiaire d'un multiplexeur AM416, scrute toutes les minutes ces cellules et mémorise les rayonnements. L'efficience journalière d'interception ei est calculée de la façon suivante :

ei = \sum (par-part)/ \sum par

II.3.5 Evolution de la biomasse et de l'indice foliaire

La détermination du taux de conversion du rayonnement intercepté en biomasse et des paramètres de partition (tableau 2) impose des mesures de biomasse rapprochées. Avec une méthode complètement destructive, ces mesures nécessitent de très grandes parcelles et une main d'œuvre importante, donc un dispositif lourd et coûteux (Inman-Bamber, 1994; Muchow et al, 1994). Nous avons donc adopté une méthode indirecte peu destructive (Martiné, 1995).

II.3.5.1 Evolution de la biomasse

Durant la croissance, le développement de la biomasse et de ses composantes est étudié sur les mêmes placettes. A chaque date d'observation, les hauteurs de toutes les tiges de ces placettes sont mesurées du sol jusqu'à la dernière articulation visible (HTVD). Puis 4 échantillons de 5 à 10 cannes chacun, et de hauteurs moyennes différentes, sont récoltés en dehors de ces placettes (figure 25 et photo 3).

Sur chaque échantillon, les hauteurs HTVD des tiges sont mesurées et les cannes sont fractionnées (photo 4)en feuilles mortes, limbes verts et gaines vertes (limbes entièrement et partiellement déroulés), tiges en croissance (y compris le fouet), et tiges usinables (figure 21 et photo 5). Sur chaque échantillon, ces différentes composantes sont pesées en frais et en sec (48h à 85°C). Ensuite, les relations entre les hauteurs HTVD moyennes des différentes échantillons et leurs matières sèches aériennes par tige respectives sont établies, puis entre les matières sèches aériennes et les matières sèches des différentes composantes. Connaissant la hauteur de chaque tige sur chaque placette, les relations établies permettent de déterminer les matières sèches de toutes les composantes de la biomasse sur chaque placette.



Figure 23. Différents types de rayonnement pouvant être mesurés au niveau d'un couvert.



Figure 24. Dispositif de mesure de l'efficience journalière d'interception ei.

Figure 25. Organigramme des mesures et calculs de biomasses et indice foliaire par la méthode indirecte.





Photo 3. Quatre échantillons de canne récoltés pour estimer les relations entre hauteur HTVD et les matières sèches des différentes composantes de la biomasse.



Photo 4. Dissection de chaque échantillon et mesure des hauteurs HTVD.



Photo 5. Composantes de la biomasse d'un échantillon de canne.

Les échantillons de tiges usinables, broyés au moyen d'un broyeur Jeffco, produisent de la pulpe dont 500g sont pressés pour obtenir un gâteau et du jus. La fibre est calculée à partir du poids frais du gâteau, et la richesse à partir de la fibre et du pol%jus déterminé par mesures saccharimétriques et polarimétriques sur le jus (Hoarau, 1969). L'ensemble de cette procédure d'échantillonnage, de mesures puis de calcul est schématisé sur la figure 25.

La figure 26, qui présente les relations obtenues entre hauteur / tige et biomasse aérienne / tige obtenues lors de 3 échantillonnages successifs de la parcelle COP296, montre que ces relations sont différentes et évoluent dans le temps ; il est donc nécessaire de déterminer cette relation à chaque date d'observation. La figure 27 présente un exemple de relations obtenues entre biomasse par tige et deux de des composantes de la biomasse lors d'un échantillonnage de la parcelle précédente.

La validation de cette méthode indirecte d'estimation de la biomasse et de ses composantes a été effectuée sur 4 parcelles d'âges différents comportant en tout 25 placettes. La comparaison statistique des biomasses réelles observées et estimées est résumée dans le tableau 5 ci dessous. Il apparaît que la méthode indirecte estime correctement les matières sèches et le rendement canne (corrélations hautement significatives, pentes =1 sans biais significatifs). Les différentes valeurs de rmse permettent d'évaluer la bonne précision de la méthode, les écarts relatifs entre valeurs observées et estimées n'excédent pas 5%.

Tableau 5. Paramètres statistiques établis lors de la comparaison entre variables observées Y et variables estimées X (Y= pente*X + origine). Ces paramètres sont le nombre d'observations (n), le coefficient de détermination (r²), la probabilité p de rejeter le modèle, les intervalles de confiance à 95% de pente et origine, les minimums (mini) et maximums (maxi) des variables observées et la racine carrée des carrés des écarts (rmse) entre résultats observés et estimés. Mini, maxi et rmse sont exprimés en gm⁻² pour les matières sèches aériennes msa, de tiges usinables mstigu et de limbes verts mslv ; les valeurs concernant le rendement canne sont en T ha⁻¹.

Variables	n	r^2	р	pente	origine	mini	maxi	rmse
msa	25	0.998	<0.01	0.984 ± 0.02	17 ± 50	33	9480	94
mstu	20	0.999	< 0.01	1.01 ± 0.02	-36 ± 30	6	7751	52
rdcan	20	0.998	< 0.01	1.01 ± 0.02	-1.6 ± 1.5	0.5	262	2.5
mslv	24	0.985	<0.01	0.95 ± 0.06	17 ± 19	19	580	22

II.3.5.2 Evolution de l'indice foliaire et de la surface massique des limbes

De nombreuses méthodes de détermination du lai (Martiné, 1995), dont celle des photos hémisphériques (Bonhomme et al, 1974), ont été testées à la Réunion en 1993 et 1994. Pour des raisons de mise en œuvre et de fiabilité nous avons retenu la méthode de détermination massale à partir des biomasses de limbes verts.

La méthode indirecte de mesures de biomasse décrite et validée au chapitre précédent (tableau 5) permet de calculer la matière sèche des limbes verts de chaque tige qu'il suffit de multiplier par leur surface massique moyenne pour avoir la surface des limbes verts par tige. Le cumul de ces surfaces à l'ensemble des tiges donne la surface totale de limbes verts de chaque placette et donc son indice foliaire. La surface massique moyenne des limbes verts d'une tige, qui dépend de l'âge des feuilles, peut être reliée à la hauteur HTVD. Cette relation a été établie lors des échantillonnages de 1994 à 1996. A chaque date, sur 2 à 3 cannes, nous avons déterminé la hauteur HTVD, la surface des limbes verts (par photocopie des



Figure 26. Relations entre la matière sèche de biomasse aérienne msa (g/tige) et la hauteur HTVD (cm/tige) lors de trois échantillonnages successifs sur le site de Colimaçons (COP296)



Figure 27. Relations entre les matières sèches de biomasses de tige usinable mstu et de limbes verts mslv, et les matières sèches de biomasse aérienne msa (g/tige). Ces relations correspondent à un échantillonnage effectué sur le site de Colimaçons (COP296)



Figure 28 Relation entre la surface massique (cm²g⁻¹) des limbes verts et la hauteur HTVD (cm/tige). Y = $85\pm6 + 1060\pm300 / (X + 5\pm3)$; n=31,r²=0.9, p<0.01, rse=10.3 cm²g⁻¹

limbes, découpage et pesée), leur matière sèche, et calculé ainsi la surface massique (Surface/Matière sèche en cm²g⁻¹).

L'ensemble de ces échantillonnages a permis d'établir la relation existant entre hauteur HTVD et surface massique. Cette relation, hautement significative, et suffisamment précise, est présentée dans la figure 28 ; elle a été utilisée par la suite à chaque échantillonnage, les opérations de photocopie des limbes, découpage et pesée nécessitant trop de temps et de main d'œuvre.

II.3.6 Caractéristiques hydrodynamiques et évolution de l'humidité du sol

Afin de renseigner les caractéristiques hydrodynamiques de sol, nécessaires au module de bilan hydrique de Ceres, les densités apparentes (méthode des cylindres) et les caractéristiques hydriques (teneur volumique en eau à saturation sat, capacité au champ dul et point de flétrissement II) ont été mesurées sur chaque site tous les 20 cm jusqu'à une profondeur de 1 à 1.2 m selon la profondeur racinaire. Ainsi, sat, dul et II ont été respectivement évaluées sur des profils saturés, après ressuyage et en saison sèche. Les différences entre les teneurs à la capacité au champ et au point de fléchissement ont permis d'estimer la réserve utile (awc) de chaque couche et du profil (Tableau 14, annexe 1). 2 fosses ont été utilisées dans les parcelles Tirano et 3 (Colimaçons, Ligne Paradis) à 5 (Barau) sondages sur les autres sites.

Nous avons effectué de plus des suivis d'humidité volumique sur quelques parcelles (tableau 3) afin d'estimer la fiabilité du bilan hydrique simulé. Des sondes TDR -Time Domain Reflectometry- (Todoroff, 1999) ont été utilisées sur le site de Tirano (2 fosses) et des prélèvements à la tarière (puis séchage à 105°C pendant 72h) sur les autres sites suivis (3 sondages par date à colimaçons et 5 chez Barau).

II.4 Traitement des données

II.4.1 Première étape du calage : estimation directe des paramètres sans l'aide du modèle.

Afin de renseigner les paramètres capables d'être déterminés sans l'aide du modèle, nous étudierons les relations suivantes :

- Relation entre la vitesse d'apparition des feuilles et la température moyenne journalière pour déterminer la température de base *tbase*,
- Cinétiques de biomasse de feuilles mortes et du lai en fonction de l'âge thermique pour évaluer les débuts d'apparition du lai (*deblai*) et de sénescence des feuilles due à l'ombrage (*deblaisent*),
- Relation entre l'efficience d'interception ei et l'indice foliaire afin de déterminer le coefficient d'extinction ke,
- Relations entre la biomasse de tige et la somme des degrés.jour ou la biomasse aérienne produite, pour estimer, d'une part, le stade d'apparition de la biomasse de tige usinable (*debtmstu*) et, d'autre part, la fonction permettant d'évaluer kmstu ,
- Relations entre biomasses aérienne et de limbes et entre lai et biomasse de limbes, afin de formaliser la matière sèche des limbes msl et la surface massique slaj,

 Relation entre les matières sèches de tige usinable et de ses structures afin de déterminer la fonction permettant d'évaluer ktstrua.

II.4.2 Deuxième étape du calage : estimation des paramètres avec l'aide du modèle et de la méthode du recuit simulé.

Les paramètres impossibles à déterminer directement, et certains paramètres estimés lors de la phase précédente, seront calés en utilisant les états du couvert comme variables à optimiser. Ainsi, et tout en respectant l'ordre des processus physiologiques formalisés dans le modèle, nous déterminerons successivement :

- Les paramètres relatifs à la modélisation de l'indice foliaire en comparant lai observés et simulés,
- Les paramètres relatifs à la conversion d'énergie en biomasse en confrontant les matières sèches aériennes observées et simulées,
- Les paramètres relatifs à la partition de la biomasse en comparant sucre produit et matières sèches de tige observés et simulés,
- Les paramètres relatifs au calcul de l'humidité des tiges en comparant les rendements canne observés et simulés.

Les paramètres estimés lors de la phase précédente et recalés par simulation seront définis dans la partie résultats.

La méthode du recuit simulé (Goffe et al, 1994) dont le principe est de minimiser la somme des distances entre résultats observés et simulés, sera employée pour caler ces paramètres. Bien que cette méthode soit plus lente que les méthodes classiques d'optimisation telles que celles du gradient ou du simplex (Nelder et Mead, 1965), nous avons choisi le recuit simulé pour sa robustesse. En effet, contrairement aux autres méthodes qui peuvent produire un ou des optimums locaux, le recuit simulé possède un algorithme d'optimisation global. Ainsi, lorsque les valeurs initiales des paramètres varient d'une optimisation à l'autre, les résultats obtenus grâce au recuit ont toujours un même ordre de grandeur alors que les méthodes du gradient et du simplex peuvent engendrer des valeurs très différentes.

II.4.3 Bilan hydrique

La détermination des coefficients de stress faisant appel au taux de satisfaction hydrique swdef issu du bilan hydrique (tableau 2), nous vérifierons la fiabilité de ce dernier en comparant les stocks utiles observés (asw) et simulés sur les 4 sites où l'humidité du sol a pu être suivie.

II.4.4 Validation du modèle

Lors de la validation, nous utiliserons la richesse ainsi que les rendement canne et sucre mesurés sur des récoltes de tests d'irrigation multilocaux (tableau 4) indépendants des parcelles ayant servi au calage. Les variables d'état observées seront comparés aux mêmes variables simulées en testant leurs écarts à l'aide de critères statistiques appropriés.

II.4.5 Analyse de sensibilité aux paramètres du modèle

L'analyse de sensibilité du modèle aux paramètres indiqués dans la figure 29 sera effectuée en étudiant l'effet de leurs variations sur les variables d'état qui se situent en aval de leur lieu d'action. Les valeurs nominales utilisées sont celles issues du calage. Des pas de 9% et un nombre d'itérations de 9 (4 de part et d'autre de la valeur nominale) ont été employés. La fourchette de variation par rapport à la valeur nominale est donc de ±36%.

La sensibilité du modèle aux paramètres calés sera évaluée sur les parcelles ayant servi au calage. Les résultats obtenus seront représentés sous forme graphique à l'aide des critères statistiques déterminant quantitativement l'effet de la variation des paramètres sur les variables d'état directement impliquées.

II.5 Applications du modèle

Le modèle final ou en cours d'élaboration a été utilisé pour différents objectifs. Ainsi, depuis 1997, des applications préliminaires ont été réalisées pour déterminer les potentialités de la canne à sucre à la Réunion, analyser des productions sur exploitations, estimer des rendements moyens sur bassins canniers, et tester des stratégies de cycles de cultures et d'irrigation. Ces applications sont présentées en annexes 3 et 4, et dans le chapitre III.6.

Afin de compléter les applications sur les potentialités de l'irrigation, nous présenterons une application réalisée dans le cadre de cette thèse. L'objectif de cette étude est d'évaluer la variabilité des rendements canne potentiels (avec et sans contrainte hydrique) sur une région de la Réunion et les gains 'possibles' de rendements par rapport au rendement canne en pluvial,.

La zone choisie, située au Sud-Ouest de l'île entre 0 et 750m d'altitude (figure 22), est cultivée en canne à sucre et partiellement irriguée. Elle dispose, depuis 1994, d'une quantité suffisante de stations pluviométriques (10 stations) et météorologiques complètes (7) bien réparties permettant d'y effectuer des simulations de croissance. Les données climatiques autres que la pluie (température, rayonnement et etp), nécessaires aux simulations au niveau des stations pluviométriques, ont été obtenues par interpolation des données quotidiennes des stations climatiques les plus proches. Ces interpolations (Daly et al, 1994) prennent en compte à la fois les distances entre stations et leurs altitudes.

Sur l'ensemble de ces 17 stations ont été effectuées, d'une part, des simulations sans contraintes hydriques (coefficients de satisfaction hydrique swdf1 et swdf2 égaux à 1), et, d'autre part, des simulations en régime pluvial avec des réserves utiles sur le profil racinaire allant de 40 à 140 mm.

Ces simulations ont été réalisées sur 6 cycles de récolte de 12 mois (1994-1995 à 1999-2000), les récoltes étant effectuées le 1^{er} octobre, date qui correspond au milieu de la période de récolte de cette zone.



Figure 29. Schéma récapitulatif des liaisons entre les paramètres (italiques) du modèle, utilisés pour l'analyse de sensibilité, et les variables d'état simulées (encadrées).

.

II.6 Analyses Statistiques

II.6.1 Calage des paramètres des fonctions spécifiques du modèle

Les analyses qui suivent ne concernent que la première phase de calage durant laquelle des paramètres sont estimés à l'aide de régressions linéaires ou non linéaires, effectuées entre variables explicatives X et expliquées Y observées lors des expérimentations. Afin de quantifier la validité des paramètres ou fonctions estimés, nous avons utilisé les critères statistiques suivants:

- Le coefficient de détermination r² (compris entre 0 et 1) qui indique la part de la variabilité des observations Y expliquée par le modèle (fonction utilisée et paramètres estimés),
- L'écart-type des écarts à la fonction ajustée : rse,
- Le test F de la fonction ajustée ou modèle, dont le résultat sera donné sous forme de probabilité (p>F) : p<0 .01 indique un apport du modèle hautement significatif,
- Les valeurs des paramètres et leur intervalle de confiance à 95%,
- n et df les nombres d'observations et de degrés de liberté (df=n-k), k étant le nombre de paramètres.

II.6.2 Analyse de la capacité prédictive du modèle

Les analyses statistiques présentées ci dessous seront appliquées lors de la deuxième phase de calage (optimisation de paramètres à l'aide du recuit simulé) et lors de la validation. Au cours de ces études nous déterminerons l'association et la coïncidence entre les résultats simulés par le modèle (Ei) et ceux observés (Oi). Plusieurs critères statistiques ont donc été utilisés lors de ces études :

- la moyenne des observations o et l'écart-moyen m entre résultats observés et simulés [∑(Oi-Ei)]/n ,
- le coefficient de corrélation r qui mesure le degré d'association entre les données simulées et mesurées et qui est défini par la formule suivante :
- $r = [\sum(Oi-o)x(Ei-e)] / \{ [\sum(Oi-o)^2]^{1/2} * [\sum(Ei-e)^2]^{1/2} \}$ (o et e étant les moyennes des Oi et Ei).
- Le coefficient de détermination r² dont la signification statistique est déterminée par un test F de variance (Smith et al, 1996) : F=(n-2)*r²/(1- r²) si aucun paramètre n'a été calé et F=(n-k-2)*r²/(1- r²)/(k+1) si k paramètres ont été estimés. La probabilité associée (p>F) permet de tester l'association ; p<0.01 indique une association hautement significative,
- l'écart quadratique moyen rmse (Janssen et Heuberger, 1995) dont la formule est la suivante : rmse = [∑(Ei-Oi)² / n] ^{1/2}. Plus le rmse est petit, plus le modèle est fiable. Nous y associerons l'écart quadratique relatif moyen rrmse qui permet de pondérer le rmse par la moyenne des valeurs observées : rrmse = rmse/o. Cependant, le rrmse doit être utilisé avec précaution en présences de moyennes faibles, dues à valeurs observées proches de 0 (Smith et al, 1996).
- le rapport lofit/sse, lofit (Lack of fit Statistic) étant l'erreur systématique due au modèle (lofit=rss-sse) avec rss=∑(Oi-Ei)² et sse=∑(variances sur les données observées). Lofit/sse peut être utilisé lorsque chaque résultat observé est une moyenne (cas des parcelles utilisées lors du calage à l'aide du recuit simulé); nous pouvons alors

comparer la variance de l'erreur du modèle à celle de l'erreur expérimentale. L'hypothèse lofit>sse (l'erreur du modèle est plus importante que l'erreur expérimentale) est vérifiée par un test F sur le rapport lofit/sse qui suit une distribution de Student à (n-k-1) degrés de liberté. Si le rapport n'est pas significativement supérieur à 1, le modèle n'est pas rejeté.

