



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté par

Pascalie SMITH

En vue de l'obtention du

Diplôme d'Agronomie Approfondie

Sciences et Techniques des Productions végétales
Option : Ingénierie des Agrosystèmes

**Établissement de correspondances entre le
fonctionnement physiologique de la canne à sucre
et les concepts du modèle**



Calibration des modules de développement, de croissance aérienne,
d'élaboration du rendement et de la qualité pour la variété R570

Responsables du stage : Françoise Ruget
Jean-François Martiné

Soutenance devant le jury d'examen le 14 septembre 2001

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier toute l'équipe de l'unité C.S.E. de l'INRA d'Avignon ainsi que le personnel de la station CIRAD de la Bretagne à la Réunion pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur. Tous ont contribué à rendre l'ambiance de travail de mon stage très agréable.

Un grand merci à Françoise RUGET et Jean-François MARTINE qui ont assuré l'encadrement de ce stage, et ce, avec disponibilité, gentillesse, patience et dévouement jusqu'au bout. Je les remercie également pour la grande autonomie qu'ils m'ont laissée dans la gestion de mon temps. J'ai enfin apprécié les discussions que nous avons pu avoir sur des sujets variés.

Je voudrais remercier aussi Nadine BRISSON pour le temps qu'elle a consacré à m'apporter des informations précieuses pour l'avancement de mon travail malgré son emploi du temps très chargé. Je remercie par ailleurs Dominique RIPOCHE pour son efficacité dans la résolution des nombreux problèmes informatiques auxquels j'ai été confrontée lors de la prise en main du modèle STICS.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à Michel et Richard pour le bon temps passé ensemble dans les champs de canne et l'efficacité des mesures ainsi qu'à Marie-Pierre et Tilda pour l'aperçu qu'elles m'ont donné de l'île de la Réunion.

Je ne saurais oublier les moments forts passés avec toute l'équipe des « stagiaires-thésards-CDD » à Avignon, ni la colocation et les expériences inoubliables vécues avec les stagiaires, thésards et VAT à la Réunion. Je dois beaucoup à ceux et celles qui se reconnaîtront et dont l'aide m'a été précieuse dans les moments difficiles. Merci en particulier à Michaël, pour tous les services qu'il m'a rendus et sans qui ce mémoire ne serait pas ce qu'il est.

Merci aussi à Tanguy pour son soutien moral malgré la distance...

Merci enfin à mes professeurs de l'ENSAR dont les conseils éclairés m'ont été utiles.



SOMMAIRE

Introduction.....	1
-------------------	---

1 ère PARTIE : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I. LA CANNE À SUCRE DANS SON ENVIRONNEMENT ÉCONOMIQUE ET NATUREL.....	2
I.A. La demande des différentes filières et la production cannière.....	2
<i>I.A.1. Des débouchés variés.....</i>	<i>2</i>
<i>I.A.2. Les exigences de l'industrie sucrière et rhumière : caractères recherchés dans les variétés.....</i>	<i>2</i>
<i>I.A.3. Les différents cycles de culture, pratiques et rendements.....</i>	<i>3</i>
I.B. Le milieu : climats et sols de l'île de la Réunion.....	5
<i>I.B.1. Des climats contrastés.....</i>	<i>5</i>
<i>I.B.2. Des sols d'origine volcanique aux propriétés particulières.....</i>	<i>6</i>
II. LE FONCTIONNEMENT ÉCOPHYSIOLOGIQUE DE LA CANNE À SUCRE.....	8
II.A. Les phases du cycle de la canne.....	8
<i>II.A.1. Un développement original (comparé aux autres graminées cultivées).....</i>	<i>8</i>
<i>II.A.2. Elaboration du rendement et facteurs de variation.....</i>	<i>12</i>
II.B. Fonctions physiologiques de la canne à sucre.....	13
<i>II.B.1. Assimilation.....</i>	<i>13</i>
<i>II.B.2. Absorption minérale et action des stress.....</i>	<i>16</i>
III. LA MODÉLISATION, LES MODÈLES CANNE ET LE MODÈLE STICS.....	17
III.A. Généralités sur les modèles de simulation de culture.....	17
<i>III.A.1. Définitions.....</i>	<i>17</i>
<i>III.A.2. Les différentes étapes de construction d'un modèle.....</i>	<i>18</i>
<i>III.A.3. Besoin en modèles et utilisation.....</i>	<i>18</i>
III.B. Avantages et limites des modèles de simulation de la culture de canne existants.....	18
III.C. Les particularités du modèle STICS.....	19
<i>III.C.1. Généralités et principes de généricité et de modularité.....</i>	<i>19</i>
<i>III.C.2. Concepts et formalismes du module de « Développement ».....</i>	<i>21</i>
<i>III.C.3. Concepts et formalismes du module de « Croissance aérienne ».....</i>	<i>22</i>
<i>III.C.4. Quelques précisions sur le module de « Croissance racinaire ».....</i>	<i>25</i>
<i>III.C.5. Concepts et formalismes du module de « Elaboration du rendement ».....</i>	<i>26</i>