Bien que la régression ne soit pas très adaptée à la comparaison entre résultats observés et simulés (Mitchell, 1997) nous indiquerons néanmoins, comme beaucoup d'autres auteurs, la pente (pente) et l'ordonnée à l'origine (origine) de la droite de régression entre résultats observés et estimés. La pente et l'ordonnée à l'origine devant être proches respectivement de 1 et 0; les critères pente et origine sont présentés avec leur intervalle de confiance à 95%.

II.6.3 Analyse de sensibilité

Les critères statistiques utilisés pour caractériser la sensibilité du modèle aux variations de paramètres (Hamby, 1994; Janssen, 1994) sont le coefficient de variation (cv) et l'écart relatif (er):

- Le coefficient de variation, exprimé en %, a pour formule cv = 100 * $[\Sigma(Ei-e)^2]^{1/2}$ / e où Ei sont les résultats simulés par le modèle pour les différentes valeurs d'un paramètres et e le résultat simulé pour la valeur nominale de ce même paramètre. Cet indice de dispersion relative, indépendant des unités de mesure, permet de comparer les sensibilités du modèle à des paramètres différents mais cesse d'être efficace quand e tend vers 0. Les critères utilisés pour classer les paramètres sont :

0-5%pas de sensibilité du modèle5-10%peu de sensibilité du modèle10-20%sensible>20%très sensible

- L'écart relatif a pour formule er = (Amplitude (Ei))/e avec Amplitude(Ei)=Ei_{max}-Ei_{min}. L'écart relatif indique l'amplitude de la réponse par rapport à celle imposée sur le paramètre. Le modèle sera jugé sensible si er est supérieur ou égal à 40%.

II.7 Outils de simulation et d'analyse statistique

Les simulations ont été réalisées à l'aide de la plate-forme de simulation SIMULEX (Martiné et al, 2001). Cette plate-forme, développée en Visual Basic, permet de gérer les données d'entrées (climat, sol, itinéraires techniques) inclues dans une base de données Access, de lancer des simulations à l'aide de modèles en Visual Basic ou en Fortran, de réaliser des analyses de sensibilité et d'effectuer des calages (Annexe 5).

Le module de croissance présenté dans ce chapitre (Mosicas) a été écrit en Fortran 90, puis lié au modèle de bilan hydrique issu de Ceres et à la procédure d'optimisation (recuit simulé) déjà codés dans le même langage.

Les analyses statistiques sur les données observées et les résultats de simulation ont été effectuées avec le logiciel S-Plus.

III RESULTATS

III.1 Calage du modèle : détermination directe des paramètres

Ce calage a été effectué à partir des observations réalisées sur les parcelles décrites dans le tableau 3 (objets A, B et D) sans employer le modèle, et le recuit simulé pour estimer les paramètres. Les relations sont présentées dans une série de figures, accompagnées en légende des équations et critères statistiques habituels. Le texte ne les reprendra pas en détail. Les exigences de ' prédictivité' d'une relation retenue dans un modèle, sans être normalisées, sont généralement bien supérieures aux seuils des critères de significativité habituellement requis en biométrie (p = 0.05 ou p = 0.01). Toutes les relations retenues doivent être de toute façon hautement significatives.

III.1.1 Température seuil de développement

En 1993 (Védié, 1993), sur trois sites thermiquement contrastés, plusieurs comptages de limbes totaux ont été réalisés sur les mêmes tiges (tableau 3 objet A). Sur chaque site, entre deux dates d'échantillonnage, la température moyenne journalière ainsi que le nombre moyen de limbes apparus par tige et par jour (vitesse d'apparition des limbes) ont été calculés.

La figure 30 représente la vitesse d'apparition des limbes en fonction de la température moyenne journalière. La relation entre ces deux caractéristiques est linéaire entre 15 et 26°C. L'intersection de la droite de régression avec l'axe des abscisses donne la température seuil d'apparition des limbes *tbase* qui, pour la R570, est de 12.04 (0.159/0.0132).

La détermination de cette température suppose que la relation est extrapolable jusqu'à 12 °C (Bonhomme, 2000). Cette hypothèse ne pouvant être actuellement vérifiée, compte tenu du manque d'observations disponibles en dessous de 15°C, "il se pourrait que" la température seuil réelle soit inférieure à 12°C. Nous avons pu vérifier *a posteriori* que les températures moyennes journalières ayant servi au calcul de la température moyenne entre deux dates n'étaient généralement pas inférieures à la température seuil trouvée 12°C, les quelques cas observés n'étant pas de nature à avoir biaisé l'ajustement.

Cette température se situe dans la gamme des températures seuil mentionnées dans la littérature 7 °C à 12 °C (Ono et Nakanichi, 1983 ; Inman-Bamber, 1994 ; Campbell et al, 1998).

Paramètre estimé : tbase = 12°C.

65







Figure 31. Relation entre l'allocation de biomasse aérienne dmsa aux limbes totaux dmsl (dmsl/dmsa) et la biomasse aérienne msa (gm⁻²). Y= $0.173\pm0.03 + 0.394\pm0.07 * exp(-0.00036*msa)$; n=25, r²=0.86, p<0.01, rse=0.04. (équation 21 du tableau 2)



Figure 32. Relations entre les matières sèches de limbes totaux msl et de limbes morts mslm (gm⁻²) et la somme des degrés.jour sdj depuis la coupe précédente. Y = $0.277\pm0.04X - 320\pm100$; n=30, r²=0.86, p<0.01, rse=70.
III.1. 2 Partition de la biomasse aérienne en biomasse de limbes

A partir des mesures de biomasses aériennes msa et de limbes totaux msl, à deux dates successives (1 et 2), nous avons calculé :

- La biomasse moyenne msam [= (msa1+msa2)/2],
- Les croissances journalières dmsa (=(msa2-msa1)/(date2-date1)) et dmsl (=(msl2-msl1)/(date2-date1)),
- Le taux d'allocation de biomasse aérienne aux limbes dmsl/dmsa.

La figure 31 représente ce taux d'allocation en fonction de msam. L'allocation de la biomasse aérienne aux limbes décroît asymptotiquement de 57% à 17%.

Paramètres estimés :

Kmsl1=0.17; kmsl2=0.394; kmsl3=0.00036

III.1.3 Paramètres de calcul de l'indice foliaire

Les paramètres seront estimés approximativement dans un premier temps, et affinés dans la partie III.2 à l'aide de l'optimisation par le recuit simulé. La température seuil permet de calculer l'âge thermique de la culture sdj (Tableau 2, phénologie), calculé depuis la coupe précédente.

La figure 32 représente les masses de limbes totaux msl et morts mslm en fonction de sdj. La relation entre mslm et sdj prévoit un début de sénescence vers 1200 degrés-jour.

La pente de cette droite de régression, 0.277 gm⁻²(degrés-jour)⁻¹, correspond au taux de mortalité pondérale des limbes.

La figure 33 représente l'évolution du lai en fonction de sdj tant que la masse de limbes morts paraît négligeable, soit jusqu'à 1500 degrés-jour :

- l'indice foliaire apparaît vers 200 degrés-jour (deblai)
- entre 600 et 1500 degrés-jour, la relation est linéaire, avec une pente de 0.005 degrés-jour⁻¹ (klaidj).
- entre 200 et 600 degrés-jour, la vitesse de croissance du lai semble inférieure.
 L'accroissement est limité par la ressource en surface disponible (tableau 2 et chapitre II.1.2.3).

Compte tenu de l'équation de la droite de régression du lai en fonction de sdj, le début de sénescence (1200 degrés-jour, figure 33) correspond à un lai de 3.5 (*deblaisent*) ; un calcul à partir des paramètres d'APSIM donne une valeur comparable de 3.8 (Keating et al, 1999).

Première estimation des paramètres : $Deblai \cong 200 \text{ degrés-jour}$ $Klaidj = 0.005^{\circ} \text{ degrés-jour}^{-1}$

Deblaisent = 3.5 klaisent. = 0.277 gm⁻² degrés-jour⁻¹

III.1.4 Surface spécifique des limbes

La figure 34 représente la surface spécifique moyenne des limbes verts en fonction de leur masse par unité de surface mslv. La relation est asymptotique et la surface spécifique évolue de 140 à 92.3 cm²g⁻¹. A partir d'un lai de 3.5, stade de début sénescence par ombrage,



Figure 33. Relation entre le lai observé durant la mise en place de ce dernier et la somme des degrés.jour sdj depuis la coupe précédente. Y= $0.005\pm0.0006X-2.3\pm0.6$; n=20, r²=0.94, p<0.01, rse=0.34.



Figure 34. Relation entre la surface massique des limbes verts sla (cm^2g^{-1}) et la matière sèche de ces derniers mslv (gm^{-2}) à l'échelle du couvert. Y= 92.3±0.03 + 47.2±4.5 * exp(-0.0035±0.0075 * X); n=30, r²=0.954, p<0.01, rse=2.5. (Equation 23 du tableau 2)



Figure 35. Relation entre l'efficience d'interception ei et le lai. Y=1-exp(- $0.482\pm0.03X$); n=23, r²=0.98, p<0.01, rse=0.04. (Equation 13 du tableau 2))

la surface massique des limbes peut être considérée comme stable et de l'ordre de 92 cm² g⁻¹. La sénescence pondérale de 0.277 gm⁻²(degrés-jour)⁻¹ (III.1.3) correspondra donc a une sénescence de lai de 2.56 10⁻³ degrés-jour⁻¹.

Paramètres estimés : *Klaisent*=2.56 10⁻³ degrés-jour⁻¹ *Ksla1*=92.3; *ksla2*=47.2; *ksla3*=0.0035

III.1.5 Coefficient d'extinction du rayonnement incident

Plusieurs couples de mesures simultanées d'efficience d'interception et de lai ont été effectués sur des sites et à des âges différents (Tableau 3, objectif de mesure B). L'efficience d'interception observée ei en fonction du lai observé est représentée sur la figure 35. La relation correspond à une loi de Beer-Lambert avec un coefficient d'extinction de 0.482±0.03. Cette valeur est comprise entre celles présentées par Muchow et al en 1994 sur Q96 (0.38) et Inman-Bamber en 1994 sur NCO376 (0.58).

Paramètre estimé : *ke* = 0.48

III.1.6 Partition de la biomasse aérienne en biomasse de tiges usinables

Les suivis de l'évolution des biomasses aériennes msa et de tiges usinables mstu permettent, entre deux dates d'échantillonnage, de déterminer le taux d'allocation de la biomasse aérienne aux tiges usinables (dmstu/dmsa) et la biomasse aérienne moyenne des deux msa mesurées.

La figure 36 représente ce taux d'allocation en fonction du niveau de biomasse aérienne. La relation, de type asymptotique, montre que l'apparition de tige usinable a lieu lorsque 425 gm⁻² de msa sont formés et que, à partir de ce stade, le taux d'allocation croît asymptotiquement vers 0.75 g.g⁻¹. Cette dernière valeur correspond à celle trouvée sur R570 par Cheeroo-Nayamuth et al (2000) à l'île Maurice, et par Martiné et al (1999), lors d'une précédente étude menée à la Réunion.

Paramètres estimés : $Debmstu = 425 \text{ gm}^{-2}; \quad kmstu1 = 0.75; \quad kmstu2 = 4 \cdot 10^{-3}$

III.1.7 Partition de la biomasse de tige usinable en structures et réserves

Les suivis de l'évolution des biomasses de tiges usinables mstu et de structures de ces tiges mstst, après analyse de leur richesse richcan, permettent, entre deux dates d'échantillonnage, de déterminer le taux d'allocation de la biomasse de tiges usinables à ses structures (dmstst/dmstu) et la biomasse moyenne des deux mstu mesurées.

La figure 37 représente la relation entre ces deux paramètres. La part allouée aux structures tend à diminuer avec l'accumulation de biomasse de tiges usinables. Toutefois, cette tendance est relativement peu précise, et l'une des parcelles (TI297STR) n'entre pas dans ce schéma. Elle provient d'un essai d'irrigation dont les résultats sont isolés dans la figure



Figure 36. Relation entre l'allocation journalière de biomasse aérienne dmsa à la tige usinable dmstu (dmstu/dmsa) et la biomasse aérienne msa (gm⁻²). (Equation 25 du tableau 2) $Y=0.75\pm0.05^{*}(1-\exp(-1.25\ 10^{-3}\pm0.6\ 10^{-3}\ (X-425\pm92))); n=15, r^{2}=0.97, p<0.01, rse=0.02.$



Figure 37. Relation entre l'allocation journalière de tige usinable dmstu à ses structures dmstst (dmstst/dmstu) et la biomasse de tige usinable mstu (gm⁻²). (Equation 27 du tableau 2) $Y=1-0.57\pm0.06^{*}(1-exp(-0.002\pm0.0007^{*}X); n=19, r^{2}=0.82, p<0.01, rse=0.07.$



Figure 38. Relation entre l'allocation journalière de tige usinable dmstu à ses structures dmstst (dmstst/dmstu) et la biomasse de tige usinable mstu (gm⁻²) sur deux parcelles TI197IRR irriguée et TI297STR non irriguée entre 120 et 180 jours après coupe (cadre hachuré).

38. Le traitement non irrigué a subi une contrainte hydrique marquée (swdef descendant à 0.2 pour le 3^{ème} point)., ce qui conduit à une chute considérable du taux d'allocation de croissance aux structures. Avec la disparition de la contrainte (4^{ème} point), ce taux d'allocation croît au delà de celui du témoin irrigué. Ceci amène différentes remarques :

- la précision de la relation Y x X se montre, dans ce cas, très inférieure à celle des relations précédentes. Ceci peut être rapproché de la part plus grande de réserves et moins grande de structure dans la définition des variables X et Y,
- l'effet de la contrainte hydrique peut s'expliquer par une restriction plus forte de la croissance que de la photosynthèse (Hsiao, 1973; Lingle, 1999), ce qui diminue la part des structures dans la biomasse formée. En même temps, avec une multiplication de cellules sans élongation et une accumulation de réserves, l'épisode de stress peut préparer un potentiel de croissance supplémentaire qui s'exprimerait une fois la contrainte levée,
- l'effet des conditions environnementales sur le taux d'allocation, qui se superpose à la relation tendancielle de celui-ci dans la figure 37, rend moins étroite cette relation et peut la masquer dans certains cas extrêmes (figure 38). Nous sommes donc conduits à les éliminer pour la mettre en évidence.

En enlevant le traitement comportant un stress hydrique important, la figure 37 montre que la relation entre taux d'allocation et biomasse de tige usinable formée est asymptotique, et que le taux d'allocation aux structures décroît asymptotiquement de 1 vers 0.43.

Si l'imprécision observée ici tient bien à l'importance des réserves dans le calcul des variables étudiées, nous pouvons faire l'hypothèse que ces réserves entachent aussi d'imprécision les relations précédemment présentées, particulièrement à des stades avancés de la croissance de la canne. Les valeurs des paramètres tirées de ces relations peuvent donc être relativement imprécises. La formalisation ultérieure de l'effet des variables environnementales (hydrique, thermique...) pour compléter le modèle, et l'application à ce modèle de la procédure d'optimisation (recuit simulé) lors du calage des paramètres, devrait permettre d'affiner leur valeur.

Très peu d'études ont été réalisées sur l'effet d'un stress sur l'allocation de la biomasse aux structures. La comparaison récente de différents modèles de croissance de la canne à sucre, effectuée par O'Leary (O'Leary, 2000), fait ressortir la nécessité de telles études pour améliorer l'estimation du sucre par les modèles.

Paramètres estimés :

ktstrua1=0.57 ; ktstrua2=0.002

III.1.8 Biomasse morte

Le début de la sénescence observable correspond au début de l'apparition de tige usinable. Les suivis d'évolution de biomasse montrent qu'à la récolte, environ 20% de la biomasse aérienne est constituée de matière sèche morte. Cependant, les tiges usinables mortes ne participent que pour 0.5% à cette mortalité, soit 1% de ces tiges usinables. La sénescence de celles-ci est donc négligeable dans le cas de cycles de 12 à 14 mois et en conditions de stress hydrigues importants mais non prolongés.

Dans un premier temps, l'évolution de la biomasse morte ne sera donc pas modélisée.

III.2 Calage du modèle : optimisation à l'aide de la méthode du recuit simulé

Le calage qui suit à été réalisé sur les paramètres non estimés précédemment, ou comportant une imprécision importante, ou divergeant des valeurs données par la littérature sur la même variété. Les jeux de données observées issues des parcelles décrites sur le tableau 3 (objets D) ont été utilisés et sont les mêmes que ceux employés dans la phase précédente. Les valeurs des paramètres estimés dans le chapitre précédent ont servi de valeurs initiales à cette seconde optimisation.

Comme pour les déterminations du précédent chapitre, les optimisations à l'aide du recuit simulé ont été effectuées chronologiquement sur les paramètres influant la modélisation de l'indice foliaire, la conversion, la partition et enfin l'humidité des tiges.

La modélisation de l'indice foliaire dépendant de la masse de limbes, directement liée à la matière sèche aérienne, plusieurs optimisations successives ('allers-retours') des paramètres influant sur l'indice foliaire et la conversion ont été nécessaires.

Les paramètres et les indicateurs statistiques déterminés lors de chaque calage sont indiqués dans le tableau 6. Les valeurs définitives des paramètres du modèle de croissance sont présentées dans le tableau 7.

III.2.1 Dynamique de l'indice foliaire

Les paramètres *deblai*, *klaidj* et *ksenlait* ont été recalés et le paramètre *ksenlaiw* calé pour la première fois en utilisant l'indice foliaire comme variable de calage. Les comparaisons entre indices foliaires observés et simulés, par parcelle, sont présentées sur les graphes A à G de la figure 39 et pour l'ensemble des parcelles sur le graphe 'H : Ensemble des sites' de la même figure.

On note généralement une bonne coïncidence entre lai observés et simulés dans le début de cycle jusqu'à un lai de 4. La fiabilité du modèle durant cette première phase est importante car l'efficience d'interception ei, et la demande climatique pour la plante ep, sont sensibles au lai dans cette gamme de valeurs du lai, et peu sensibles au delà. Le fait de moins bien simuler le lai au delà de 4 a donc une effet moindre sur le fonctionnement ultérieur de la plante.

La coïncidence moins bonne au delà d'un lai de 4 peut être attribuée à une prise en compte actuelle encore non satisfaisante de la sénescence due à l'ombrage et à la température. Cependant, comme le montre le graphe de la parcelle TI297STR, le ralentissement de la croissance et la sénescence due au stress hydrique sont bien simulés ; la reprise après remise en eau l'est moins.