MATERIEL ET METHODES

I. PRÉLIMINAIRES NÉCESSAIRES À L'ADAPTATION DE STICS À LA CANNE À SUCRE	29
I.A. Compréhension et confrontation des fonctionnements d'un couvert de canne à sucre et du modèle de simulation STICS	29
I.B. Besoins de STICS pour son exécution optimale	29
<i>I.B.1. Renseignement des fichiers d'entrée</i>	<i>30</i>
<i>I.B.2. Exécution des simulations</i>	<i>32</i>
 II. DÉMARCHE ADOPTÉE POUR LA CALIBRATION DES MODULES DE PHYSIOLOGIE DES PARTIES AÉRIENNES	 34
II.A. Point sur l'état initial de « STICS-canne »	34
II.B. Choix des options de simulation et donc des formalismes actifs	34
II.C. Choix de l'ordre de renseignement des paramètres des modules étudiés	35
II.D. Choix des valeurs à attribuer aux paramètres et évolution de ces valeurs	36
<i>II.D.1. Première attribution de valeurs d'après différentes sources</i>	<i>36</i>
<i>II.D.2. Amélioration par ajustement aux données observées : principe d'optimisation</i>	<i>36</i>
 III. DÉFINITION DU JEU DE DONNÉES DE CALAGE UTILISÉ	 38
III.A. A partir des données CIRAD-Réunion 94-99	38
<i>III.A.1. Caractéristiques des essais de suivi du cycle de la variété R570</i>	<i>38</i>
<i>III.A.2. Sélection des situations à conserver pour le calage</i>	<i>39</i>
III.B. Méthodologie d'acquisition de ces données :	
exemple du suivi de biomasse aérienne (juin 2001)	41
<i>III.B.1. Caractéristiques du site et positionnement dans le suivi</i>	<i>41</i>
<i>III.B.2. Choix de la méthode et principe de suivi indirect et non destructif</i>	<i>41</i>
<i>III.B.3. Application de la méthode définie</i>	<i>42</i>

RESULTATS - DISCUSSION

I. RÉSULTATS DU TRAITEMENT DES DONNÉES DE TERRAIN ET DE L'ANALYSE DES OBSERVATIONS CIRAD-REUNION.....	46
I.A. Estimation de la biomasse aérienne et de ses composantes pour l'essai à Cesaria.....	46
<i>I.A.1. Présentation des différents résultats.....</i>	<i>46</i>
<i>I.A.2. Des relations conformes à nos attentes.....</i>	<i>46</i>
<i>I.A.3. Interprétations.....</i>	<i>47</i>
<i>I.A.4. Limites.....</i>	<i>47</i>
<i>I.A.5. Informations utiles pour le calage.....</i>	<i>47</i>
I.B. Ce qu'on peut tirer des données observées antérieures pour faciliter le calage.....	48
<i>I.B.1. Dynamique d'évolution des tiges et des masse et surface foliaires.....</i>	<i>48</i>
<i>I.B.2. Phases du cycle et évolution biochimique.....</i>	<i>49</i>
<i>I.B.3. Ordres de grandeur de rendement en cannes usinables et sucre à la récolte.....</i>	<i>49</i>
II. BILAN DE LA CONFRONTATION DU FONCTIONNEMENT RÉEL DE LA CANNE À SUCRE À SA MODÉLISATION DANS STICS.....	50
II.A. Etablissement de correspondances entre les processus écophysologiques chez la canne et les concepts et formalismes de Stics.....	50
<i>II.A.1. Démarrage de la culture.....</i>	<i>50</i>
<i>II.A.2. Stades de développement, croissance « indéterminée » et sénescence.....</i>	<i>51</i>
<i>II.A.3. mise en place et maturation des organes récoltés chez la canne, phase délicate à modéliser avec STICS.....</i>	<i>52</i>
II.B. Orientation de l'évolution de Stics.....	56
III. TEST DES CHOIX RÉALISÉS ET OBTENTION D'UN JEU DE PARAMÈTRES PAR CALIBRATION.....	58
III.A. Bilan de la 1ère attribution de valeurs aux paramètres.....	58
<i>III.A.1. Récapitulatif des valeurs attribuées et des sources.....</i>	<i>58</i>
<i>III.A.2. Résultats des simulations effectuées avec ces valeurs.....</i>	<i>58</i>
III.B. Amélioration de la qualité des simulations après optimisation des paramètres.....	59
<i>III.B.1. Choix des paramètres à optimiser et du mode d'optimisation.....</i>	<i>59</i>
<i>III.B.2. Bilan de l'amélioration statistique du jeu de paramètres proposé.....</i>	<i>59</i>
<i>III.B.3. Cause des écarts persistants.....</i>	<i>60</i>

IV. DOMAINE DE VALIDITÉ DE LA PARAMÉTRISATION, LIMITES ET PERSPECTIVES..	62
IV.A. Aspects variétaux.....	62
IV.B. Aspects agronomiques et techniques.....	62
IV.C. Conditions pédoclimatiques.....	62
Conclusion.....	63

Bibliographie

ANNEXES

Introduction

Dans un contexte où la ressource en eau est limitée par rapport aux besoins des cultures, et inégalement répartie comme c'est le cas à l'île de la Réunion, il devient impératif d'optimiser l'utilisation de l'eau disponible. En même temps, le « sevrage », ou effet bénéfique du stress hydrique sur l'accumulation du sucre en fin de cycle, est de plus en plus pratiqué dans les pays producteurs de canne à sucre. Le besoin d'une gestion précise des apports d'eau est exprimé par la filière et conditionne l'organisation de la récolte qui nécessite l'établissement de plans d'arrêt d'irrigation.

Une bonne connaissance du fonctionnement de la plante, de son interaction avec le milieu et de sa réponse aux pratiques culturales donne des éléments de réponse à la question : « Quel scénario d'irrigation permettrait d'optimiser la récolte en sucre ? ». Cependant, l'expérimentation qui permet de mieux comprendre les processus écophysologiques impliqués dans l'élaboration du rendement de la canne et de sa qualité sucrière s'avère longue et coûteuse. C'est dans ce cadre que se sont développés des modèles de simulation de la croissance d'un peuplement végétal cultivé. Ces modèles simulent au travers d'un ensemble de relations mathématiques l'évolution d'une culture dans son contexte pédo-climatique et technique et sont utilisés en fonction d'objectifs variés. Différents modèles ont été conçus pour répondre spécifiquement aux problèmes liés à la culture de canne. L'application du modèle STICS créé pour permettre de raisonner la conduite des cultures et assurer l'optimum économique en préservant l'environnement peut s'avérer intéressante dans le contexte de l'étude du sevrage. L'étude de la capacité de STICS, modèle générique mis au point par l'INRA et divers partenaires, à répondre aux objectifs de conseil en irrigation du CIRAD de la Réunion passe par une phase de confrontation du modèle et de la plante. L'intégration de la canne à sucre parmi les autres cultures dont le fonctionnement est modélisé par STICS soulève des difficultés dont la résolution par étape fera l'objet de notre travail. L'hypothèse d'un certain degré de fonctionnement commun entre les différentes espèces du monde végétal est à l'origine de la proposition d'utiliser STICS pour modéliser la croissance de cette graminée cultivée en milieu tropical pour le sucre de ses tiges.

L'« adaptation » d'un modèle à une culture nécessite d'entrer dans les équations qui lui permettent de représenter la réalité de façon simplifiée. La première étape et non la moindre consiste à attribuer aux paramètres de ces relations, des valeurs issues de la connaissance bibliographique ou expérimentale du fonctionnement de la culture, afin de faire tourner le modèle d'abord en conditions optimales. Il est souvent nécessaire ensuite d'améliorer ces valeurs par ajustement à des jeux de données sélectionnés selon les objectifs, avant d'intégrer ultérieurement les contraintes de stress. Nous allons cibler notre travail sur les parties aériennes de la culture, au vu de leur importance dans l'interception et la conversion du rayonnement en biomasse et sa répartition dans les organes de stockage. Ceci permettra d'aboutir à la proposition d'un jeu de paramètres pour la variété la plus utilisée à la Réunion. Nous aurons ainsi effectué une partie du cheminement qui mènera, à terme, STICS, avec ses avantages et limites, à aider les producteurs de canne à sucre dans leurs décisions stratégiques en matière d'irrigation.

1^{ère} PARTIE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CANNE A SUCRE SCHÉMA DE FABRICATION DES PRODUITS

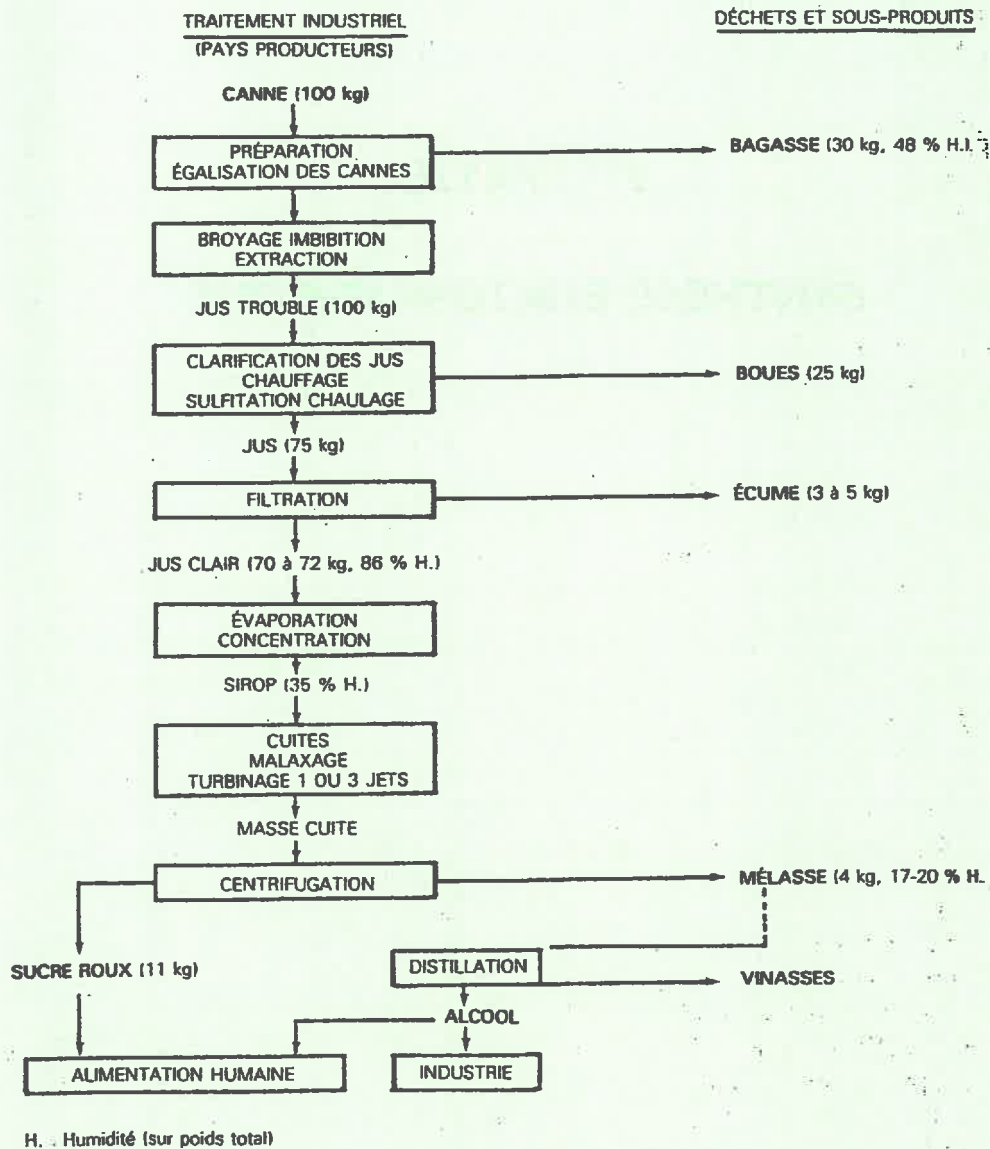


Figure 1.1 : La filière canne à sucre (Memento de l'Agronome, 1993)