Les critères statistiques mentionnés dans le tableau 6 dans la colonne lai montrent que, malgré ces divergences visuelles entre résultats simulés et observés, il existe une association hautement significative entre observations et simulations (r^2 =0.892, p<0.01). Leur coïncidence est moyenne (rmse=0.76) et le rapport lofit/sse n'est pas significativement supérieur à 1.

Critères	Variables d'états optimisées						
statistiques	lai	msa	Mstu	sucre	Rdcan	Richesse	
N	53	45	40	35	41	34	
dl	48	41	37	39	38	33	
mo	4.40	2043	1020	476	47.2	7.35	
М	0.018	87.3	53.6	-29	-0.66	-1.02	
R	0.944	0.984	0.975	0.970	0.983	0.93	
r ²	0.893	0.968	0.950	0.941	0.967	0.865	
Р	2.01	2.02	2.03	2.03	2.02	2.02	
rmse	0.72	290	212	142	7.4	2.02	
rrmse	16.3	14.2	20.8	29.8	15.7	27.4	
rss	27.5	3.78 10 ⁶	1.8 10 ⁶	7.8 10 ⁵	2256	138.3	
lofit	5.45	-4.5 10 ⁶	-7.5 10 ⁵	2.16 10 ⁵	-2180		
lofit/sse	0.235	-0.54	-0.29	0.45	-0.42		
Seuil p=0.05	1.578	1.64	1.73	1.72	1.73		
pente	0.9±0.1	1.01±0.06	1.01±0.07	1.02±0.08	0.99±0.06	0.95±0.13	
origine	0.46±0.47	60±140	45±100	-42±65	-0.3±3.8	-0.6±1.2	
Paramètres calés	Deblai,Ksenlaiw Ksenlait, Klaidj	Ruemax Ktconv Tconvopt	Debmstu Kmstu2:	Ktstrut 1 Ktstrua1 Ktstrua2	Krdw1 Krdw2		

Tableau 6. Paramètres et critères statistiques déterminés après calage des états du couvertpar la méthode du recuit simulé. Les paramètres et variables d'états sont définis dans leglossaire et les paramètres statistiques au chapitre II.6.

Tableau 7. Valeurs et intervalles de confiance des paramètres du modèle de croissance.

Processus	Paramètre	Valeur
Age thermique	Tbase	12 ± 2
Conversion	Ktconv	$1.5 \ 10^{-3} \pm 0.3 \ 10^{-3}$
Conversion	Ruemax	3.1 ± 0.5
Conversion	Tconvopt	30 ± 3
Humidité	Krdw1	12.2 ± 2
Humidité	Krdw2	17.5 ± 2.5
Interception	Ke	0.48 ± 0.43
Lai	Deblai	100 ± 50
Lai	Debsenlai	3.5 ± 0.5
Lai	Klaidj	0.01 ± 0.005
Lai	Ksenlait	$1.4\ 10^{-3} \pm 0.3\ 10^{-3}$
Lai	Ksenlaiw	0.03 ± 0.01
Partition aérien / limbes	Kmsl1	0.17 ± 0.03
Partition aérien / limbes	Kmsl2	0.39 ± 0.07
Partition aérien / limbes	Kmsl3	$0.85 10^{-3} \pm 0.36 10^{-3}$
Partition aérien / limbes	Ksla1	92.3 ± 0.3
Partition aérien / limbes	Ksla2	47 ± 4.5
Partition aérien / limbes	Ksla3	$3.5 \ 10^{-3} \pm 0.5 \ 10^{-3}$
Partition aérien / tige usinable	Debmstu	500 ± 95
Partition aérien / tige usinable	Kmstu1	0.75 ± 0.05
Partition aérien / tige usinable	Kmstu2	$1.2 \ 10^{-3} \pm 0.2 \ 10^{-3}$
Partition tige usinable / sucre	Ktstrut1	0.03 ± 0.01
Partition tige usinable / sucre	Ktstrua1	0.59 ± 0.06
Partition tige usinable / sucre	Ktstrua2	$6\ 10^{-3} \pm 5\ 10^{-3}$
Partition tige usinable / sucre	Tempstru	20 ± 2
Partition total / aérien	Debmsa	500
Partition total / aérien	Kmsadeb	0.7
Partition total / aérien	Krac	0.1
Stress hydrique	psicr	12 !



Figure 39. Comparaison des dynamiques de lai simulés et observés sur les sept sites ayant servi au calage (X : âge en jours et Y : lai) ; les barres d'erreurs représentent un écart-type. Sur le graphe H, la ligne en trait plein correspond à la bissectrice et la ligne en pointillés représente la droite de régression entre lai observés et simulés.

.

74

III.2.2 Dynamique des matières sèches aériennes et évaluation de l'efficience de conversion

Les paramètres *ruemax, ktconv et tconvopt*, non encore estimés, ont été ajustés en utilisant la matière sèche aérienne comme variable de calage. Les comparaisons entre matières sèches aériennes observées et simulées par parcelle sont présentées sur les graphes A à G de la figure 40 et pour l'ensemble des parcelles sur le graphe 'H : Ensemble des sites' de la même figure.

Les critères statistiques du tableau 6, concernant le calage de msa, indiquent une association hautement significative entre msa observées et simulées (r²=0.968, p<0.01). Leur coïncidence est très satisfaisante (rmse=290 et rrmse=14.2) et le rapport lofit/sse n'est pas significativement supérieur à 1.

L'efficience de conversion *Ruemax* trouvée est de 3.06 gMJ⁻¹, elle correspond à une efficience de conversion en biomasse du rayonnement <u>utile</u> intercepté. Bien qu'il soit difficile de faire des comparaisons directes avec des RUE évaluées par rapport au rayonnement global (Bonhomme, 2000) comme celles de 1.65 gMJ⁻¹ global employée dans Apsim-Sugarcane (Keating et al, 1999) sur d'autres variétés, l'ordre de grandeur est comparable en supposant un rapport voisin de 2 pour passer d'une grandeur à l'autre.

III.2.3 Partition de la matière sèche aérienne et dynamique de la matière sèche des tiges usinables.

Les paramètres *kmstua2* et *debmstu* ont été calculés en utilisant la matière sèche de tiges usinables comme variable de calage. Les comparaisons entre matières sèches de tiges usinables mstu observées et simulées, par parcelle, sont présentées sur les graphes A à G de la figure 41 et pour l'ensemble des parcelles sur le graphe 'H : Ensemble des sites' de la même figure.

L'examen des graphes montre une concordance très satisfaisante entre mstu observées et simulées avec cependant un légère sous estimation de mstu par le modèle en conditions froides d'altitudes (CO457099 et COP2_96)

L'analyse statistique de ces comparaisons (tableau 6) indique une association hautement significative entre mstu observées et simulées ($r^2=0.95$ et p<0.01). La coïncidence globale est très bonne (rmse=212 et rrmse=20.8) et le rapport lofit/sse est très inférieur à 1.

III.2.4 Partition de la matière sèche de tiges usinables : rendement sucre

Les paramètres ktstrua1 et ktstrua2 ont été recalés et le paramètre ktstrut1 calé pour la première fois en utilisant le sucre produit comme variable de calage. Les comparaisons entre biomasses de sucre observées et simulées, par parcelle, sont présentées sur les graphes A à G de la figure 42 et pour l'ensemble des parcelles sur le graphe 'H : Ensemble des sites' de la même figure.



Figure 40. Comparaison des dynamiques des matières sèches aériennes (msa) simulées et observées sur les sept sites ayant servi au calage (X : âge en jours et Y : msa en gm⁻²); les barres d'erreurs représentent un écart-type. Sur le graphe H, la ligne en trait plein correspond à la bissectrice et la ligne en pointillés représente la droite de régression entre msa observées et simulées.

76



Figure 41. Comparaison des dynamiques des matières sèches de tiges usinables (mstu) simulées et observées sur les sept sites ayant servi au calage (X : âge en jours et Y : mstu en gm⁻²); les barres d'erreurs représentent un écart-type. Sur le graphe H, la ligne en trait plein correspond à la bissectrice et la ligne en pointillés représente la droite de régression entre mstu observées et simulées.

77



Figure 42. Comparaison des dynamiques de rendement sucre produit simulées et observées sur les sept sites ayant servi au calage (X : âge en jours et Y : sucre produit en gm⁻²); les barres d'erreurs représentent un écart-type. Sur le graphe H, la ligne en trait plein correspond à la bissectrice et la ligne en pointillés représente la droite de régression entre lai observés et simulés.

Nous notons – figure 42 - une concordance très satisfaisante entre rendements sucre observés et simulés avec cependant une sous-estimation de sucre par le modèle sur la parcelle LPSE1_95 et surestimation sur le site de Tirano.

Le tableau 6 indique une association hautement significative entre rendement sucre observés et simulés (r^2 =0.941 et p<0.01). La coïncidence globale est bonne (rmse=142 et rrmse=29.8) et le rapport lofit/sse n'est pas significativement supérieur à 1. A noter néanmoins une légère diminution de l'efficacité du modèle à simuler msa, puis mstu et enfin sucre puisque les r² diminuent de 0.968 à 0.941.

La valeur trouvée pour le paramètre ktstrua1 (0.59 gg⁻¹) indique que l'allocation de biomasse de tige usinable à ses structures décroît progressivement de 100% à 41%, ce qui correspond à un taux final d'allocation au sucre de 59%. Ce complément alloué au sucre est comparable à celui trouvé sur R570 (58%) par Cheeroo-Nayamuth et al (2000) à l'île Maurice.

III.2.5 Humidité des tiges : rendement canne

Compte tenu de l'augmentation du jeu de données disponibles par rapport à l'étude de 2001 (Martiné et Lebret, 2001), et du fait que le modèle fonctionne de façon dynamique, nous avons recalé les paramètres *krdw1* et *krdw2* en utilisant le rendement canne comme variable de calage plutôt que l'humidité qui n'est pas un indicateur de production utilisé.

Les comparaisons entre les rendements canne observés et simulés, par parcelle, sont présentées sur les graphes A à G de la figure 43, et pour l'ensemble des parcelles sur le graphe 'H : Ensemble des sites' de la même figure. L'examen des graphes montre une concordance très satisfaisante entre rendements canne observés et simulés sans biais important ou systématique sur un site.

L'analyse statistique de ces comparaisons (tableau 6) indique une association hautement significative entre mstu observées et simulées (r^2 =0.967 et p<0.01). La coincidence globale est très satisfaisante (rmse=7.4 et rrmse=15.7) et le rapport lofit/sse est nettement inférieur à 1.

L'efficacité du modèle à simuler le rendement est aussi bonne que celle concernant la simulation de la matière sèche aérienne. Les valeurs obtenues de krdw1 et krdw2 sont différentes de celles déterminées en 2001, cependant le nouveau rapport de ces deux valeurs (krdw1/krdw2=0.7) reste comparable à celui obtenu précédemment (0.79)

III.2.6 Richesse

La richesse n'ayant pas été utilisée comme variable de calage, il est cependant important de tester la fiabilité du modèle sur les observations effectuées. Les comparaisons entre richesses observées et simulées par parcelle sont présentées sur les graphes A à G de la figure 44 et pour l'ensemble des parcelles sur le graphe 'H : Ensemble des sites' de la même figure.

L'examen des graphes montre une concordance entre richesses observées et simulées nettement moins satisfaisante que celle enregistrée sur les états du couverts précédemment calés. L'analyse statistique de ces comparaisons (tableau 6) indique une association



Figure 43. Comparaison des dynamiques rendement canne simulées et observées sur les sept sites ayant servi au calage (X : âge en jours et Y : rendement canne en Tha⁻¹); les barres d'erreurs représentent un écart-type. Sur le graphe H, la ligne en trait plein correspond à la bissectrice et la ligne en pointillés représente la droite de régression entre rendements canne observés et simulés.



Figure 44. Comparaison des dynamiques de richesse simulées et observées sur les sept sites ayant servi au calage (X : âge en jours et Y : richesse en %). Sur le graphe H, la ligne en trait plein correspond à la bissectrice et la ligne en pointillés représente la droite de régression entre richesses observées et simulées.

81

significative entre mstu observées et simulées ($r^2=0.865$ et p<0.01). Cependant, la coïncidence globale est assez faible (rmse=2.02 et rrmse=27.4).

Bien que le modèle simule correctement le rendement sucre et le rendement canne, son efficience de prédiction sur la richesse (rendement sucre / rendement canne) est moins satisfaisante. La richesse étant un rapport de deux états du couvert, de légers biais acceptables sur les rendement canne et sucre simulés provoquent des biais importants sur le rapport si les écarts ne sont pas de même signe.

III.2.7 Tests d'autres formalisations

.

L'effet de la température sur la conversion et la partition de la biomasse aérienne vers les tiges usinables ont été formalisées récemment de façon différente dans Apsim-Sugar. Il est intéressant de faire la comparaison avec notre modèle pour déterminer les valeurs prédictives respectives des deux modèles.

1 Effet de la température sur la conversion

Dans Apsim-Sugar (Keating et al, 1999), entre des températures moyennes de 15°C et 35°C, la température n'a aucun effet sur la conversion, ktemp=1. Par contre, au dessous de 15°C et au dessus de 35°C, ktemp décroit linéairement et s'annule pour 5 et 50°C. Nous avons donc introduit cette nouvelle formalisation dans notre modèle et recalé le paramètre ruemax. Les simulations de lai, msa (effet direct) et mstu à l'aide des deux types de modules d'action de la température (t Ceres-Kiniry, notre formalisation, et t Apsim-Sugar) donnent les 3 critères (r²/rmse/pente) suivants :

	Modèle avec t Kiniry	Modèle avec t Apsim- Sugar
lai	0.892 / 0.72 / 0.90	0.897 / 0.71 / 0.90
msa	0.968 / 290 / 1.01	0.965 / 295 / 0.98
mstu	0.950 / 212 / 1.01	0.946 / 217 / 0.97

On constate que les effets des deux modes de formalisation présentent la même capacité de prédiction de ces trois variables dans nos conditions. Compte tenu des valeurs seuils de température (Apsim-Sugar) et de la valeur de ktconv (Kiniry) l'effet de la température reste faible.

2 Partition de la matière sèche aérienne vers les tiges usinables

La partition employée dans notre modèle correspond à la nouvelle version de Canegro (Singels et Bezuidenhout, 2000): le stade d'apparition de tige usinable, et le niveau d'allocation, sont exprimés en fonction de la matière sèche aérienne atteinte.

Apsim-Sugar simule l'allocation vers les tiges usinables en utilisant un seuil d'apparition défini en degrés.jour, et alloue ensuite une fraction constante de msa à mstu (Keating et al, 1999). En utilisant les deux formalisations possibles de la température sur la conversion et après avoir calé les stades de début d'apparition des tiges et la fraction de msa allouée à mstu, nous avons comparé ces formalisations en utilisant les mêmes critères (r²/rmse/pente) que précédemment.

	Modèle	Modèle avec t Kiniry + allocation Apsim	Modèle avec t Apsim + allocation Apsim
Mstu	0.95/212/1.01	0.93 / 255 / 0.93	0.93 / 253 / 0.93
Sucre	0.94 / 142 / 1.02	0.9 / 193 / 0.95	0.9 / 192 / 0.95

Nous constatons que la formalisation de la partition adoptée dans notre modèle apporte une meilleure coïncidence (rmse plus faibles) entre résultats observés et simulés et ne surestime pas (pente proche de 1) les productions en matières sèches et en sucre.

III.3 Qualité de l'estimation du bilan hydrique

Le module de bilan hydrique a été directement transposé des modèles de type CERES. De ce fait, il n'a pas donné lieu au calage des paramètres qu'il utilise. Il reste à vérifier la qualité de sa représentation des processus associés au statut hydrique de la culture.

De plus, le modèle devant être sensible aux facteurs importants tels que le stress hydrique (I.3.3), et permettre de réaliser des applications concernant la détermination des gains potentiels dus à l'irrigation (III.6), il est nécessaire d'évaluer l'estimation, par le modèle, des états de croissance de la plante en conditions de fortes contraintes hydriques.

III.3.1. Stock d'eau dans le sol

La figure 45 compare les stocks d'eau disponible simulés et observés sur quatre parcelles. Toutes les parcelles ont subi des variations de stock d'eau. La rsme calculée sur l'ensemble des parcelles est de 10.6 mm ce qui donne un rrmse de 10%. Les principales diminutions et augmentations du stock observées sont bien représentées par la simulation, sans introduire de biais, même dans les conditions les plus extrêmes retenues. Néanmoins, sur les traitements irrigués en goutte à goutte (TI297STR et TI99), sur lesquels la fréquence de mesure est très élevée, l'estimation du stock est assez approximative, dans les épisodes durant lesquels celui-ci est élevé.

La bonne correspondance des valeurs simulées et mesurées semble assurée sur les mesures éloignées d'un apport d'eau, pour les parcelles irriguées, et, dans toutes les situations, pour les parcelles pluviales suivies à la tarière. Ceci suggère que les écarts observés sont davantage imputables au mode de mesure (TDR), sur un système d'apport d'eau localisé, et en période de rééquilibrage de l'eau dans le sol. C'est donc moins le module de bilan hydrique que la qualité de la mesure qui se trouve en question. Quoiqu'il en soit, les écarts n'étant manifestes qu'en condition de stock d'eau élevé, c'est à dire en bonne satisfaction hydrique, ceci ne devrait avoir aucune incidence sur la simulation du fonctionnement de la culture.



jas





Figure 45. Comparaison des évolutions de stocks d'eau utile (mm) simulés (----) et observés (o) sur 4 parcelles BXT15_99 (Barau, Andosol, 550m), CO457099 (Colimaçons, Andosol, 800m), TI297STR et TI99 (Tirano, Sol brun, 150m). Les abscisses "jas" correspondent à l'âge (jours après coupe précédente) et le stock utile est exprimé en mm.

jas

III.3.2. Etats de croissance de la plante

Les figures 46 et 47 représentent les évolutions observées et simulées du lai et du rendement canne au cours de l'épisode de forte variation de stock de la parcelle TI297STR (figure 45), incluant un stress important (swdef = 0.2 et ep = 5mm) sur une durée de 40 jours. Le rendement canne simulé suit fidèlement les observations tout au long des variations de statut hydrique. La simulation du lai traduit bien une chute puis une reprise du lai ; toutefois, elle est moins importante, sous-estimant les deux valeurs encadrant la période de stress. La courbe de simulation passe dans l'intervalle de confiance des points des observations, et la qualité des mesures pourrait, à elle seule, rendre compte de ces écarts. Nous ne pouvons cependant rejeter une tendance du modèle au lissage des variations.

III.4 Evaluation du modèle

Nous rappelons ici les conditions culturales dans lesquelles a été développé le modèle :

- Variété R570,
- Repousses dont l'âge maximal est de 14 mois,
- Ecartement proche de 1.5 m,
- Absence de contraintes liées à l'alimentation minérale, à l'enherbement, aux maladies et ravageurs.

III.4.1 Validation du modèle

La validation du modèle a été réalisée sur 57 parcelles de tests d'irrigation multilocaux suivis entre 1988 et 1997 (Voir tableau 4 et figure 22). Ces dispositifs multilocaux ne disposant pas de répétitions, nous devrons tenir compte de l'hétérogénéité généralement rencontrée sur les essais menés en canne à sucre, où les coefficients de variation vont de 10 à 15% sur les rendement canne et sucre, et de 8 à 10% sur la richesse.

Sur ces parcelles indépendantes de celles utilisées pour le calage, les variables validées sont le rendement (57 parcelles), le sucre produit (36) et la richesse (36). Les comparaisons entre observations et simulations sont représentées sur la figure 48, et les paramètres statistiques, indiqués dans le tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8. Critères statistiques déterminés lors de la validation du modèle sur 57 récoltes issues de tests multilocaux.

	n	۲²	р.	pente	origine	rmse	rrmse
Rendement canne (Tha ⁻¹)	57	0.807	<0.01	0.96±0.12	2±14	12.7	11.8
Rendement sucre (gm ⁻²)	36	0.694	< 0.01	0.94±0.22	125±340	161	10
Richesse (%)	36	0.722	< 0.01	0.67±15	5.3±2.1	1.06	7.2

Le rendement canne, et à moindre degré le rendement sucre, sont assez bien simulés par le modèle. Les points représentant la richesse en sucre, qui est le rapport des deux, s'éloignent



Figure 46. Comparaison entre dynamiques du lai observées et simulées lors d'un arrêt d'irrigation entre 180 et 240 jours (TI297STR). Les barres d'erreur représentent un écart-type.



Figure 47. Comparaison entre évolutions observées et simulées du rendement canne rdcan (T ha⁻¹) lors d'un arrêt d'irrigation entre 180 et 240 jours (TI297STR). Les barres d'erreur représentent un écart-type.



Figure 48. Comparaison des rendements canne et sucre et des richesses observés et simulés sur l'ensemble des parcelles utilisées pour la validation. La ligne en trait plein représente la bissectrice et la ligne en traits pointillés la droite de régression entre variables observées et simulées. Les chiffres correspondent aux numéros des parcelles (tableau 4).

au contraire de la diagonale et nous pouvons considérer que ce caractère n'est pas correctement simulé.

La comparaison des rendements en tiges usinables, qui prend en compte un lot de parcelles plus nombreuses que la comparaison des deux autres critères, fait apparaître deux groupes de points éloignés de la diagonale, dont les parcelles (exceptée la 9) ne disposent pas de rendement sucre et richesse observés :

- dans le premier cas (parcelles 49, 50 et 51) la simulation sous-estime le rendement canne, qui est toujours faible; il s'agit en fait de parcelles situées en altitude. Parmi les hypothèses possibles expliquant cette sous-estimation, une mauvaise prise en compte de l'effet des températures basses, souvent proches de la température seuil déterminée, pourrait être retenue. Dans cette gamme, il est possible que la vitesse de développement diminue avec la température moins rapidement que ce qui a été modélisé (figure 30). Ce problème mériterait d'être examiné plus particulièrement sur un plus grand nombre de situations de ce type,
- l'autre groupe de points correspond à des situations de contraintes hydriques marquées (parcelles 6, 9, 20 et 24) : le rendement est au contraire surestimé. Une explication pourrait être l'absence de prise en compte de la mortalité des tiges qui est fortement accentuée par une sécheresse.

III.4.2 Comparaison aux modèles existant

La validation, comparant valeurs observées et simulées, permet une évaluation "absolue" du modèle dans son domaine d'utilisation. La comparaison avec les autres modèles existants devrait situer sa capacité de prédiction parmi les outils de simulation disponibles.

Une comparaison rigoureuse de modèles exigerait d'être appliquée à un jeu de données commun, comportant des groupes de données de même importance provenant des sites de calage-validation de chacun d'entre eux, et de s'appuyer sur différents critères d'évaluations acceptés par la communauté scientifique. En pratique, il n'est guère possible, à ce jour, de disposer des modèles et des jeux de données correspondants, ni même des résultats détaillés de simulations produits par les différentes équipes modélisatrices. Aux modèles faisant l'objet de publications n'est associée que la valeur du rmse, calculée sur la base de jeux de données de taille et de provenance très variables. C'est sur ce critère que nous appliqueront notre comparaison : pour une même variable simulée, plus faible est la rmse, meilleure est la capacité d'un modèle à estimer cette variable.

Ces comparaisons de modèles sont résumées dans le tableau 9. Nous constatons que le modèle Mosicas conduit aux rmse les plus faibles, et donc les meilleures prédictions, pour le lai et les matières sèches (mstu, sucre). Nous notons, pour comparer Mosicas aux autres modèles, l'absence, pour ceux-ci, de rmse portant sur le rendement canne et la richesse, qui font intervenir l'humidité, critères économiques pourtant très importants en production. La comparaison récente de O'Leary (2000) indiquant que ces autres modèles étaient encore peu fiables dans leur capacité à prédire à la fois le sucre et l'humidité des tiges pourrait expliquer ce fait.

Modèle	Lai	Msa Tha ⁻¹	Mstu Tha ⁻¹	Sucre Tha ⁻¹	Rdcan Tha ⁻¹	Rich %	Références	Conditions et pays
Mosicas	0.72	2.9	2.1	1.4	7.4	2.0	Thèse, Calage.	Pluvial et irrigué, fort gradient de température. Réunion
Mosicas				1.6	12.7	1.1	Thèse, Validation	Pluvial et irrigué, fort gradient de température. Réunion
Apsim	0.78		6	3.3			Cheeroo- Nayamuth et al, 2000	Validation. Pluvial et irrigué. Ile Maurice
Apsim			6.1	4.9	28.7		Keating et al,1999; 0'Leary 2000	Calage+validation. Pluvial et irrigué à dominance irrigué. Afrique du Sud, Australie, Hawaii
Canegro			11.1	6.1			O'Leary, 2000	Afrique du Sud
Q-Cane			6.2	2.5			O'Leary, 2000	Australie
Q-Cane	1.1		2.3	3.3			Liu et Bull, 2001	Validation, conditions potentielles sans stress hydrique Australie
Apsim			2	2.2			Keating et al, 1995	Conditions potentielles sans stress hydrique Australie
Canegro			1	3.1			Keating et al, 1995	Conditions potentielles sans stress hydrique. Afrique du sud
Q-Cane			0.9	1.1			Keating et al,1995	Conditions potentielles sans stress hydrique. Australie

Tableau 9. Rmse obtenues lors des comparaisons de données observées aux résultats de simulations effectuées avec différents modèles.

III.5 Analyse de sensibilité

Cette analyse nécessite des études de sensibilité paramètre par paramètre puis croisée sur les paramètres supposés liés (Hamby, 1994 ; Janssen, 1994).

III.5.1 Etude de sensibilité paramètre par paramètre

Pour chaque paramètre nous avons réalisé une étude de sensibilité du modèle à ces variations sans changer la valeur nominale (ou calée) des autres paramètres. Des pas de 9% et un nombre d'itérations de 9 (4 de part et d'autre de la valeur nominale) ont été employés, ce qui correspond à une fourchette de variation de ±36% par rapport à la valeur nominale.

Les résultats de cette étude, effectuée sur les 7 parcelles ayant servi au calage, sont présentés dans le tableau 10 et sur les graphes présentés en annexe 2. Pour chaque paramètre, la variable analysée est celle située en aval de son lieu d'action (figure 29). La sensibilité du modèle sera décrite principalement pour des cannes âgées d'un an.

Sensibilité du lai aux paramètres de l'élaboration du lai

En fin de cycle, le modèle est en général peu ou pas sensible aux paramètres relatifs à l'élaboration du lai et seules les variations de *tbase* et *debsenla*i ont un effet sur le lai (tableau 10). La sensibilité globale faible à *klaidj* est en fait asymétrique (figure 58, annexe 2), le lai étant sensible à *klaidj* lorsque ce dernier est inférieur à sa valeur nominale. Le fait que msa ait un effet limitatif sur l'élaboration du lai, par le biais de la surface disponible que msa entraîne, atténue le rôle des paramètres *deblai* et *klaidj*. Le lai est en fait sensible en début de cycle (120 jours) aux paramètres de l'interception et de la conversion.

Sensibilité de la matière sèche aérienne msa aux paramètres de l'interception et la conversion

msa est très sensible à *ruemax* et à *tconvopt*, sensible à *ke* et très peu sensible à *ktconv*. La sensibilité à *tconvopt* est asymétrique et surtout importante si *tconvopt* est supérieur à sa valeur nominale (figure 59, annexe 2).

Sensibilité de la matière sèche de tiges usinables mstu aux paramètres relatifs à la partition de msa en mstu

mstu est très sensible (figure 60, annexe 2) à la fraction finale *kmstu1* et très peu sensible au début de l'apparition des tiges usinables *debmstu*.

Sensibilité du sucre produit aux paramètres relatifs à la partition de mstu en sucre

Le sucre produit est très sensible à la fraction finale allouée *ktstrua1*, et peu et pas sensible respectivement aux paramètres *tempstru* et *ktempstru*, relatifs à l'effet de la température sur la partition. La sensibilité globale faible au seuil de température *tempstru* est en fait asymétrique (figure 61, annexe 2), le sucre produit étant plus sensible à *tempstru* lorsque ce dernier est inférieur à sa valeur nominale.

Effet de l'âge

La sensibilité du modèle à ces paramètres décroît de manière générale avec l'âge (tableau 10) sauf pour *tbase*, *debsenlai* et *ksenlait* dont la sensibilité est croissante.

Tableau 10. Sensibilité du modèle aux variations de paramètres pour 3 âges 120, 240 et 365 jours après coupe sur les 7 parcelles utilisées pour le calage. CV : coefficient de variation (%); ER : Ecart relatif.

Sensibilité : 0 pas sensible, S- peu sensible, S sensible, TS très sensible.

Parametre	e et valeur	Variable	3	65j	24	0j	12	20	Sensi
nom	inale	étudiée	CV	ER	CV	ER	CV	ER	bilité
Tbase	12	Lai	15	45	6	19	0	0	S
Deblai	100	Lai	0	0	1	2	9	28	0
Klaidj	0.01	Lai	1	3	2	6	4	12	0
Debsenlai	3.5	Lai	11	36	9	8	1	3	S
Ksenlait	1.4 10 ⁻³	Lai	8	26	5	17	0.1	0	S-
Ksenlaiw	0.03	Lai	0	1	0	1	0	0	0
Ke	0.48	Msa	18	55	29	91	63	190	S
Ruemax	3.06	Msa	34	105	43	132	68	210	TS
Ktconv	1.5 10 ⁻³	Msa	4	12	4	13	11	34	0
Tconvopt	30	Msa	33	97	37	106	57	158	TS
Debmstu	500	Mstu	4	14	14	44	-	-	0
Kmstu1	0.75	Mstu	23	72	23	72	-	-	TS
Kstrua1	0.59	Sucre	27	77	27 .	84	-	-	TS
Tempstru	20	Sucre	7	19	17	47	-	-	S-
Ktempstru	0.03	Sucre	1	3	3	8	-	-	0

III.5.2 Etude de sensibilité croisée

L'étude précédente nécessite une analyse complémentaire de l'effet combiné de plusieurs paramètres liés. Nous avons donc réalisé des études graphiques de la sensibilité du modèle à 4 couples de paramètres pour des cannes de 1 an. Dans chaque couple, les paramètres interviennent dans le même processus et sont donc supposés liés.

<u>Interception-Conversion</u> : étude de sensibilité de msa aux variations du couple *ke-ruemax* (figure 62, , annexe 2). Nous constatons que *ruemax* et *ke* sont liés et que la liaison est plus forte pour des valeurs de *ke* supérieures à la valeur nominale de 0.48.

<u>Partition de la biomasse aérienne vers la tige mstu</u>: étude de sensibilité de mstu aux variations du couple *debmstu-kmstu1* (figure 63, , annexe 2). Il n'y a aucune liaison entre *debmstu* et *kmstu1*; l'absence de sensibilité de mstu à *debmstu* seul explique cette absence de liaison.

<u>Partition de la matière sèche de tige mstu vers les structures et le sucre</u> : étude de sensibilité du sucre produit aux variations du couple tempstru-ktstrua1 (figure 64, , annexe 2). La liaison entre la fraction allouée *ktstruat1* et la température seuil *tempstru* est globalement faible. La liaison est légèrement plus forte pour des valeurs de *tempstru* inférieures à la valeur nominale de 20°C.

<u>Humidité de la tige et rendement canne</u> : étude de sensibilité du rendement canne rdcan aux variations du couple *krdw1-krdw2* (figure 65, annexe 2). Une forte liaison apparaît entre ces deux paramètres; de plus, le rendement est sensible à ces deux paramètres très dépendants.

Ces études montrent que le modèle est très sensible à certains paramètres caractérisant la conversion (ruemax et tconvopt), la partition (kmstu1 et kstrua1), la teneur en eau (krdw1 et krdw2), et dans une moindre mesure l'interception (ke). La sensibilité du modèle à un paramètre n'est généralement pas symétrique par rapport à la valeur calée.

III.6 Applications du modèle

III.6.1 Applications réalisées

. .

Depuis 1996 (Martiné, 1996), nous avons employé les premières versions de ce modèle lors d'études sollicitées par nos partenaires de la filière canne à sucre. Les applications réalisées, difficiles à cataloguer et encore loin des utilisations envisageables, sont décrites ci-dessous suivant l'objectif principal assigné.

Si le modèle actuel simule des potentialités climatiques (prise en compte de la contrainte hydrique), jusqu'en 1998, seules les potentialités thermo-radiatives (sans contrainte hydrique) étaient estimées.

III.6.1.1 Estimations des potentialités et de leur variabilité.

L'évaluation des potentialités thermo-radiatives et climatiques de différents sites, déjà cultivés ou non, permet de décider de leur mise en valeur ou d'investissements supplémentaires. De plus, cette évaluation précise certains indicateurs utiles à la conception d'un itinéraire technique ou à sa modification (périodes de couverture incomplète du sol, de forts besoins, d'accumulation de biomasse utile,).

Ce type d'étude n'avait jamais été réalisé sur l'ensemble de l'île de la Réunion. Nous avons donc effectué en 1996 (Martiné, 1997) des simulations de croissance sans contrainte hydrique sur 12 stations météorologiques complètes réparties sur la zone cannière (Tableau 15, annexe3).

Les rendements moyens potentiels de repousses de R570 âgées de 12 mois, obtenus sur plusieurs années, sont représentés sur la figure 49. L'altitude, dont la température et le rayonnement sont fortement dépendants (figure 67, annexe 3), explique de façon satisfaisante la variabilité des rendements potentiels (r2=0.81) qui diminuent d'environ 12 ± 4 t ha⁻¹ par 100m d'élévation. Des rendements potentiels de 170 à 190 t ha⁻¹ peuvent être atteints sur le littoral.

Cette étude a permis d'acquérir d'autres résultats importants présentés sur les graphes de l'annexe 3 :

- Le taux d'interception moyen sur l'ensemble du cycle diminue de 76 à 62 % lorsque l'altitude augmente jusqu'à 800m (figure 68, annexe 3). Dans les hauts de l'île, l'emploi de variétés couvrant rapidement le sol et une diminution de l'écartement, envisageable du fait de l'absence de mécanisation, devraient améliorer l'interception de la ressource radiative sur le cycle,

- L'apparition de tige usinable dans les hauts est bien plus tardive (7 mois) que sur le littoral (4 mois) (figure 69, annexe 3). Cette faible période de production utile dans les hauts de l'île (5 mois sur 12) pourrait être valorisée en adoptant des cycles de récolte supérieurs à 12 mois, qui tiennent compte des risques de dégâts cycloniques sur les cannes âgées,

- L'accumulation maximale de biomasse de tige usinable (couvert fermé) est variable (110 à 360 kg ha⁻¹ jour⁻¹) et dépend fortement du site (altitude) et du mois de l'année. Les mois à forte accumulation potentielle de biomasse indiquent les périodes où les soins et l'alimentation hydrique et minérale apportés à la plante devront être optimaux (figure 70, annexe 3),

- Les références ainsi déterminées doivent être corrigées selon la date de coupe précédente de la culture.

Une seconde étude de ce type a été réalisée en 1999 (Poser, 2000) sur la zone Ouest de l'île destinée à l'irrigation. Seuls les rendements potentiels (thermo-radiatifs) simulés ont été employés afin d'estimer les potentialités de la zone à mettre en valeur.

III.6.1.2 Estimation de productions réelles

Chaque année, l'organisation de la récolte à la Réunion - longueur de la période de récolte, quotas aux agriculteurs - nécessite une prévision fiable (marge d'erreur inférieure à 5%) des productions de chaque bassin d'approvisionnement. Ces estimations, basées sur les déclarations des agriculteurs avant début juin, révèlent depuis quelques années des écarts importants entre les productions estimées et réalisées. Sachant que le modèle de croissance peut fournir des indicateurs de production tels que le rendement canne potentiel, la profession a sollicité notre appui dans ce domaine.



Figure 49. Relation entre le rendement canne simulé sans contrainte hydrique (moyenne interannuelle) et l'altitude sur 12 stations météorologiques de l'ensemble de l'île de la Réunion. Y = $175\pm13 - 0.12\pm0.04X$; n=12, r²=0.81, p<0.01, rse=16.



Figure 50. Comparaison entre les rendements canne estimés à l'aide de régressions utilisant des indicateurs simulés par le modèle Mosicas, et les rendements observés sur les bassins d'approvisionnement de Bois Rouge (BR : r2=0.98) et de Beaufonds (BF : r2=0.97).

De 1995 à 1999, sur les deux bassins (12000 ha) de la zone Nord de l'île, nous avons utilisé les données météorologiques des deux principales stations situées dans cette zone pour simuler à l'aide de Mosicas des indicateurs ou états de croissance (rendements canne avec ou sans contrainte hydrique, drainage, taux de satisfaction hydrique,..) entre le milieu de la campagne précédente et le 1^{er} juin . La comparaison de ces indicateurs aux rendements annuels moyens observés par bassin a permis, à l'aide de régressions linéaires multivariables, d'établir pour chaque bassin (Martiné, 2001) un modèle (régression multivariable) de prévision du rendement canne moyen.

Le graphe présenté en figure 50 met en évidence le pouvoir prédictif de ces modèles qui expliquent à plus de 95% la variabilité des rendements canne annuels moyens observés sur chaque bassin. Ces rendements simulés, fournis aux responsables des usines leur permet d'affiner leurs prévisions de production.