I. LA CANNE A SUCRE DANS SON ENVIRONNEMENT ECONOMIQUE ET NATUREL

La production de canne à sucre est une production agro-industrielle de premier ordre qui fait l'objet d'une forte demande en particulier dans les pays en voie de développement. Après avoir précisé les besoins de la filière et présenté le milieu dans lequel la canne est cultivée, nous analyserons plus précisément la physiologie de son développement et de l'élaboration de son rendement. Nous présenterons ensuite les modèles qui s'attachent à simuler sa croissance et analyserons les particularités du modèle STICS qui compliquent son adaptation à la canne.

I.A. La demande des différentes filières et la production cannière

I.A.1. Des débouchés variés

La canne à sucre est cultivée pour ses tiges qui contiennent un jus sucré dont on tire le saccharose ou sucre cristallisable. A partir du jus de canne on fabrique également du rhum agricole et diverses boissons alcoolisées. La teneur en sucre à la récolte représente en général 12-13 % de la matière fraîche des tiges coupées et diminue de la base vers le sommet (Fauconnier, 1991 ; Fahrasmane & Ganou-Parfait, 1997). 7-8 % du sucre contenu dans le matériel végétal frais ne peuvent être extraits par cristallisation et restent dans la mélasse, sous-produit contenant autour de 50 % de sucre et économiquement très important : elle est utilisée en levurerie ou, après fermentation, en distillerie pour produire rhums et alcools industriels (cf. Fig. 1.1). Elle sert aussi d'aliment du bétail, directement ou en mélanges. 20-30 % du matériel végétal frais restent à l'état de bagasse (à environ 50 % d'humidité), résidu ligneux employé comme combustible (Rehm & Espig, 1991). Les écumes de filtration, les cendres de bagasse et les vinasses de distillerie peuvent servir d'amendement pour les terres (Mémento de l'Agronome, 1993). En restituant aux sols les divers sous-produits de l'usine, on réduit sensiblement et économiquement les besoins en fertilisants (Fauconnier, 1991). Les « bouts blancs » ou extrémités supérieures des tiges coupées lors de la récolte peuvent être servis comme fourrages pour les animaux. La canne est d'ailleurs parfois cultivée comme canne fourragère (consommation en vert ou en ensilage) ou comme canne de bouche (consommation directe) (Mémento de l'Agronome, 1993).

I.A.2. Les exigences de l'industrie sucrière et rhumière : caractères recherchés dans les variétés

Dans la sélection de la canne, le saccharose a été privilégié au détriment des co-produits issus du non-sucre et les critères actuels de sélection sont toujours exclusivement tournés vers la sucrerie. Cependant, l'émergence de la notion de « canne à rhum » semble nécessaire car la filière rhum exprime des besoins spécifiques : l'augmentation de la fraction de non-sucre fournirait une matière première mieux adaptée à la fermentation rhumière (Parfait & Fahrasmane, 1989 ; Fahrasmane & Ganou-Parfait, 1997). Nous ne nous intéresserons qu'aux cannes cultivées pour la production de sucre cristallisé.

I.A.2.a. Qualités pour la transformation

La canne dite « noble » correspond à l'espèce *Saccharum Officinarum* (de la famille des Graminées) et constitue la base à partir de laquelle sont créées les variétés hybrides cultivées de nos jours. Les qualités apportées par la canne noble incluent le fort taux de sucre, la pureté du jus (soit un faible taux de non sucre), le faible taux de fibres (Rehm & Espig, 1991), le tout facilitant l'extraction.

I.A.2.b. Qualités agronomiques

La canne noble apporte aussi la vigueur et la résistance mécanique des tiges (Bull & Glasziou, 1975). La réponse aux exigences particulières de l'industrie sucrière moderne amène à faire des hybridations de *Saccharum Officinarum* avec d'autres espèces. Les variétés commerciales obtenues sont généralement plus adaptées aux variations des conditions climatiques (adaptabilité de la durée du cycle, tolérance au froid et à la sécheresse) et plus résistantes aux pathogènes grâce aux croisements avec *S. Robustum* et *S. Spontaneum*. Le produit de ces croisements donne des rendements élevés, un important potentiel de qualités sucrières et facilite la récolte (Fahrasmane & Ganou-Parfait, 1997). Les améliorations possibles consistent en : l'adaptation à la photopériode permettant d'éviter une floraison non désirée (le développement de l'inflorescence de canne à sucre n'ayant pas d'intérêt économique et nuisant à la croissance) (Bull et Glasziou, 1975 ; Nickell, 1977), l'augmentation du poids des cannes, un meilleur tallage, une bonne aptitude à la repousse, une croissance droite et la chute des feuilles sénescentes afin de faciliter la récolte (Rehm & Espig, 1991). Parmi ces variétés, la variété R570 produite à la Réunion est caractérisée par de bons rendements et une richesse en sucre moyenne à bonne, elle est récoltée en milieu ou fin de campagne à la Réunion (octobre-novembre), moment où cette richesse est maximale. C'est une variété rustique qui résiste mieux à la sécheresse que d'autres variétés mais elle résiste moyennement à la verse. Ses feuilles sont très engainantes et le dépaillage naturel (chute des feuilles sénescentes) par conséquent nul (Comm. Pers. Martiné, 2001).