III.6.1.3 Analyses de Production.

Dans un souci d'amélioration constante de leur production, les responsables d'exploitations ou de complexes sucriers souhaitent connaître les potentialités de leurs parcelles et situer leur niveau de productivité. Ces références leur permettent d'apprécier les augmentations réalisables, les facteurs limitant et leur impact. Ces analyses de production nécessitent d'examiner les écarts entre rendements observés et simulés.

Dans cette optique et à la demande de responsables d'exploitations, deux études de ce type ont été réalisées en 1998 et 2002.

La <u>première analyse</u> (Bidault, 1998), a été effectuée en 1997 sur 8 exploitations (1200 ha) situées dans l'est de l'île de la <u>Réunion</u>. Le modèle utilisé, constitué uniquement du module de croissance, n'estimait que les états potentiels du couvert sans prise en compte de la contrainte hydrique.

L'examen global, par exploitation, des différences entre les rendements canne moyens observés et les rendements potentiels simulés (figure 51), signale des écarts importants (60 à 100Tha⁻¹) et variables d'une exploitation à l'autre. Les gains potentiels de productivité ne sont donc pas négligeables. L'analyse de la variabilité inter-annuelle de ces différences (ou gains potentiels) au sein de chaque exploitation montre que le cycle de récolte moyen et le taux de coupe mécanique sont les causes majeures de cette variabilité. Des simulations de rendements avec contrainte hydrique sont nécessaires pour affiner cette analyse.

Cycle de récolte moyen = \sum (No de cycle de récolte * surface) / \sum (surfaces)

No de cycle de récolte = 0 pour la vierge, 1 pour la première repousse,

Taux de coupe mécanique = surface coupée mécaniquement / surface totale

La <u>deuxième analyse</u> (Remond, 2002), a été menée à la <u>Guadeloupe</u> sur le complexe sucrier de Gardel (1000 ha) situé dans l'est de la Grande Terre. A l'aide du modèle correspondant à celui présenté dans cette thèse, des rendements potentiels climatiques (contrainte hydrique incluse) ont été simulés sur les 84 parcelles récoltées en 2000.

La comparaison des rendements simulés et observés est présentée sur la figure 52. L'écart moyen entre ces rendements est de 37.4 t ha⁻¹ en faveur du rendement simulé (94 t ha⁻¹). L'analyse de ces écarts en fonction du rendement simulé (figure 71, annexe 4) indique qu'ils sont d'autant plus élevés que le rendement simulé est important. Les écarts faibles, lorsque la contrainte hydrique est élevée, montrent que le modèle est satisfaisant dans ces conditions. Les écarts élevés, lorsque la contrainte hydrique est faible, signalent d'autres facteurs limitants non pris en compte par le modèle.



Figure 51. Rendements canne moyens observés et écarts entre rendements canne simulés et observés sur 8 exploitations du Nord Est de la Réunion. Les rendements canne ont été simulés sans contrainte hydrique.



Figure 52. Comparaison entre rendements canne observés et simulés avec contrainte hydrique sur le périmètre de Gardel en Guadeloupe (Campagne 2000).

La variabilité des écarts relatifs est fortement expliquée par le cycle de récolte (figure 72 ,annexe 4), la variété (figure 73, annexe 4) et la profondeur de sol (figure 74, annexe 4). Les effets des deux premiers facteurs, non intégrés dans le modèle, montrent qu'il y a une forte chute des rendements lors des premières repousses et que les variétés dans les conditions de Gardel n'ont pas le même rendement que la R570. Dans les vertisols dont le fonctionnement est difficile à modéliser, l'effet important de la profondeur du sol (réserve utile) sur les écarts peut être du à un mauvais fonctionnement du bilan hydrique ou à un calcul défectueux de la contrainte hydrique au niveau du module de croissance. Cependant la détermination très grossière de la réserve utile réelle, normalement calculée sur la profondeur d'enracinement et déterminée ici sur la totalité de la profondeur de sol, pourrait être partiellement à l'origine de cet effet.

III.6.1.4 Optimisations de stratégies.

L'intérêt de la modélisation est de pouvoir simuler des stratégies de culture afin de déterminer des itinéraires techniques optimaux d'un point de vue agronomique et économique. De nombreux facteurs techniques se prêtent volontiers à ce genre d'application : durée de cycles de récolte et de culture, irrigation (dose, fréquences, stades,..), périodes optimales de récolte, ...

Nous sommes fréquemment sollicités pour l'optimisation de l'irrigation et celle des durées de cycle de récolte. Les objectifs de l'optimisation de l'irrigation sont nombreux : détermination des besoins optimaux, détermination de l'impact potentiel d'une irrigation à l'optimum, optimisation de stratégies lorsque la ressource est illimitée mais chère (investissement et fonctionnement) et enfin lorsque cette dernière est fortement limitée (rationnement obligé). Quatre applications - trois concernant l'optimisation de l'irrigation et une les durées de cycles de récolte - sont résumées ci dessous.

1 Les modalités d'irrigation sont très variables sur les périmètres irrigués de la région Sud-Ouest de la Réunion. Outre le matériel, elles concernent les doses et fréquences d'irrigation à adopter ; des conseils sont souvent demandés au Cirad. Dans ce but, une étude (Combres, 1999) sur les fréquences d'irrigation a été réalisée sur deux sites contrastés de cette zone : Saint Pierre – Grand Bois et Pierrefonds dont les pluviométries moyennes annuelles sont respectivement de 1100 et 550 mm et les réserves utiles des sols de 150 et 40 mm. Sur chaque site, plusieurs fréquences d'irrigation avec remplissage de la réserve utile ont été simulées. Les rendements canne simulés selon les sites sont représentés sur la figure 53 en fonction de la fréquence d'apport.

Sur les sites à pluviométrie et réserves utiles plus importantes de la zone de St Pierre - Grand Bois -, la fréquence d'irrigation influence peu en moyenne le rendement canne alors que sur les sols à réserve utile et pluviométrie faibles de Pierrefonds l'espacement des arrosages provoque une baisse importante du rendement canne. Cette étude permet aussi de préconiser les matériels d'irrigation les plus adaptés : du goutte à goutte dans la zone de Pierrefonds et de l'aspersion en complément dans celle de St Pierre – Grand Bois.

2 De nombreuses exploitations des hauts du Bras de Cilaos et du Bras de la Plaine (Réunion) manquent d'eau pour l'irrigation et présentent des rendements faibles à la limite de la viabilité économique. L'application des excédents d'eau issus des réseaux d'irrigation des zones proches pourraient améliorer ces rendements.







Figure 54. Effets comparés de 4 stratégies d'irrigation à doses croissantes sur les augmentations de rendements canne simulés dues à l'irrigation dans les zones hautes du Bras de la Plaine et du Bras de Cilaos. Stratégies 1 et 2 sans transfert des zones basses vers les zones hautes, 3 et 4 avec transfert. Stratégies 1 et 3 sans transfert entres les deux bras, 2 et 4 avec transfert.

Afin de déterminer les gains potentiels de rendement canne que pourrait apporter l'irrigation, des simulations de stratégies d'irrigation réalisables ont été effectuées en 2001 (Lehec, 2002) sur 12 zones (6 dans les hauts du Bras de Cilaos et 6 dans les hauts du Bras de la Plaine) sur la période 1996 à 2001. Ces scénarios, créés à partir des ressources excédentaires des réseaux proches, incluent deux dates de coupe et quatre modalités d'irrigation possibles. Les simulations (figure 54) prévoient que l'irrigation pourrait entraîner des augmentations potentielles de rendement de 30 à 50Tha⁻¹sur le Bras de la Plaine et de 45 à 70 Tha⁻¹sur le Bras de Cilaos. A l'aide de ces résultats agronomiques issus de simulations, une étude économique doit être réalisée afin de déterminer la viabilité des investissements importants à réaliser sur cette zone ne disposant pas de réseau.

3 Sur le périmètre sucrier actuellement partiellement irrigué de Gardel en Grande-Terre (Guadeloupe), il est difficile de déterminer des calendriers d'irrigation optimaux compte tenu de la pluviométrie très variable de cette zone. Ainsi quatre scénarios d'irrigation ont été simulés en 2002 (Remond, 2002) sur une parcelle de grande culture de 1999 et une étude économique a été réalisée. Le tableau 11 ci-dessous indique les scénarios optimaux dans un objectif de maximisation du rendement ou de l'efficience de l'eau d'irrigation. Il conviendrait d' appliquer ce type de simulation sur plusieurs années, sur des sols de réserves utiles différentes. Ainsi, nous pourrions affiner les préconisations selon les sols et déterminer la variabilité des gains de rendements et des efficiences d'irrigation.

Tableau 11. Comparaison des performances simulées (rendement canne) de 4 stratégies d'irrigation sur une parcelle du site de Gardel au cours de la campagne 2000. L'écart entre les rendements canne simulés et observés était de 11.5 T ha⁻¹.

Calendrier	Fréquence d'irrigation	Rendement canne T ha ⁻¹	Gain de rendemen t T ha ⁻¹	Quantité d'eau apportée mm	Efficience de l'irrigation T ha ⁻¹ mm ⁻¹	Gain net Euro ha ⁻ 1
1	10mm/2jours	134	43.5	770	0.056	1952
2	10mm/3jours	128	38.1	510	0.074	1808
3	10mm/4jours	123	32.4	390	0.083	1564
4	10mm/5jours	118	27.7	300	0.092	1357
Pluvial		90				

4 En Guadeloupe, deux schémas de cycles de culture sont couramment employés sur les exploitations : les cycles de "grande culture" cultivés en vierge de 16 mois et repousses de 12.5 mois et les cycles de "petite culture" récoltés à 11.5 mois en vierge et repousses. La tendance actuelle est à la suppression des cycles de "grande culture" bien que ce mode de culture ait des avantages socio-économiques. Compte tenu des faibles possibilités d'irrigation actuelles, il est donc important de comparer ces deux types de schémas de cycles de culture en pluvial.

Une étude préliminaire, à l'aide de simulations avec le modèle, a donc été menée en 2000 (Todoroff, 2000). Ces deux cycles de grandes et petites cultures, pour plusieurs dates de coupe, ont été comparés sur deux années à pluviométries contrastées en Grande-Terre. Les résultats du tableau 12 ci-dessous prévoient que, sur le plan de la productivité, la petite culture est plus performante. Cette étude préliminaire est à confirmer avec un modèle plus complet, sur plusieurs sites et un nombre plus grand d'années.

Cycle	Année de récolte	Rendement canne mensuel (Tha ⁻¹ mois ⁻¹)
Grande culture	1998	2.5
	1999	8.4
Petite culture	1998	3.6
	1999	9.2

Tableau 12. Comparaison des performances simulées (rendement canne) de deux stratégies de longueur de cycles de récolte, sur le site de Gardel, au cours des campagnes 1998 et 1999.

La présentation de ces études de cas souligne la large gamme d'utilisation du modèle. Ces premières applications montrent que, une fois les simulations réalisées, les méthodes d'analyse doivent être améliorées, et permettent de signaler certains défauts du modèle, générateurs de nouvelles questions de recherche (fonctionnement des vertisols, prise en compte du numéro de repousse,..).

III.6.2 Impact potentiel de l'irrigation dans une région hétérogène

Les applications déjà réalisées ne montrent pas la diversité de l'impact de l'irrigation dans des situations très hétérogènes où varient fortement les facteurs climatiques autres que la pluie (température et rayonnement). Il nous a donc semblé pertinent de tester les potentialités du modèle dans un tel cas. Le site étudié, les traitements appliqués et les stations climatiques employées ont été présentés au chapitre II.5 de Matériel et Méthodes.

Dans une première phase, la variabilité des potentialités avec et sans contrainte hydrique a été analysée à partir de la figure 55 où sont représentés les rendements canne moyens simulés avec et sans contrainte hydrique en fonction de l'altitude de la station.

Nous notons une décroissance très significative ($r^2=0.71$) du rendement canne potentiel d'environ 9±3 Tha⁻¹ par 100m d'élévation, de 170 sur le littoral à 95 Tha⁻¹ à 800m d'altitude. La variabilité inter-annuelle de ces rendements reste faible (Ecart-type: 5 t ha⁻¹). Ces résultats sont en accord avec l'application déjà réalisée en 1997 (chapitre II.6.1.1) sur l'ensemble de l'île et sont conformes aux rendements maximaux, de cannes âgées de 12 mois, observés au niveau du littoral (180 à 200 t ha⁻¹) en culture bien irriguée et vers 800 m les années humides.

Nous constatons en pluvial une relative stabilité du rendement canne entre 70 et 100 t ha⁻¹ selon l'altitude et une forte variabilité inter-annuelle (Ecart-type: 14 t ha⁻¹).

Les résultats précédents soulignent la nécessité d'une analyse des écarts entre ces deux types de rendements canne. La figure 56 représente les différences entre les rendements potentiels moyens simulés avec et sans contrainte hydrique, pour des réserves utiles de 40 et 100 mm, en fonction de l'altitude de la station. Nous notons une diminution de ces différences lorsque l'altitude augmente, avec une plage de début de stabilisation entre 300 et 400m. Cette stabilisation avait été observée par P. Langellier (1990) sur des tests d'irrigation. Nous remarquons, de plus, que les différences obtenues sur faible réserve utile (40mm) sont supérieures à celles obtenues sur un sol plus profond (100mm). Les gains potentiels de rendement que pourrait apporter une absence de contrainte hydrique (irrigation), dans une telle région, ne sont donc pas homogènes et dépendent fortement de la réserve utile des sols et des conditions thermo-radiatives des sites étudiés (figure 67, annexe 3).



Figure 55. Relations entre les rendements simulés potentiels et pluviaux et l'altitude (Tha⁻¹). Les rendements correspondent à des moyennes inter-annuelles. Rendement potentiel : Y= - $0.09\pm0.03X + 168\pm13$; n=17, r²=0.71,p<0.01. Rendement pluvial : r²=0.07,p=0.30.



Figure 56. Différences entre rendements canne simulés potentiels et pluviaux (Tha⁻¹) en fonction de l'altitude selon deux niveaux de réserve utile ru (40 et 100 mm). Les rendements correspondent à des moyennes inter-annuelles.



Figure 57. Rendements pluviaux simulés (Tha⁻¹) en fonction de etr/etm sur le cycle et selon l'altitude (des réserves utiles de 40 et 100mm ont été employées sur chaque station).

Dans les études de rentabilité, la détermination des rendements et des gains dus à l'irrigation est souvent effectuée en prenant comme critère le rapport etr/etm (ou ep/ep1) calculé à l'aide d'un simple bilan hydrique. La figure 57 représente, sur trois plages d'altitude, les rendements simulés en fonction de etr/etm (ou ep/ep1) simulé sur l'ensemble du cycle de récolte. Nous constatons que les relations entre rendement canne et etr/etm diffèrent significativement entre ces trois plages d'altitude dont les conditions thermo-radiatives sont différentes (figure 67, annexe 3). Il serait donc incorrect, dans une telle région, d'employer un coefficient multiplicateur moyen de etr/etm estimé localement (essais) ou pris dans la littérature, pour estimer les rendements et gains potentiels. Des évolutions de la relation entre rendement canne et etr/etm ont déjà été observées sur un même site en Guadeloupe (Pellerin, 1986) du fait d'une modification conséquente de l'itinéraire technique (élimination des résidus et cycle de récolte plus court pour les vierges).

Cette étude démontre la capacité du modèle à déterminer, d'une part, les potentialités de production de la canne et, d'autre part, les augmentations potentielles de rendement que peut apporter l'irrigation dans un environnement où les conditions de température et de rayonnement varient fortement.

Un complément d'étude consisterait :

- à spatialiser les rendements potentiels et pluviaux ainsi que leurs différences,
- à tester les nombreux scénarios d'irrigation possibles (dose, fréquence) afin de déterminer, sur chaque site, les meilleures stratégies.

Cette application souligne aussi le danger d'utiliser des outils ou normes simples, tels que etr/etm, lorsque la pluviométrie n'est pas la seule contrainte climatique dans une région. Le bilan hydrique seul n'est pas suffisant pour de telles études : il doit être couplé à un module de croissance.
IV DISCUSSION et CONCLUSION

La multiplicité des problèmes agronomiques posés à la recherche dans le domaine de la canne à sucre (urgence des réponses, diversité des situations, lenteur et coût de l'expérimentation,...), nous ont conduit à envisager une nouvelle approche. La modélisation, en pleine extension du fait des connaissances accumulées sur le fonctionnement des végétaux et des moyens informatiques maintenant accessibles, offrait de nombreux avantages pour répondre à notre attente.

Les modèles existants, présentant toutefois de sérieuses limites, nous avons décidé d'entreprendre le développement d'un nouveau modèle. La situation réunionnaise, de part sa diversité pédo-climatique et l'impossibilité d'y mener des expérimentations lourdes capables de répondre aux questions posées, se prêtait particulièrement à cette démarche.

Les spécificités de la canne ont nécessité au préalable des adaptations d'ordre méthodologiques, dont la mise au point d'une méthode de mesure peu destructive de la biomasse et de l'indice foliaire. Ces résultats constituent un acquis précieux utilisable dans les développements futurs.

Un modèle de croissance Mosicas a été construit. Confronté à ceux qui ont été développés et validés ailleurs dans la même période, il s'avère plus pertinent, au moins sur notre site. Ce modèle devant être applicable sur des bassins ou des grandes exploitations, nous avons développé une plate-forme de simulation Simulex capable de gérer de nombreuses parcelles soumises à des conditions variées (climat, sol, itinéraires techniques) et de mener des études d'optimisation de scénarios, de sensibilité et de calage.

A l'aide de cet ensemble opérationnel, de nombreuses applications peuvent maintenant être envisagées et certaines ont pu être réalisées.

Cependant, plusieurs limites, largement liées aux choix de modélisation et aux priorités d'application retenues, apparaissent dès à présent. La consolidation et la généralisation de ce modèle supposent par conséquent un certain nombre d'ajustements.

Ainsi, des modifications des formalisations choisies sont pressenties. Elles découlent de certaines mauvaises performances du modèle constatées lors de son évaluation :

1/ Dans les situations d'altitude, où les températures moyennes sont assez basses, les rendement sont sous-estimés

- cela peut être expliqué par une mauvaise évaluation du temps thermique, due probablement :
 - au choix d'une température de base trop élevée. Mais ceci mettrait en cause, à un moindre degré, toutes les situations ;
 - à la mesure de la température journalière, qui ne prend pas en compte ses variations horaires; des solutions sont disponibles dans d'autres modèles,
 - au choix de la température de l'air comme variable d'entrée, et non de celle du méristème, la relation entre les deux pouvant varier en relation avec la hauteur du point végétatif et l'effet d'écran du feuillage. Une

amélioration demanderait le développement d'un modèle de passage de la température de l'air à celle du méristème, en s'inspirant de ce qui existe déjà dans la littérature,

- la linéarité de la relation entre la température moyenne de l'air et la vitesse de développement peut être mise en cause,
- sans modifier la prévision de la vitesse de développement et de la fabrication de biomasse, la non-prise en compte de la respiration d'entretien, sensible à la température, pourrait être une autre explication.