I.A.3. Les différents cycles de culture, pratiques et rendements

I.A.3.a. Les deux cycles de la canne :

- celui allant de plantation à plantation (« **cycle de culture** ») peut durer de 3 à plus de 10 ans selon les pays. En ce qui concerne la Réunion, ce type de cycle dure 4 à 8 ans et le plus généralement, on cultive 5-6 repousses avant de replanter. Cette durée est conditionnée par un seuil de rentabilité que l'exploitant se fixe (Comm. pers. Martiné, 2001) et peut être réduite par les maladies ou ennemis (Fauconnier, 1991). Quand le rendement des repousses successives tend à s'abaisser par la réduction de la population de tiges et de leur longueur (Lingle, 1999), on renouvelle la plantation après élimination des souches et préparations des sols (Fauconnier, 1991 ; Mémento de l'Agronome, 1993).

- celui allant de plantation à première coupe ou de coupe à coupe suivante (« **cycle des récoltes** ») dure au maximum 2 ans et normalement 1 an. La durée de ce cycle est plus longue en cannes vierges (cannes plantées plus lentes à s'établir et à mûrir) qu'en repousses. Elle est aussi plus longue en climat d'altitude ou semi-altitude qui est assez frais pour ralentir la croissance et en climats permettant une maturation tant en saison des pluies, car elle est fraîche, qu'en saison chaude car elle est sèche (ce qui est le cas à Hawaï où la récolte est bisannuelle, mais pas à l'île de la Réunion).

I.A.3.b. Cultures pluviales et irriguées

En culture pluviale la plantation se fait : soit dès le début des pluies pour des cannes qui seront récoltées en vierge à 12 mois environ, soit au cours ou vers la fin de la saison des pluies pour des cannes à récolter vierges à 16-18 mois. En culture irriguée, on adopte en général le cycle le plus intensif (une récolte par an) pour rentabiliser la culture, l'irrigation permettant de réaliser la plantation pendant la saison sèche, d'accélérer la croissance et de mieux maîtriser la maturation (arrêt d'irrigation 2 à 4 mois avant la coupe) (Mémento de l'Agronome, 1993). L'irrigation de la canne est souvent nécessaire (sur la côte sèche de l'île de la Réunion par exemple) mais doit être associée à une bonne gestion de l'eau dans un contexte de ressource limitée et chère (Derbois,

1988). A la Réunion, elle est en général pratiquée au goutte-à-goutte (Comm. pers. Martiné, 2001).

I.A.3.c. La plantation déterminante

La canne se multiplie de façon végétative par boutures, une bouture étant un morceau de tige idéalement âgée de 8-9 mois (Rehm & Espig, 1991), contenant 3 ou 4 nœuds (sa longueur avoisine donc les 60cm) avec leur bourgeon latéral appelé œil (Fauconnier, 1991 ; Mémento de l'Agronome, 1993). C'est la seule façon d'établir une parcelle de cannes, les graines étant réservées à la création de nouvelles variétés (Fauconnier, 1991). Une bonne plantation (mise en terre humide à 3-5 cm de profondeur des boutures bout à bout (en double) en rangs écartés de 1.2-1.5 m) permet un démarrage de la culture dense, homogène et rapide (Brassereau & Fauconnier, 1970). Nous reviendrons sur les particularités du démarrage de la culture (cf. 3^{ème} partie, II.A.1).

I.A.3.d. Fertilisation et lutte contre les ennemis de la culture

Nous ne détaillerons pas cet aspect étant donné que nous travaillerons sur le fonctionnement de la canne en conditions de traitements optimales. Précisons toutefois que les sous-produits de la sucrerie sont utilisés comme fertilisants organiques si l'on en dispose et que dans le cas contraire on a recours au chaulage et au phosphatage connaissant les propriétés des sols de l'île (cf. 1^{ère} partie, I.B.2). Quant aux ennemis, ils ne sont pas très nombreux et les principaux sont les borers (foreurs) de la tige dont les larves creusent des galeries dans la canne et abaissent sa teneur en sucre, les insectes des racines et les rats. Les maladies peuvent être évitées avec le soin apporté aux boutures. Le désherbage est encore surtout manuel mais pas indispensable, la plante étant très couvrante (Mémento de l'Agronome, 1993).

I.A.3.d. La récolte et son déterminisme

Une fois la canne arrivée à maturité technologique (teneur en sucre exigée par la sucrerie atteinte), on élimine, le sommet trop aqueux (bout blanc) et les feuilles et on utilise les tiges entières après les avoir coupées manuellement ou mécaniquement au ras du sol. 10-15% de non canne (feuilles et partie du bout blanc) sont quand même comptabilisés dans le rendement et emportés à l'usine car le haut des tiges est coupé large pour être sûr de ne pas perdre de canne usinable donc les tiges ne sont pas complètement « propres ». La souche comporte la partie souterraine des différentes tiges que l'on vient de couper (2-3 entre-nœuds souterrains) et tout le système racinaire qui leur correspondait dont 17% seulement meurent au moment de la coupe (Ball-Coelho, 1992). A partir des nombreux yeux souterrains en réserve, restés latents, se développeront à la repousse (avec chaleur et eau) de nombreuses tiges primaires comportant elles aussi des yeux souterrains permettant la levée de tiges secondaires et surtout le développement progressif d'un nouveau système racinaire issu directement des nouvelles tiges. Ce remplacement racinaire demande normalement un délai court d'environ 2 à 3 semaines (Bull & Glasziou, 1975 ; Fauconnier, 1991 ; Rehm & Espig, 1991) et l'ancien système racinaire sert d'amendement (Fauconnier, 1991).

Notons que le climat et la physiologie de la canne à sucre (dont nous approfondirons le fonctionnement (cf. 1^{ère} partie, II.) ne sont pas seuls à déterminer le moment de la récolte. Les contraintes sont surtout de nature économique. La campagne agricole doit être coordonnée à la campagne industrielle car la canne ne se conserve pas après récolte (Fauconnier, 1991). Le délai entre coupe et broyage ne devant pas excéder 48h pour la canne coupée en paille et 24h pour la canne brûlée (le brûlage préalable des feuilles sèches, pour les variétés qui ne les perdent pas naturellement, rend la coupe plus aisée et rapide) (Mémento de l'Agronome, 1993). Il faut que la campagne sucrière dure le plus longtemps possible pour étaler les travaux et leur coût. Le

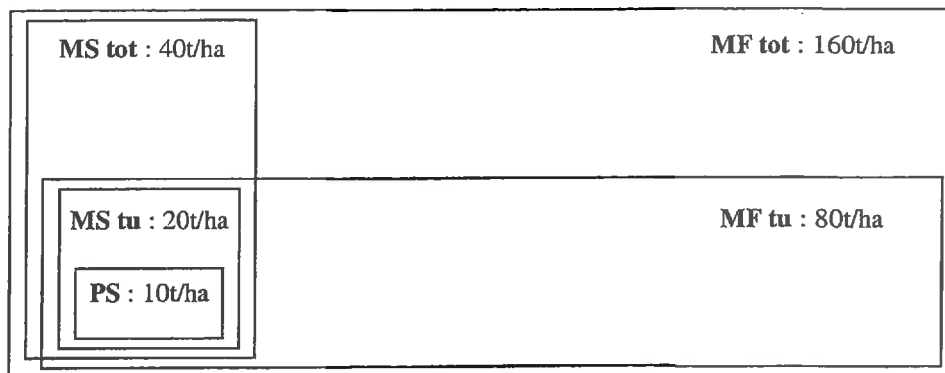


Figure 1.2 : *Décomposition de la production (aérienne) moyenne d'une culture de canne à sucre à la Réunion*

MF : Matière fraîche (à 75% d'humidité)

MS : Matière sèche

tot : totale produite

tu : tige usinable, partie de la récolte vraiment utilisée (contenant le sucre)

PS : poids de sucre

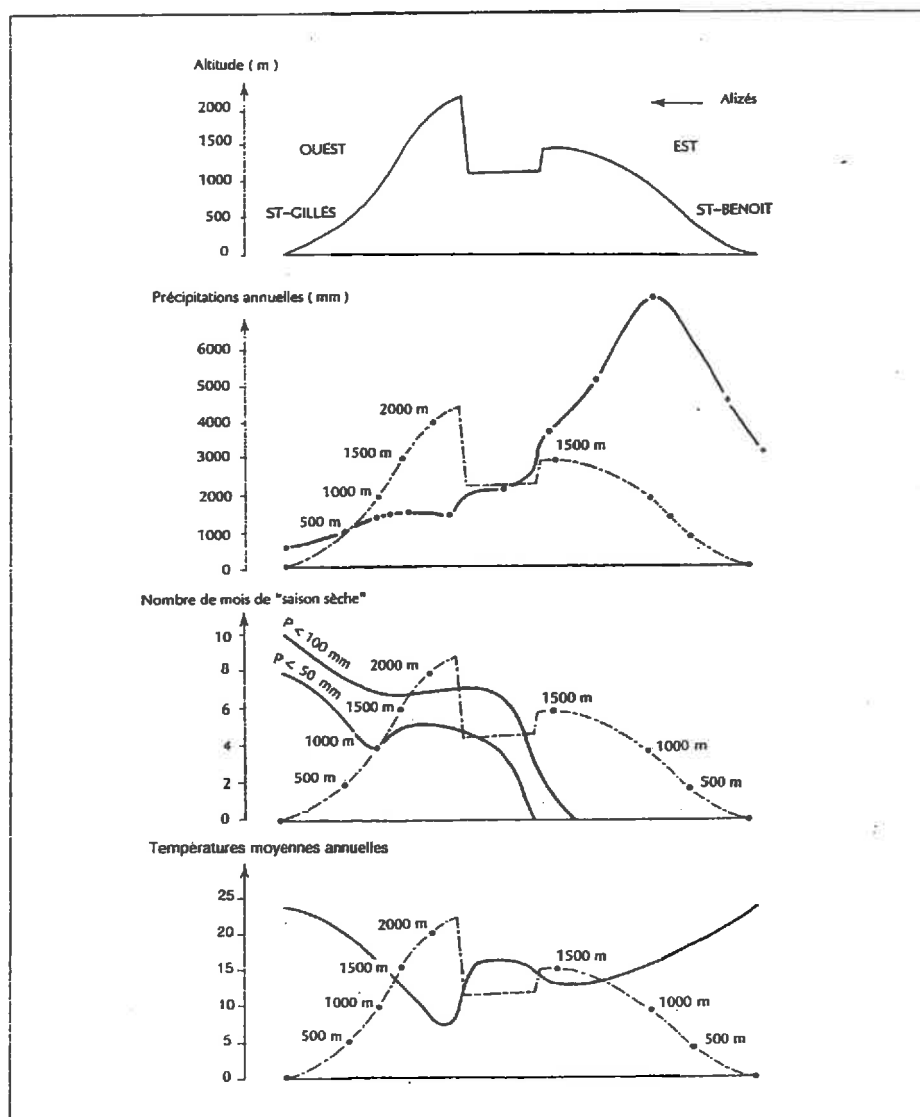


Figure 1.3 : *Altitude-exposition-climat : coupe schématique de l'île (Raunet, 1991)*

chargement, le transport et le travail de l'usine se font jour et nuit. Les gros tonnages et volumes considérables dus à la faible densité des chargements (0,2-0,4) soulèvent l'intérêt de rapprocher les champs de canne de la sucrerie pour diminuer les frais de transports (Fauconnier, 1991). La somme des moyens matériels et humains mis en œuvre et l'impérative organisation de la récolte en font la phase principale de toute culture de canne (Brassereau & Fauconnier, 1970).