2. Nous avons choisi de ne pas formaliser la mortalité des tiges usinables, marginale habituellement pour les cycles courts. Cependant, cette mortalité peut, même dans ces conditions, prendre de l'importance en cas d'adversité comme les stress hydriques prolongés ; dans ce cas, le modèle surestime la biomasse.

3. La reprise de croissance après intervention d'un stress hydrique sévère semble sous-estimée par le modèle; ceci reste à confirmer. La vigueur de cette reprise pourrait s'expliquer par l'utilisation de réserves de cellules n'ayant pu achever leur croissance lors d'un stress. Sa représentation plus exacte devrait alors distinguer les effets du stress sur la multiplication et le grandissement cellulaire.

4. Quelles que soient les situations, la richesse en sucre, très importante pour le fonctionnement des sucreries, est nettement moins bien simulée que le rendement canne et le rendement sucre dont elle est le quotient. Les paramètres de la partition de la tige entre structures et sucre sont calés sur le rendement sucre et ceux de l'humidité des tiges sur le rendement canne. La méthode de calage ou le mode de formalisation de l'humidité peut être la cause de cette mauvaise estimation. Dans les autres modèles, le manque de détail sur la façon souvent très empirique de modéliser le contenu en eau de la tige et l'absence d'indicateurs ou de tests statistiques sur les performances d'estimation de la richesse font qu'il est difficile d'en retenir une solution et montrent qu'il existe là une lacune importante

Les choix culturaux adoptés lors de la construction du modèle (repousses de premier ordre, cycles de 12 à 14 mois, écartements proches de 1.5 m, variété unique R570, alimentation minérale optimale) limitent l'applicabilité du modèle. Son extension suppose des ajustements et un élargissement des formalismes existants:

- à la <u>vierge</u> où les croissances du lai et du système racinaire (répartition et partition de la biomasse) divergent de celles observées en repousses ;
- au <u>vieillissement des repousses</u> lors duquel une diminution des rendements est généralement constatée et où l'évolution du système racinaire (efficience, tassement du sol, ..) et l'effet des manques (arrachages lors des récoltes) seraient probablement les principaux processus à intégrer;
- aux <u>cycles longs</u> très supérieurs à 12-14 mois où la respiration d'entretien et la mortalité des tiges usinables devraient être prises en compte;
- aux <u>écartements</u> très différents de 1.5m où l'évolution du lai (dynamique de tallage notamment) et la partition divergent ;
- à d'autres <u>variétés</u> en modifiant les paramètres qui varient entre variétés et expliquent les différences de comportement;
- à la prise en compte dans un premier temps du stress azoté. Cette modification du modèle suppose l'intégration d'un bilan azoté du sol et d'un module d'alimentation azotée de la plante-qui pourraient être issus de Ceres.

L'intégration ou la modification de ces formalismes permettra de répondre à des demandes d'applications complétant celles déjà réalisées sur l'optimisation des stratégies. Elles concernent les longueurs de cycles, le nombre de repousses à cultiver, l'écartement et la fertilisation azotée à adopter.

Enfin, l'ensemble de ces perspectives d'améliorations du modèle laisse envisager une extension de son aire d'application et de sa gamme d'utilisation dont nous décrirons les plus pertinentes :

L'élargissement de l'aire d'application.

Le modèle actuel n'est appliqué qu'à la Réunion et en Guadeloupe. Même si ces deux sites présentent des conditions climatiques variées, il est nécessaire de le valider et de l'appliquer à d'autres conditions climatiques très différentes: équatoriales chaudes, humides à faible rayonnement (Gabon, Guyane), équatoriales ou tropicales d'altitude à faible températures et rayonnement élevé (Kénya, Colombie), subdésertiques à températures élevées et écarts importants (Nord-Sénégal, Soudan), subtropicales froides (Maroc). Des collaborations (échanges de données existantes et utilisation du modèle) sont prévues (Maroc, Brésil) et envisagées (Maurice, Afrique de l'Ouest).

Etudes environnementales.

Les préoccupations récentes de préservation de l'environnement, mises en exergue dans des situations insulaires fragiles, où la canne à sucre représente une grande part des terres cultivées, demandent elles aussi des réponses urgentes et adaptées à la diversité des situations rencontrées. Dans de telles conditions, un modèle de croissance canne à sucre intégrant dans un premier temps un bilan azoté du sol, peut être un outil précieux d'aide à la décision dans ce domaine.

Aide à la création et la sélection variétale.

Les programmes de création et de sélection sont généralement lourds et coûteux. Ainsi, le programme canne du CIRAD possède, en Guadeloupe, une station de création variétale et coordonne un réseau d'essais variétaux (Guadeloupe et Afrique de l'Ouest) où les conditions édaphiques et climatiques sont extrêmement diverses. Les deux principales difficultés de ce dispositif sont la création, en Guadeloupe, de génotypes adaptés aux différents environnements rencontrés en Afrique de l'Ouest, et la valorisation des résultats du réseau d'essais de Guadeloupe et d'Afrique de l'Ouest.

Lors de l'analyse classique des résultats issus des essais variétaux multilocaux, la variabilité due au génotype (G) ne représente généralement que 10 à 20% de la variabilité totale (Bidinger et al, 1996). Sans caractérisation des environnements (E) et de l'interaction GxE, l'analyse statistique classique valorise donc très peu les résultats acquis dans ces essais lourds et onéreux.

La caractérisation des environnements est réalisée à l'aide d'indices bioclimatiques (Muchow et al, 1996) capables d'expliquer au mieux la variabilité de la croissance et des

rendements entre environnements et entre génotypes. Ces indices tiennent compte des ressources disponibles (rayonnement, eau, minéraux), de leur interception ou captation, de leur conversion en biomasse et de la partition de cette dernière en rendement (Bidinger et al, 1996). Ils peuvent être déterminés à l'aide de modèles simples tels qu'un bilan hydrique (Passioura, 1977 ; Aggarwal et al, 1986) ou un bilan radiatif (Monteith, 1981), et de modèles plus complexes (intégration des bilans précédents avec un bilan carboné). Le modèle de croissance permet donc de caractériser chaque environnement et par conséquent de valoriser les essais multilocaux.

De plus, la caractérisation des environnements à l'aide d'indices issus des modèles et la connaissance des caractéristiques spécifiques des génotypes dans chaque type d'environnement, permettent au sélectionneur d'identifier des écotypes adaptés à chaque environnement et d'orienter leurs programmes de croisement vers des écotypes cibles (Aggarwal et al, 1996).

Cette application des modèles pour valoriser la sélection, qui commence à être utilisée sur de nombreuses plantes, a pour l'instant été très peu initiée sur la canne à sucre. L'amélioration des connaissances concernant cette plante et la disponibilité de modèles spécifiques devrait permettre un appui efficace. Cependant, cet appui suppose des études préalables concernant, d'une part, les indices environnementaux les plus pertinents et, d'autre part, les mesures complémentaires facilement réalisables qui aideront à déterminer les caractéristiques spécifiques des génotypes à un environnement cible.

Les perspectives sont multiples et des choix s'avèrent nécessaires. Ceux ci pourront dépendre des options de l'organisme CIRAD en matière de canne à sucre et des possibilités de collaboration (conceptuelles et applications) autour de cet outil opérationnel de modélisation.

BIBLIOGRAPHIE

Aggarwal P.K., Singh A.K., Chaturvedi G.S., SINHA S.K., 1986. Performance of wheat and triticale cultivars in a variable soil-water environment. II. Evapotranspiration, water use efficiency, harvest index and grain yield. Field Crops Research, 13:301-315.

Aggarwal P.K., Kropff M.J., Matthews R.B., McLaren C.G., 1996. Using simulation models to design new plant types and to analyse genotype by environment interactions in rice. In: Cooper M., Hammer G.L. (Eds.) Plant adaptation and crop improvement, CAB international, Wallingford, p. 403-418.

Alexander A.G., 1973. Sugarcane physiology. A comprehensive study of the Saccharum source-to-sink system. Elsevier, Amsterdam, 752p.

Anonyme,1997. Panorama Agricole et Sucrier 1988-1997. Saint Denis. 4^{ème} Congrès International de l'Association Réunionnaise pour le Développement de la Technologie Agricole et Sucrière ARTAS. Octobre 1997.

Anonyme, 1998. La lettre des industriels du sucre de la Réunion n°4. 1998.4 p.

Anonyme,2000. F.O. Licht's World Sugar Statistics 1999/2000. 17p.

Artschwager E., 1940. Morphology of the vegetative organs of the sugarcane. Jour. Agric. Res., 60: 503-549.

Ball-Coelho B., Sampaio E. V. S. B., Thessen H., Stewart J.W.B., 1992. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. Plant and Soil, 142: 297-305.

Baran R., Bassereau D., Gillet N., 1974. Measurement of available water and root development on an irrigated sugar cane crop in the Ivory Coast. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists, 15 : 726-735.

Benda G.T.A., Fanguy H.P., Irvine J.E., Breaux R.D., 1981. Field planting of short sugarcane seed pieces in Louisiana. Proceedings of the American Society of Sugarcane Technologists, 8:40-48

Bensimon G., 1992. Calibration et validation d'un modèle de simulation de la croissance et du développement de la canne à sucre (AUSCANE) à l'île de la Réunion. Mémoire de DAA de l'ENSAIA, 35p.

Berding N., Moore P.H., 1996. Towards optimized induction of flowering in sugarcane. In : J.R. Wilson, D.M. Hogarth, J.A. Campbell and A.L. Garside (Editors), Sugarcane : Research Towards Efficient and Sustainable Production. CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures. 44-47.

Bidault C., 1998. Analyse de rendements en canne à sucre. Mémoire de 2ème année INA/PG, 27 p.

Bidinger F.R., Hammer G.L., Muchow R.C., 1996. The physiological basis of genotype by environment interaction in crop adaptation. In: Cooper M., Hammer G.L. (Eds.) Plant adaptation and crop improvement, CAB international, Wallingford, p. 329-347.

Blume H., 1985. Geography or Sugar Cane. Verlag Dr. Albert Bartens, Berlin, 371 p.

Bonhomme R., Varlet Grancher C., Chartier P., 1974. The use of hemispherical photographs for determining the leaf area index of young crops. Photosynthetica, 8, 3:299-301.

Bonhomme R., 2000. Bases and limits to using 'degree.day' units. European Journal of Agronomy, 13 : 1-10.

Bonhomme R., 2000. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation. Field Crops Research, 68 : 247-252.

Bonnet G.D., 1996. Rate of leaf apprearance in sugarcane, including a comparison of a range of varieties. Aust. J. Plant Physiol., 25:829-834.

Brisson N., Seguin B., Bertuzzi P., 1992. Agrometeorological Soil Water Balance for Crop Simulation models. Agricultural and Forest Meteorology, 59: 267-287.

Bull T. A., Tovey D. A., 1974. Aspects of modelling sugarcane growth by computer simulation. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists, 15 : 1021-1032.

Campbell J.A., Robertson M.J., Grof C.PL., 1998. Temperature effects on node appearance in sugarcane. Aust. J. Plant Physiol., 25:815-818.

Celestine-Myrtil D.A., Parfait A., 1987. HPLC analysis of sugars in sugar cane stalks. International Sugar Journal, 89 :217-220.

Cheeroo-Nayamuth F.C., Robertson M.J., Wegener M.K., Nayamuth A.R.H., 2000. Using a simulation model to assess potential and attainable sugar cane yield in Mauritius. Field Crops Research, 66: 225-243.

Chopart J.L, Marion D., 1994. Caractérisation au champ de l'enracinement de la canne à sucre. Application à l'évaluation d'une méthode d'évaluation de la biomasse racinaire. Note technique IDESSA et rapport ATP CIRAD n° 14/92. 28p.

Clements H.F., Kubota T., 1943. The primary index, its meaning and application to crop management with special reference to sugar cane. Haw. Plant. Rec., 47 : 257-297.

Clements H.F., Shigeura H., Akamine E.K., 1952. Factors affecting the growth of sugar cane. University of Hawaii Experiment Station Technical Bulletin 18, Honolulu.

Clements H.F., 1980. Sugarcane crop logging and crop control. The University Press of Hawaii, Honolulu.

Coale F.J., Sanchez C.A., Izuno E.T., Bottcher A.B., 1993. Nutrient accumulation and removal by sugarcane grown on Everglades histosols. Agronomy Journal, 85 : 310-315.

Combres J.C., 1999. Modélisation du rationnement hydrique et régionalisation des modèles climatiques. Rapport annuel CIRAD-Réunion 2000. 6p.

CTICS, 2001. Campagne sucrière 2000. Centre Technique Interprofessionnel de la canne et su sucre, Saint-Denis. 22p.

Daly C., Neilson R.P., Phillips D.L., 1994. A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. Journal of Applied Meteorology, 33: 140-158.

Daniels J., Roach B.T., 1987. Taxonomy and evolution. In Heinz D.J. Sugarcane improvement through breeding. Elsevier Press, Amsterdam, 7-84.

Das U.K., 1936. A new approach to the problem of juice quality. Repts. Assoc. Haw. Sug. Tech., 15 : 43-49.

D'Hont A., Lu Y.H., Gonzales de Leon D., Grivet L., Feldmann P., Lanaud C., Glaszmann J.C., 1994. A molecular approach to unraveling the genetics of sugarcane, a complex polyploid of the Andropogonae tribe. Genome, 37 : 222-230.

Evans H., 1935. Investigation on the root-system of sugarcane varieties. Sug. Can. Res. Sta., Mauritius Bull., 44p.

FAO, 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage Paper N° 56. Rome 1998.

Fauconnier R., Bassereau D., 1970. La canne à sucre. Edition Maisonneuve et Larose, 468p.

Fauconnier R., 1991. La canne à sucre. Edition Maisonneuve et Larose, Collection le technicien d'agriculture tropicale, 165p.

Fernandes A.C., Benda G.T.A., 1985. Distribution patterns of Brix and fibre in the primary stalk of sugarcane. Sugar Cane, 5 : 8-13.

Gabrielle B., Menasseri S., Houot S., 1995. Analysis and field evaluation of the CERES models' water balance component. Soil Science Society of America Journal, 59 :1402-1411.

Gasho G.J., Ruelke O.C., West S.H., 1973. Residual effects of germination temperature in sugarcane. Crop Science, 13 : 274-276.

Gay J.P., Chabalier P.F., Walter G., Poulet J.L., 1997. Hétérogénéité, échantillonnage et estimation du poids de canne dans une parcelle. Communications du Congrès International de l'ARTAS-AFCAS, 4 : 335-352.

Généré B., 1985. Elaboration d'un programme multilocal de recherches agroclimatiques sur canne à sucre à la Réunion. Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 115 p.

Girard J.C., Payet J., 1997. La maîtrise des maladies de la canne à sucre à la Réunion : un effort continu de lutte depuis 60 ans. 4ème congrès international de l'ARTAS, 249-259.

Glaszmann J.C., Noyer J.L., Fautret A., Lanaud C., Feldmann P., 1989. Molecular genetic markers in sugarcane. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists, 20: 872-882.

Goebel R., 1999. Caractéristiques biotiques du foreur ponctué Chilo saccharifagus (Bojer, 1956) (Lep. Pyralidae) à l'île de la Réunion. Facteurs de régulation de ses populations et conséquences pour la lutte contre ce ravageur. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse. 229 p.

Goffe, Ferrier, Rogers, 1994. Global Optimization of Statistical Functions with Simulated Annealing. Journal of Econometrics, 60: 65-100.

Grantz D.A., 1989. Effect of cool temperatures on photosynthesis and stomatal conductance in field-grown sugarcane in Hawaii. Field Crops Research, 22: 143-155.

Hamby D.M., 1994. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. Environmental monitoring and assessment, 32: 165-154.

Hartt C.E., Korschak H.P., Forbes A.J., Burr G.O., 1963. Translocation of ¹⁴C in sugar cane. Plant Physiology, 38 : 305-319.

Hartt C.E., 1965.The effect of temperature upon translocation of ¹⁴C in sugarcane. Plant Physiology, 40: 74-81.

Hartt C.E., 1967. Effect of moisture supply upon translocation and storage of ¹⁴C in sugarcane. Plant Physiology, 42: 338-346.

Hartt C.E., 1970. Effect of nitrogen defficiency upon translocation of ¹⁴C in sugarcane. Plant Physiology, 46 : 419-422.

Hoarau M., 1969. Sugar cane analysis by the hydraulic press method. The Int. Sugar J. 71: 328-333.

Hoogenboom G., 2001. Future of CANEGRO in the DSSAT suite of models. Proceedings of the first international workshop on the CANEGRO sugarcane model. South African Sugar Association Experiment Station, Mount Edgecombe. 9-12.

Hsiao T.C., 1973. Plant Responses to Water Stress. Annu. Rev. Plant Physiol, 24: 519-570.

Humbert R.P., 1968. The growing of sugar cane. Elsevier, Amsterdam. 455p.

Inman-Bamber N.G., 1991. A growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. S. Afr. J. Plant. Soil, 8: 93-99.

Inman-Bamber N.G., 1994. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. Field Crops Research, 36 : 41-51.

Inman-Bamber N.G., 1995. CANEGRO: Its history, conceptual basis, present and future uses. In: Robertson M.J. (Ed.), Research and Modeling Approaches to Assess Sugarcane Production Opportunities and Constraints. Workshop Proceedings, University od Queensland, St. Lucia, 31-34.

Inman-Bamber N.G., Kiker G., 1997. CANEGRO 3.10. DSSAT version 3.1 1998 distribution software. IBSNAT, University of Hawaii, Honolulu.

Inman-Bamber N.G., Robertson M.J., Muchow R.C., Wood A.W., Pace R., Spillman A.M.F., 1999. Boosting yields with limited irrigation water. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 203-211.

Irvine J.E., Benda G.T.A., 1980. Sugarcane spacing III. Development of production techniques for narrow rows. Proceedings of the International Society of Sugarcane Technologists, 369-375.

Janssen P.H.M., Heuberger P.S.C., 1995. Calibration of process-oriented models. Ecol. Model., 83: 55-66.

Janssen P.H.M., 1994. Assessing sensitivities and uncertainties in models: a critical evaluation. In : Grasman, Straten J.G. (Eds.). Predictability and nonlinear modelling in natural sciences and economics. Kluwer, Dordrecht. 344-361.

Jones C.A., Kiniry J.R., 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, 194p.