La canne est très généralement cultivée en monoculture car elle est assez bonne conservatrice des sols et bien que ce ne soit pas l'idéal agronomique, la croissance constante de la taille des sucreries, avec augmentation des surfaces correspondant à chaque usine, a renforcé cette tendance (Fauconnier, 1991 ?).

I.A.3.e. Des rendements variables

Il faut être précis lorsqu'on parle de « rendement » car il ne représente pas la même chose selon qu'on considère le poids de matière fraîche ou sèche totale récoltée, le poids de cannes usinables fraîches ou sèches, le poids de sucre, la richesse en sucre (teneur en sucre dans la matière fraîche ou sèche des tiges usinables) ou le poids de sucre extrait... En général le terme de rendement s'applique au poids frais de cannes usinables qui constitue la base de la rémunération des producteurs. L'ordre de grandeur des poids obtenus à la Réunion en moyenne (2 types de culture confondus) est donné par la figure 1.2 (Rehm & Espig, 1991 ; Comm. pers. Martiné 2001).

Cependant ces moyennes cachent une grande variabilité, même à l'échelle de la Réunion (Martiné, 1997a). Les rendements et poids de sucre des cultures pluviales par exemple sont en général moins élevés que ceux des cultures irriguées (Mémento de l'Agronome, 1993). L'altitude influe beaucoup sur les potentialités de croissance de la canne à sucre par l'intermédiaire de l'action de la température (Martiné *et al.*, 1999).

L'influence que peuvent avoir le climat et le relief (et plus généralement le milieu et son évolution) sur le rendement et le taux de sucre est très importante. Elle doit être prise en compte dans l'estimation de la production et la gestion de l'irrigation ou du stress hydrique dont on sait par expérience qu'il permet de maximiser le taux de sucre.

I.B. Le milieu : climats et sols de l'île de la Réunion

I.B.1. Des climats contrastés

La Réunion doit son climat contrasté à sa situation océanique, sa latitude australe assez basse (-21°Sud) et à sa dénivelée élevée (point culminant : Piton des neiges à 3069m). Les 2 traits dominants en sont (*cf.* Fig. 1.3) :

- d'une part un régime assez régulier d'alizés (vents d'est dominants), qui, combiné au relief orienté NO-SE, crée une zone « au vent » et une zone « sous le vent » et une opposition entre le littoral et les Hauts (limite vers 500m),
- d'autre part un régime de perturbations tropicales parfois violent et destructeur (cyclones) plus irrégulier et difficilement prévisible (Raunet, 1991).

I.B.1.a. La notion de « saison »

La saison la plus chaude (Tmoy : 27-28°C) ou été austral (janvier, février, mars) est aussi la plus humide et la saison la plus fraîche (Tmoy : 20-22°C) ou hiver austral (juillet, août, septembre), la plus sèche (Raunet, 1991, Perret, 1992). Nous verrons que les stress hydrique et thermique jouent dans le même sens sur le fléchage (floraison, non désirée) et l'accélération de

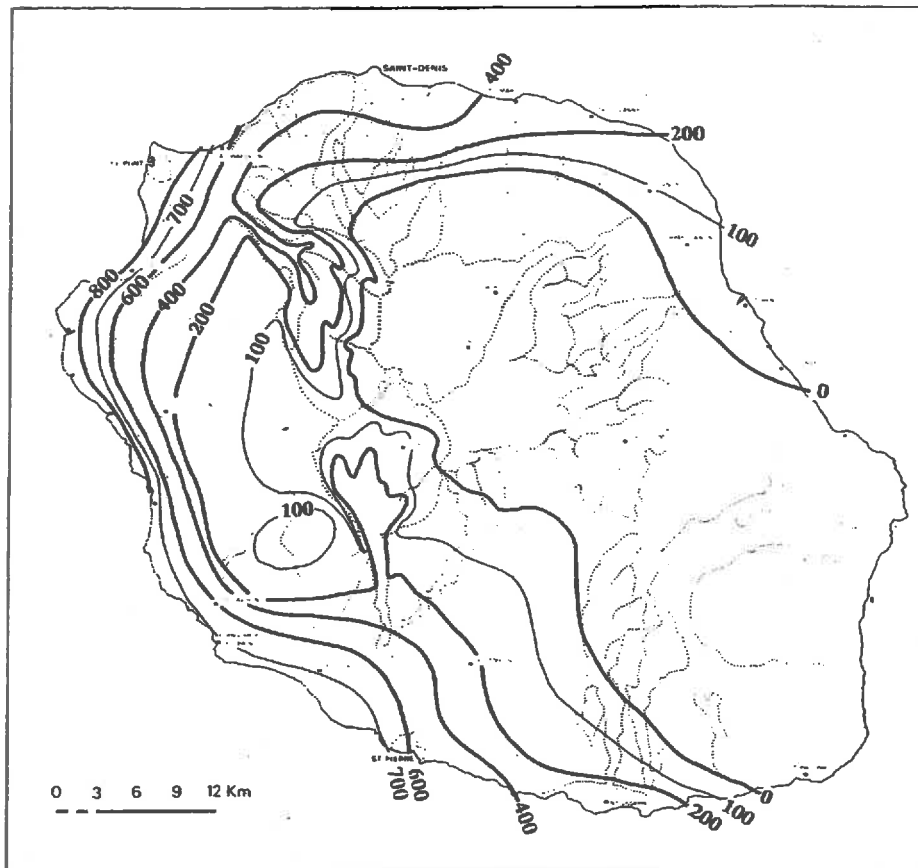


Fig 1.4 : Le déficit climatique annuel (mm) (Raunet, 1991)