Jones C.A., Wegener M.K., Russell J.S., McLeod M.I., Williams J.R., 1989. AUSCANE – Simulation of sugarcane with EPIC. CSIRO Australia, Division of Tropical Crops & Pastures Technical Paper No 29, CSIRO, Brisbane, 99p.

Julien M.H.R., Soopramanien G.C., Lorence D., 1974. Juvenility, Senility, Climate and Flowering in Saccharum. Proceedings of the International Society of Sugarcane Technologists, 1-7.

Julien M.H.R., Delaveau P., Soopramanien G.C., Martiné J.F., 1977. Age, Time of Harvest and Environnement as Factors Influencing Differences in Yield between Flowering and Vegetative Canes. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists. 1771-1789.

Keating B.A., Huth N., 1995. APSIM: A framework for modelling sugarcane production systems. In: Robertson M.J. (Ed.), Research and Modeling Approaches to Assess Sugarcane Production Opportunities and Constraints. Workshop Proceedings, University od Queensland, St. Lucia, 71-79

Keating B.A., Liu D.L., Inman-Bamber N.G., Robertson M.J., Muchow R.C., Kingston G., 1995. Comparison of levels of approach in modelling sugarcane potential yield. In: Robertson M.J. (Ed.), Research and Modeling Approaches to Assess Sugarcane Production Opportunities and Constraints. Workshop Proceedings, University od Queensland, St. Lucia, 43-51

Keating B.A., Robertson M.J., Muchow R.C., Huth N.I., 1999. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. Field Crops Research, 61: 253-271.

Langellier P., 1990. Etude de la variabilité multilocale de la croissance de la canne à sucre à la Réunion et ses conséquences sur le rendement. Application à la zone des périmètres irrigués de l'ouest et du sud. Rapport Cirad, 32p.

Lehec S., 2002. Extension des Périmètres Irrigués en conditions de ressource limitée à la Réunion. Mémoire d'ingénieur ISTOM. 113p.

Lingle S.E., Smith R.C., 1991. Sucrose metabolism related to growth and ripening in sugarcane internodes. Crop Science, 31:172-177.

Lingle S.E ,1999. Sugarcane. In: Smith D.L., Hamel C. (Eds.) Crop yield. Physiology and processes, Springer-Verlag, Berlin, p. 287-310.

Liu D.L., Kingston G., 1993. Variation of sugar and fibre components of dry matter in leaf, top and stalk of sugarcane. Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists, 352-359.

Liu D.L., Kingston G., 1995. QCANE: A simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation. In: Robertson M.J. (Ed.), Research and Modeling Approaches to Assess Sugarcane Production Opportunities and Constraints. Workshop Proceedings, University of Queensland, St. Lucia, 25-29.

Liu D.L., Kingston G., Bull T.A., 1998. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supraoptimum temperature regimes. Agriculture and Forest Meteorology, 90: 119-139.

Liu D.L., Bull T.A., 2001. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. Ecological Modelling, 144: 181-211.

Martin J.P., 1938. Sugar cane diseases in Hawaii. Exp. Sta. Haw. Sug. Plant. Assoc.. 295 p.

Martiné J.F., 1995. Modélisation de la croissance de la canne à sucre. Méthodes de mesure. CIRAD, St-Denis de la Réunion, 38p.

Martiné J.F., 1996. Mosicas : modèle de fonctionnement et d'élaboration du rendement canne, paramétrage de la R570. CIRAD, St-Denis de la Réunion, 29p.

Martiné J.F. 1997. Variabilité de la croissance et des potentialités de la canne à sucre à la Réunion – Utilisation du modèle de croissance Mosicas. Actes du congrès ARTAS/AFCAS. Saint Denis de la Réunion P. 353-365.

Martiné, J.F., Siband, P., Bonhomme, R. 1999. Simulation of the maximum yield of sugar cane at different altitudes: effect of temperature on the conversion of radiation into biomass. Agronomie. 19: 3-12

Martiné, 2001. Estimations de récolte de la zone de Bois-Rouge. Opération Modélisation de la Canne à Sucre. Rapport annuel CIRAD-Réunion 2000. 6p.

Martiné J .F., Combres J.C. et Mézino M., 2001. Une plate-forme de simulation comme outil d'analyse et d'aide à la décision : SIMULEX. In Actes de l'AFCAS/GPS 2001. Yaoundé Juin 2001. 91-103.

Martiné J.F., Lebret, P., Bonhomme, R., 2001. Effect of soil water content, intercepted radiation and temperature on sugar cane sucrose balance and partition. In Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol., 58-64

Martiné J.F. and Lebret P., 2001. Modelling the water content of the sugarcane stalks. In Proc S Afr Technol Assoc 75: 211-214..

Martinec J., Rango A., 1989. Merits of statistical criteria for the performance of hydrologic models. Water Ressour. Bull., 25: 421-432.

McCown R.L., Hammer J.L., Hargreaves J.N.G., Holzworth D.P., Freebairn D.M., 1996. APSIM : A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural system research. Agricultural Systems, 50 : 255-271.

McMartin A., 1979. The logistic curve of plant growth and its application to sugarcane. Proc S Afr Technol Assoc 53:189-193.

Mitchell P.L., 1997. Misuse of regression for empirical validation of models. Agricultural Systems, 54: 313-326.

Mongelard J.C., Mimura L. 1971. Growth studies on the sugarcane plant. I. Effects of temperature. Crop Science, 11:795-800.

Mongelard J.C., Mimura L. 1972. Growth studies on the sugarcane plant. II. Some effects of root temperature and giberellic acid and their interaction on growth. Crop Science, 12:52-58.

Monteith, J. L., 1981. Does Light Limit Crop Production. In Physiological Processes Limiting Plant Productivity (ed. C. B. Johnson), pp. 23-28. Butterworths, London.

Moore P.H., 1995. Temporal and spatial regulation of sucrose accumulation in the sugarcane stem. Aust. J. Plant Physiol., 22:661-679.

Muchow R.C., Spillman M.F., Wood A.W., Thomas M.R., 1994. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. Aust J Agric Res, 45:37-49.

Muchow R.C., Cooper M., Hammer G., 1996. Characterizing environmental challenges using models. In: Cooper M., Hammer G.L. (Eds.) Plant adaptation and crop improvement, CAB international, Wallingford, p. 349-364.

Nable R.O., Robertson M.J., Berthelsen S., 1999. Response of shoot growth and transpiration to soil drying in sugarcane. Plant and Soil, 207:59-65.

Nelder J.A., Mead R., 1965. A simplex method for function minimization. Computer Journal, 7: 308-313.

Nuss K. J., Maharaj A., 1992. Flowering in sugarcane and its effects on quality and yield components, four to eleven months later. Proceedings of the South African Sugar Technologists Association, 38-41.

O'Leary G.J, 2000. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. Field Crops Research, 68:97-111.

Ono Y., Nakanishi T., 1983. Seasonal Changes in growth and yield of sugarcane plants in southwestern islands of Japan. 1. Progress of leaf-emergence on main stem. Japanese journal of Crop Science, 4: 507-509.

Ozier-Lafontaine H., 1992. Disponibilité de l'eau dans un système " sol argileux gonflant – canne à suce – atmosphère ". Application à la recherche d'indicateurs de l'état hydrique. Thèse de doctorat INA-PG. Paris, France, 142p.

Passioura J.B., 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. Journal of the Australian institute of agricultural science, 43 : 117 - 120.

Pellerin S., 1986. Etude d'une série chronologique de rendements en canne à sucre obtenus en Guadeloupe à partir d'un modèle de simulation du bilan hydrique. Agronomie, 6 :91-98.

Pereira A. R., Barbieri V., Vlia Nova N.A., 1983. Climatic conditioning of flowering induction in sugarcane. Agricultural Meteorology, 29: 103-110.

Pereira A.R., Machado E.C., 1986. A dynamic simulator of the sugarcane crop growth. Bragantia Campinas, 45:107-122.

Poser C., 2000. Réactualisation des données sur les besoins en eau des cultures sur la zone Ouest de la Réunion. Projet IRRIGOUEST. Rapport CIRAD-Montpellier. 8p, + Annexes. Pouzet D., Chabalier P.F., Légier P., 1997. Diagnostic de fertilité des sols et conseils en fertilisation des principales cultures réunionaises. Agriculture et Développement, 16 : 18-37.

Raunet M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD, 438p.

Remond J.M., 2002. Validation d'un modèle de croissance de la la canne à sucre et application à l'optimisation d'un calendrier d'irrigation. Mémoire de stage de DEA de l'Université des Antilles et de la Guyane. 43 p.

Ritchie J.T., 1981. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. Plant Soil, 58: 81-96.

Roach B.T., 1986. Evaluation and breeding use of sugarcane. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists. 19: 492-501.

Robertson M.J., Keating B.A., Muchow R.C., 1995. APSIM-Sugar: its history, conceptual basis, uses and wider applications. In: Robertson M.J. (Ed.), Research and Modeling Approaches to Assess Sugarcane Production Opportunities and Constraints. Workshop Proceedings, University od Queensland, St. Lucia, 35-42

Robertson M.J., Muchow R.C., Inman-Bamber N.G., Wood A.W., 1996. Relationship between biomass and sucrose accumulation by sugarcane. In : J.R. Wilson, D.M. Hogarth, J.A. Campbell and A.L. Garside (Editors), Sugarcane : Research Towards Efficient and Sustainable Production. CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures. Pp. 84-86.

Robertson M.J., Donaldson R.A., 1998. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off sugarcane before harvest. Field Crops Research, 55:201-208.

Samuels G., Landrau P.J., 1952. The response of sugarcane to fertilizers. I. The Arecibo cycle, 1944-1950. J Agric Univ Puerto Rico 36:203-229.

Singels A., Kennedy A.J., Bezuidenhout C.N., 2000. The effect of water stress on sugarcane biomass accumulation and partitioning. Proceedings of the South African Sugar Technologists Association, 169-172.

Singels A., Bezuidenhout C.N., 2000. Testing the simulation of dry matter partitioning of the CANEGRO model. Proceedings of the first international workshop on the CANEGRO sugarcane model. South African Sugar Association Experiment Station, Mount Edgecombe. 20-21.

Singh S., Srivastava K.K., 1974. Effects of soil water potential on germination of sugarcane setts. Indian Agric Sc, 44:184-187.

Singh S., 1975. Significance of critical nodal water content of sugarcane sett in germination of bud. Sci Cult (India) 41:475-477.

Singh O, Kanwar R.S., 1986. Association of some cane sett assimilate with germination. Sugar Cane, 2:7-10.

Slabbers P.J., 1980. Practical prediction of actual evapotranspiration. Irrig. Sci., 1:185-196.

Smith J., Smith P., Addiscott T., 1996. Quantitative methods to evaluate and compare Soil Organic Matter (SOM) Models. NATO ASI Series, 138: 181-189.

Smith J.P., Lawn R.J., Nable R.O., 1999. Investigations into the root:shoot relationship of sugarcane, and some implications for crop productivity in the presence of sub-optimal conditions. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 108-113.

Snedecor G.W., Cochran W.G., 1957. Méthodes Statistiques. ACTA. Paris. 649p.

Spitters C.J.T., Toussaint H.A.J.M., Goudriaan J., 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I. Components of incoming radiation. Agric. For. Meteorol., 38: 217-229

Sreenivasan T.V., Ahloowalia B.S., Heinz D.J., 1987. Cytogenetics. In Heinz D.J. Sugarcane improvement through breeding. Elsevier, Amsterdam, 211-253.

Su L.Y., Cruz A.D., Moore P.H., Maretzki A., 1992. The relationship of glyphosate treatment to sugar metabolism in sugarcane : new physiological insights. J Plant Physiol 140:168-173.

Todoroff P., 1999. Diagnostic de fertilité des sols et conseils en fertilisation des principales cultures réunionaises. Agriculture et Développement, 16 : 18-37.

Todoroff P., 2000. La réflectométrie temporelle. Des mesures non destructives de profils hydriques du sol. Agriculture et Développement, 24 48-53.

Van Antwerpen R, Meyer J.H., Inman-Bamber N.G., 1993. Cane root development and crop modelling. In Proceedings of the South African Sugar Technologists Association, 73-77.

Van Antwerpen R., McGlinchey M., Inman-Bamber N.G., Bennie A.T.P., 1996. Estimating root water use in sugarcane. In Proceedings of the South African Sugar Technologists Association, 57-58.

Van Dillewijn C., 1960. Botanique de la canne à sucre. Centre Technique de la Canne et du Sucre de la Guadeloupe et de la Martinique, 391p.

Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Jacob C., Artis P., Chartier M., 1980. Caractérisation et évolution de la structure d'un couvert de canne à sucre. Annales Agronomiques, 31 : 429-454.

Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Chartier M., Artis P., 1981. Evolution de la réponse photosynthétique des feuilles et efficience théorique de la photosynthèse brute d'une culture de canne à sucre (Saccharum officinarum L.). Agronomie, 6(1) : 473-481.

Védié H., 1993. Etude de l'élaboration de l'indice foliaire de la canne à sucre. Mémoire de DAA de l'ENSAM, 38p.

Vercambre B., Latchoumaya M., Gauvin J.C., Tibere R., Tibere A., Tibere D., Langevillers M., 1991. Méthode de détermination d'un seuil de nuisibilité économique pour Holoplochelus marginalis, nouveau ravageur de la canne à sucre à l'île de la Réunion. Premier congrès international de l'AFCAS, Montpellier. 135-138.

Yates R.A, 1983. The influence of pre-harvest temperature and rainfall on cane quality. Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists. 291-309.

Yates R.A., 1996. Factors that affect the quality of sugarcane – Part I : Climate. International Sugar Journal, 98: 281-284.

Whisler F.D., Acock B., Baker D.N., 1986. Crop Simulation Models in Agronomic systems. Advances in Agronomy, 40: 141-207.

Williams J.R., Jones C.A., Dyke P.T., 1984. A modelling approach to determining the relationships between erosion and soil productivity. Trans. Am. Agric. Eng. 27 : 129-144.

ANNEXE 1

Type de sol	Ferallitiques Bruns rouge et rouges	Bruns vertiques	Bruns peu épais	Bruns andiques épais	Andosols désaturés non perhydratés	Andosols désaturés perhydratés
Sites	LM, LB	-	LER, LP, PF	PSL, TI, SB	BER, CO, TB, XB	-
Profondeur	80-120	60-100	50-100	80-150	100-300	200-300
Cailloux	caillouteux	caillouteux	très caillouteux	caillouteux	peu caillouteux	peu caillouteux
PH eau	4.9-5.5	7	5.7-6.5	5-6.5	4.9-6	4.6-5
MO	3-5	3-3.5	4-9	3-5	10-20	15-30
C/N	10	10-11	9-10	10-15	11-13	16-21
CEC	5-10	25-35	10-25	5-15	3-10	8-10
V	50-90	90-100	80-95	50-80	30-50	30-50
P assim	50-200	50-100	30-120	50-250	150-400	100-400

Tableau 13. Caractéristiques des principaux types de sols de la Réunion, cultivés en canne à sucre.

Les caractéristiques de sol ont été mesurées sur l'horizon A (0-20 à 0-30cm). Sites : sites où ont été effectuées des observations.

Profondeur : profondeur maximale du sol (cm)

MO : taux de matière organique (%)

C/N : rapport du carbone sur l'azote

144

CEC : capacité d'échange cationique (meq/100g)

V : taux de saturation de la capacité d'échange cationique (%)

P assim : phosphore assimilable (ppm)

Tableau 14. Réserves utiles utilisées lors du calage et de la validation.

Site	Réserve utile
CO	160
XB	154
TI	100
LP	90
BER	140
LER	90
SB	100
TB	140

Réserve utile : réserve utile (mm) sur le profil racinaire (100 cm)

ANNEXE 2 (1)

<u>Etude de sensibilité</u> : Figures 'démontrant' la sensibilité du modèle à différents paramètres d'élaboration du lai, de l'interception, de la conversion et de la partition de la biomasse.



Figure 58. Sensibilité du lai à 120 jours (CV en %) aux variations de tbase, klaidj et deblai (\pm 36% par pas de 9) par rapport à leurs valeurs calées.



Figure 59. Sensibilité de la matière sèche aérienne msa (CV en %) aux variations de ke, ruemax, tconvopt et ktconv (\pm 36% par pas de 9) par rapport à leurs valeurs calées.



Figure 60. Sensibilité de la matière sèche de tige usinable mstu (CV en %) aux variations de kmstu1 et debmstu (± 36% par pas de 9) par rapport à leurs valeurs calées.



Figure 61. Sensibilité du sucre produit (CV en %) aux variations de ktstrua1, tempsreu et ktempstru (± 36% par pas de 9) par rapport à leurs valeurs calées.

ANNEXE 2 (2)



Figure 62. Sensibilité de la matière sèche aérienne msa (CV en %) aux variations de ruemax (\pm 36% par pas de 9) par rapport à sa valeur calée, selon la valeur de ke.



Figure 63. Sensibilité de la matière sèche de tige usinable mstu (CV en %) aux variations de kmstu1 (\pm 36% par pas de 9) par rapport à sa valeur calée.



Figure 64. Sensibilité du sucre produit (CV en %) aux variations de tempstru (± 36% par pas de 9) par rapport à sa valeur calée, selon la valeur de ktstru1



Figure 65. Sensibilité du rendement canne rdcan (CV en %) aux variations de krdw1 (\pm 36% par pas de 9) par rapport à sa valeur calée, sélon la valeur de krdw2.

ANNEXE 3 (1)

Variabilité de la croissance et des potentialités de la canne à sucre à la Réunion Utilisation du modèle de croissance Mosicas

J.F. Martiné

Actes du congrès ARTAS/AFCAS. Saint Denis de la Réunion, 1997. 353-365.

<u>Résumé</u>

A la Réunion, région où la diversité des conditions climatiques est importante, les décisions techniques et économiques concernant la culture de la canne à sucre nécessitent des références adaptées à chaque zone climatique homogène. Dans ce contexte, l'emploi d'un modèle de croissance, validé dans des sites climatiques contrastés, permet de régionaliser les préconisations sans recourir à une expérimentation longue, lourde et coûteuse.

A l'aide de MOSICAS, modèle de croissance optimale calé et validé à la Réunion, cette étude se propose de montrer l'intérêt de l'approche modélisatrice en simulant la croissance sur 12 stations climatologiques couvrant l'ensemble de la sole cannière de l'île.

Les résultats de ces simulations ont permis d'analyser successivement la croissance en cours de cycle, les croissances maximales à différentes époques de l'année et enfin les potentialités et l'efficience annuelle d'interception en fin de cycle. Les comparaisons effectuées soulignent l'importance de l'altitude, de la date de coupe, de l'âge et de la variabilité interannuelle et montrent pour chaque paramètre l'influence relative du rayonnement et de la température.

La forte variabilité de la croissance de la canne à la Réunion, constatée à l'issue de chacune de ces analyses, met en évidence la nécessité de régionaliser, d'adapter aux dates de coupe et aux différentes périodes d'interventions, les préconisations techniques.

Mots-clé : Canne à sucre, Modèle de croissance, Rayonnement, Température, Réunion.

Objectifs

Cette application du modèle de croissance Mosicas (calé sur des repousses de R570) avait pour objectif de déterminer, en absence de contrainte hydrique, et sur l'ensemble de la Réunion :

- La croissance au cours du cycle de végétation,
- La croissance potentielle suivant les différentes périodes de l'année,
- Les potentialités et l'efficience d'utilisation du rayonnement à la récolte.

Matériel et méthodes

Les simulations ont été exécutées sur les années communes des stations météorologiques mentionnées dans le tableau 15 ci-dessous.

Pour chaque année et chaque station nous avons testé trois dates de récolte correspondant au début (01/08) au milieu (01/10) et à la fin (01/12) de la période de récolte qui s 'étale de mi-juillet à mi-décembre.

Le contexte climatique est caractérisé par les relations entre altitude, température et rayonnement représentées sur les figures 66 et 67. La figure 67 montre qu'il existe une

relation nette entre l'altitude et la température et plus lâche entre l'altitude et le rayonnement incident.

ANNEXE 3	(2)
-----------------	-----

Stations	Altitude	Température	Rayonnement	Origine
	(m)	moyenne	Moyen	des données
		°C	MJm⁻²	
le Port	11	25.2	18.0	Météo France
Gillot	21	24.1	19.5	Météo France
Beaufonds (St Benoît)	40	23.2	17.8	Cirad, Météo France
St Pierre	52	23.9	20.6	Météo France
Pierrefonds	58	23.5	19.6	Cirad
Le Baril	130	22.8	15.5	Météo France
Ligne Paradis	150	22.8	19.0	Cirad
St Leu (Leroy)	220	23.2	17.4	Cirad
Terre Rouge	300	21.7	18.5	Cirad
Bellevue Bras Panon	510	20.3	14.8	Météo France
Piton St Leu	565	19.7	15.3	Cirad
Colimaçons	780	18.7	13.5	Cirad

Tableau 15. Caractéristiques des stations météorologiques utilisées lors de l'étude sur la Variabilité de la croissance et des potentialités de la canne à sucre à la Réunion

Résultats

Les principaux résultats décrits au chapitre III.6.1.1 sont représentés sur les figures 57 et 66 à 70.



Figure 66. Relation entre les température et le rayonnement moyen annuels sur 12 stations météorologiques de la Réunion. Les étiquettes représentées correspondent aux altitudes des stations en m.

ANNEXE 3 (3)



Figure 67. Température et rayonnement moyens annuels selon l'altitude sur 12 stations météorologiques de la Réunion.



Figure 68. Efficience d'interception moyenne simulée sur un cycle de récolte d'un an selon l'altitude pour 12 stations météorologiques de la Réunion

ANNEXE 3 (4)



Figure 69. Apparition des tiges usinables (jours après coupe précédente) selon l'altitude pour des cannes coupées en début (juillet) et en fin (Décembre) de campagne.



Figure 70. Accumulation journalière maximale simulée de matière sèche de tige usinable (couvert fermé) selon le mois de l'année au niveau de 5 stations météorologiques.

ANNEXE 4 (1)

Validation d'un modèle de croissance de la canne à sucre et application à l'optimisation d'un calendrier d'irrigation J.M. Remond J.M.

Mémoire de stage de DEA de l'Université des Antilles et de la Guyane. 2002. 43 p.

Résumé

L'étude présentée ici estime les limites de validité du modèle de croissance de la canne à sucre MOSICAS en conditions réelles, sur 85 parcelles situées en Guadeloupe.

Pour cela, nous effectuons des comparaisons entre les rendements observés et les rendements simulés, puis nous analysons les résidus. Le modèle est développé pour la variété R 570 et les cannes plantées et de 1ère repousse ; L'étude des résidus met en évidence un effet du stade de repousse d'autant plus marqué que le stade est ancien, un effet de la variété avec moins d'erreurs pour les B 80689, B 82139 et R 570 et un effet de la profondeur de sol avec des résidus moins importants quand le sol est peu profond (moins de 30 cm).

Le modèle est ensuite appliqué à l'optimisation d'un calendrier d'irrigation. Les simulations ont permis de déterminer l'efficience moyenne de l'eau (0.129 Tha⁻¹mm⁻¹) sur le cycle de croissance 1999/2000. Elles ont également permis de comparer les 4 calendriers envisagés et de déterminer le meilleur selon les objectifs voulus : meilleure efficience d'irrigation (0.092 Tha⁻¹mm⁻¹ d'eau apporté) pour une fréquence d'irrigation de 5 jours, ou meilleur gain économique pour une fréquence de 10 mm tous les 2 jours.

Matériel et Méthodes

Cette application avait pour objectif d'<u>évaluer</u> le modèle de croissance dans les conditions d'exploitation du périmètre sucrier de Gardel en Guadeloupe et de l'appliquer à l'optimisation de stratégies d'irrigation.

La modèle utilisé comprenait le module de croissance Mosicas couplé au modèle de bilan hydrique p-factor de la FAO. Ce bilan hydrique, intégré dans la plate-forme Simulex, produit des estimations équivalentes à celles du modèle Ceres dans les mêmes conditions d'alimentations hydriques contrastées.

Les simulations ont été réalisées sur les 84 parcelles récoltées en 2000 comprenant 8 variétés dont la R570 et des cycles de récolte s'étalant de la vierge à la 11^{ème} repousse

Les données climatiques utilisées provenaient d'un poste météorologique proche et de 9 postes pluviométriques répartis sur l'exploitation dont le relief est homogène. La profondeur de sol de chaque parcelle, estimée par la méthode de résistivité électrique, a servi à déterminer directement la réserve utile en considérant que cette dernière était proportionnelle à cette profondeur.

L'étude porte essentiellement sur la variabilité des rendements canne et les écarts relatifs (%) entre rendements canne simulés et observés calculés de la façon suivante :

Ecart relatif = 100 * (rendements simulés – observés) / rendementsobservés

ANNEXE 4 (2)

Les principaux résultats décrits au chapitres III.6.1.3 et II.6.1.4 sont représentés sur les figures 60 et 71 à 74.



Figure 71. Ecarts entre rendements canne simulés et observés selon le rendement canne simulé. Y=0.88X-45.3, n=84, r^2 =0.57, p<0.01.



Figure 72. Ecarts relatifs (%) entre rendements canne selon le cycle de récolte.. Vierge=0, 1^{ère} repousse=1,

ANNEXE 4 (2)



Figure 73. Ecarts relatifs (%) entre rendements canne selon la variété.



Figure 74. Ecarts relatifs (%) entre rendements canne selon la profondeur du sol.

ANNEXE 5 (1)

Une plate-forme de simulation comme outil d'analyse et d'aide à la décision : SIMULEX.

J .F. Martiné, J.C. Combres et M. Mézino. (CIRAD) In Actes de l'AFCAS/GPS 2001. Yaoundé Juin 2001. 91-103.

Cette communication, présentée au Congrès AFCAS/PRG en Juin 2001, développait l'état des modèles, la plate-forme Simulex et quelques applications exposées dans cette thèse. Nous ne présentons donc que la partie concernant la description de la plate-forme de simulation (SIMULEX).

La plate-forme de simulation

La construction de modèles par plusieurs chercheurs (modélisation) et leur application (simulation) nécessitent la manipulation de jeux de données complexes (situation, itinéraires techniques, météo, sol, plante, observations, irrigations,...) et de modèles multiples (jeux de modules, paramètres d'équations). L'utilisation de cet ensemble, qui doit être cohérent et convivial, requiert une plate-forme de simulation.



La plate-forme Simulex (Martiné et al, 1999) écrite en Visual Basic 6 (voir schéma ci-dessus) comprend des bases de données (Access) et du code. Ce dernier inclut un moteur de simulation, des modèles organisés de façon modulaire, et des modules de gestion des données et de lancement de simulations. Cette plate-forme a donc trois principales fonctionnalités :

- La gestion des données, qui facilite la création, la modification et la suppression des données.

- La création de modèles qui permet de construire des modèles à partir de modules

- La simulation qui, sur des traitements choisis (cycles de culture), simule les états du couvert (rendement, richesse,..), du sol (stock,..) et des variables bioclimatiques (besoins en eau, rayonnement intercepté,..) Des options de simulations permettent de choisir le type de simulation, les traitements, le(s) modèle(s), les modalités d'irrigation, les sorties (et leurs fréquences) qu'elles soient simulées ou observées.

La gestion des données et la base de données

Afin d'optimiser la gestion de fichiers devenant rapidement trop nombreux, l'ensemble des données est inclus dans deux bases de données relationnelles de type jet (Access). Les tables principales de ces bases et leurs relations sont représentées ci-dessous.



Les données peuvent être modifiées, ajoutées ou supprimées directement à partir du logiciel, comme le montrent les options du menu "données" représenté ci-dessous. Certaines options permettent de remplir les tables à partir de feuilles Excel, adaptées aux tables d'Access, plus faciles d'emploi (météo, irrigation,..).

🖷, SIM	ULEX	
Fichier	Données Modèles/Variables	Simulations Résultats Dutils
	Site/Exploitation > Parcelle > Traitements/Cycles > Imgation >	
	Dossiers de traitements 🕨	
	Sol ► −Plante ►	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Meteo → Pluvia →	а — — — — — — — — — — — — — — — — — — —
	Observations 🔸	



<u>Principe de gestion des bases de données de Simulex</u>: Les simulations se font sur des <u>traitements</u> (ou itinéraires techniques) appliqués à des <u>parcelle</u>s géoréférencées, ellesmêmes situées sur des <u>sites</u> (exploitations ou bassins). Sur les traitements peuvent être effectuées des <u>observations</u> (rendement,). Les parcelles sont reliées aux données environnementales "climat et sol". On peut affecter plusieurs stations météo ou pluvio à chaque parcelle. L'utilisateur doit alors fournir les poids respectifs de chaque station ou autoriser Simulex à les calculer. Le simulateur calcule alors une moyenne pondérée des paramètres climatiques quotidiens.

Les principales données d'entrée nécessaires sont :

<u>Météo</u> : les codes et noms des stations avec les valeurs journalières de : pluie, températures mini et maxi, ETP et rayonnement global,

Sol : Réserve utile (mm/m) et la profondeur du sol,

Parcelle : (noms du sol et des stations météorologiques, latitude, longitude,

<u>Traitement</u> : dates de coupe précédente et de récolte, profondeur d'enracinement, stock utile initial, variété.

Les différents types et options de simulation

Une fois les données entrées (climat, sol, parcelles, traitements, observations) des simulations peuvent être exécutées. Comme le montre la boite de dialogue de lancement de simulation ci-dessous, le logiciel propose divers choix sur les types de simulation, les modèles, les traitements, les sorties (calculées ou observées), leurs fréquences et des options concernant l'irrigation.

Général	Sorties	Sensibilité/Calage	Options
Fichier Sortie	Modeles		
Tope Simulation © Normal © Sensibilité © Calage		<u></u>	
Dossier/Taitement Dossiers Traitements Moyenne dossier	- Dossiers/Traiteme	nts	
OK		<u> </u>	
Annuler			

Types de simulation :

- Type normal On ne fait varier aucun paramètre d'entrée.
- Type sensibilité On fait varier un ou plusieurs paramètres d'entrée (réserve utile, profondeur, fréquence d'irrigation,..) et on observe leur effet sur des variables de sorties telles que le rendement, les besoins en eau (ETM). La consommation (ETR), ...
- Type calage On cale un ou plusieurs paramètres d'entée sur une variable observée telle que la hauteur des cannes ou le rendement. Par comparaison des observations et des résultats observés, un fichier de sortie donne pour chaque valeur de paramètre des résultats statistiques tels que la rmse, permettant ainsi de choisir la valeur du paramètres donnant le rmse le plus faible. Il n'y a pas de procédure d'optimisation

Options d'irrigation :

Il est permis de faire agir ou non l'effet du stress hydrique sur la croissance. Les simulations sont exécutées, au choix, en pluvial strict ou en pluvial avec irrigations réelles. De plus, des irrigations fictives peuvent être générées selon des fréquences d'irrigation variables et des stratégies d'irrigation paramétrables, telles que le seuil de déclenchement, le taux de remplissage de la réserve du sol et la période d'arrêt avant récolte. Ces options sont surtout utilisées pour évaluer les rendements espérés, les besoins et consommations en eau suivant des stratégies d'irrigation fixées par l'utilisateur.

Pour des besoins de recherche, en cours de simulation, les valeurs de plusieurs variables d'état peuvent être remplacées par les valeurs des variables observées.

<u>Résultats</u>

Le fichier résultat produit est un fichier texte (.csv) constitué d'un seul tableau mentionnant les modèles utilisés, les valeurs des paramètres que l'on fait varier, les traitements, les résultats de simulation et les observations. Ce fichier peut être repris sur tableur (Excel) ou logiciel de statistique (S-Plus, Matlab, ...). Son organisation permet une comparaison rapide entre résultats simulés et observations, et entre traitements.

Summary

In a situation of sustainable economic optimisation of resources, the current problems to be dealt with by agronomic research are becoming increasing difficult to resolve. In fact the solutions sought, which need to be found quickly, often with limited resources, necessitate testing a vast range of possible scenarios in very diverse environments.

Expertise generally provides approximate solutions and classical experimentation, which is very costly and time-consuming, can only test a limited number of strategies over a few years and sites. Sugar cane, which is a large plant with a long life cycle, hardly lends itself to this latter approach.

Thanks to the development of our knowledge of plant function and of rapid methods for measurement and simulation, biophysical models of growth allow the simulation of an infinite number of strategies under various conditions within the area of their validity and thus permit the evaluation of the risks incurred with any particular proposed cultural practice.

In 1992, because the existing models suffered from major limitations, CIRAD decided to undertake, in La Réunion, the development of a new model, and then to use it as an analytical tool and a decision aid.

First of all the special nature of sugar cane required modifications of methodology, notably the development of a relatively non-destructive method for measuring biomass and leaf area index.

Next, in conjunction with a water balance model such as Ceres, the growth model Mosicas was developed by making use of the most appropriate sub-routines from other existing models and a network of observations in very contrasting environments. We then validated this model with a dataset independent of that used for calibration and carried out a sensitivity study on the main parameters. The results show that the model gives a very satisfactory estimate of sugar cane yields and compared with other models developed and validated elsewhere during the same period it appears to be more suitable, at least under our conditions.

Also, because Mosicas has to be applicable both to individual fields within the sugar factory's collection area and to estates, we developed a Simulex simulation platform. Finally, using this operational setup, we have already been able to carry out tests to determine potential yields, to compare simulated and observed yields, and to optimise scenarios, mostly concerned with irrigation.

The various shortcomings of the model revealed during its testing required adjustments to the estimation of thermal time, the inclusion of stem mortality, regrowth after moisture stress and a means of calculating sugar content.

Although this model is in use, the cultural choices made during its construction (first ration, 12-14 month growth cycles, row spacing of about 1.5 m, the single variety R570, optimal mineral nutrition) limit its applicability. Its extension will require a widening of the present scope - to include plant cane, ageing of rations, long growth cycles, different spacing and other varieties.

Finally, an extension of the area of application of the model and its range of use is expected, particularly as an aid to the creation and selection of varieties.

Key words: sugar cane, growth model, temperature, radiation, water stress, use of models.

• .

Résumé

Dans un contexte d'optimisation économique durable des ressources, les problèmes actuels posés à la recherche agronomique sont de plus en plus difficiles à résoudre. En effet les solutions recherchées, qui doivent être trouvées rapidement avec des moyens souvent limités, nécessitent de tester une vaste gamme de scénarios possibles dans des milieux très divers.

L'expertise fournit des solutions généralement approximatives, et l'expérimentation classique , très coûteuse et longue, ne peut tester qu'un nombre restreint de stratégies sur peu d'années et de sites. La canne à sucre, de grande dimension et de cycle long, se prête difficilement à cette dernière démarche

Grâce au développement de nos connaissances sur le fonctionnement des plantes et de moyens rapides de mesures et de simulations, les modèles biophysiques de croissance permettent de simuler une infinité de stratégies dans de multiples conditions situées dans leur domaine de validité, et autorisent ainsi l'évaluation des risques encourus selon les itinéraires techniques envisagés.

En 1992, les modèles existants présentant des limites majeures, le CIRAD a décidé d' entreprendre à la Réunion le développement d'un nouveau modèle puis de l'utiliser comme outil d'analyse et d'aide à la décision.

Dans un premier temps, les spécificités de la canne ont nécessité des adaptations d'ordre méthodologiques, notamment la mise au point d'une méthode de mesure peu destructive de la biomasse et de l'indice foliaire.

Puis, en liaison avec un bilan hydrique de type Ceres, le modèle de croissance Mosicas a été construit en utilisant les formalisations les plus judicieuses issues des autres modèles existants, et un dispositif d'observations en milieux très contrastés. Nous avons ensuite validé ce modèle sur un jeu de données indépendant de celui ayant servi au calage, et réalisé une étude de sensibilité aux principaux paramètres. Les résultats montrent que ce modèle estime de façon très satisfaisante les rendements canne et sucre et, confronté aux modèles qui ont été développés et validés ailleurs dans la même période, il s'avère plus pertinent, au moins sur notre site.

De plus, Mosicas devant être appliqué sur les parcelles de bassins ou de grandes exploitations, nous avons développé une plate-forme de simulation Simulex. Enfin, à l'aide de cet ensemble opérationnel, nous avons déjà pu effectuer des applications de détermination de potentialités, d'estimations et d'analyse de production, et d'optimisation de scénarios concernant essentiellement l'irrigation.

Les quelques biais du modèle, constatés lors de son évaluation, nécessitent des ajustements de l'évaluation du temps thermique, de la prise en compte de la mortalité des tiges, de la reprise de croissance après un stress hydrique, et de la formalisation de la richesse en sucre.

Bien que ce modèle soit opérationnel, les choix culturaux adoptés lors de sa construction (repousses de premier ordre, cycles de 12 à 14 mois, écartements proches de 1.5 m, variété unique R570, alimentation minérale optimale) limitent l'applicabilité du modèle. Son extension demande un élargissement des formalismes existants : à la canne vierge, au vieillissement des repousses, aux cycles longs, aux différents écartements et autres variétés. Enfin, une extension de l'aire d'application du modèle et de sa gamme d'utilisation est prévue, notamment en ce qui concerne l'aide à la création et la sélection variétale.

Mots clés : canne à sucre, modèle de croissance, température, rayonnement, stress hydrique, utilisation des modèles.