l'augmentation du taux de sucre (souhaitée). Le stress naturel ou l'arrêt d'irrigation doivent être gérés prudemment.

I.B.1.b. Pluviométrie et exposition : la côte « au vent » et la côte « sous le vent »

La région la plus sèche de l'île est le littoral ouest avec moins de 1000 mm/an (Raunet, 1991). La côte au vent est arrosée de 2000 à 8000 mm/an tandis que la côte sous le vent ne reçoit que 600 à 2500 mm/an. Il existe un gradient d'altitude dans la répartition des pluies (plus importantes en altitude) et la variabilité inter-annuelle est marquée surtout en saison chaude (Perret, 1992).

I.B.1.c. Thermométrie et altitude : les « Hauts » et les « Bas »

La forte influence océanique explique des températures moyennes plutôt « tempérées » (23-26°C entre 0 et 100 m d'altitude) et d'assez faibles amplitudes (6-9°C), pour une région tropicale. Dans l'île, les différences régionales sont liées en premier lieu à l'altitude, puis à l'exposition aux alizés et enfin à des situations topographiques particulières. La région sous le vent (ouest) est plus chaude de 1 à 2°C que la région au vent. Le gradient thermique moyen est de 0,65°C pour 100m de dénivellation (Raunet, 1991, Perret, 1992).

I.B.1.d. Rayonnement et insolation

Ces deux variables climatiques dépendent encore de l'exposition et de l'altitude, la nébulosité étant plus importante dans les Hauts et la côte « au vent ». La saison joue aussi un rôle sur la rayonnement plus important en décembre (début d'été austral) qu'en juin (début d'hiver austral).

I.B.1.e. Demande climatique

L'ETP-PENMAN varie elle aussi en fonction de l'altitude et suivant qu'on considère la côte au vent ou la côte sous le vent. Maximale en janvier et minimale en juin, elle est, pour une même altitude, inférieure dans l'est par rapport à l'ouest. La demande est maxima, au niveau de la mer, d'octobre à février avec 5 à 5,8 mm/jour et minima de mai à août avec 2,7 à 3,5 mm/jour. En réalité, il existe une multitude de situations particulières des points de vue orographique et exposition, qui doivent chacune corriger l'ETP théorique. Pour réaliser un zonage du déficit climatique annuel (la somme des différences (en mm) ETP-PENMAN moyenne mensuelle et P mensuelle) il faudrait tenir compte de la capacité de rétention en eau des sols (épaisseur, %cailloux, granulométrie) et des coefficients culturaux (k) de la culture considérée (espèce, stade du cycle, degré de couverture) (cf. fig. 1.4). Le système de culture au niveau de l'exploitation et l'aménagement au niveau de la parcelle ont un effet sur le coefficient de ruissellement des eaux pluviales et interviennent donc dans le bilan en eau (Raunet, 1991).

Nous comprenons que la grande variabilité spatio-temporelle des données climatiques génère de nombreux **microclimats**, qui, croisés aux propriétés physiques chimiques et hydriques des sols, sont à l'origine des potentialités de rendement très hétérogènes sur l'ensemble de l'île.

I.B.2. Des sols d'origine volcanique aux propriétés particulières

Actuellement, les principaux sols cultivés en canne sont les sols andiques (un peu moins de 40% de la surface totale : est, Hauts de l'ouest et du sud), ferrallitiques (nord et sud) et brunifiés (ouest et sud) (Raunet, 1991).

I.B.2.a. Les sols bruns andiques

****Propriétés physiques***

Ce sont des « terres franches », profondes et sans cailloux. Plus de 200 ans de culture de canne ont amélioré les propriétés physiques de ces sols. Sur les 30 cm supérieurs, le puissant

enracinement fasciculé de la canne y a engendré une structure polyédrique moyenne très intéressante et une homogénéisation de la répartition de la matière organique (3 à 5%, C/N = 10). La pente plus ou moins importante et la sensibilité au compactage accentuée par l'irrigation éventuelle posent le problème de la mécanisation : coupe mécanique possible jusqu'à 7% de pente et 15% pour le chargement mécanique (Mémento de l'Agronome, 1993). La préoccupation essentielle doit être la protection des sols contre l'érosion surtout dans les zones où l'agressivité climatique est importante (Raunet, 1991).

**Propriétés chimiques*

Le pH est compris entre 5,4 et 5,8 dans les 30 cm supérieurs et un chaulage n'est donc pas systématiquement nécessaire. Le phosphore total est présent en grande quantité mais la fraction « assimilable » (OLSEN) ne représente que 50 à 200 ppm. On peut parler de carence moyenne à faible qui peut justifier un phosphatage (Raunet, 1991). La teneur en matière organique est, on l'a vu, moyenne à forte et la capacité d'échange cationique (CEC) moyenne (autour de 10-15 méq/100g de sol) (Chabalié, 1988 ; Perret, 1992 ; Pouzet *et al.*, 1997).

**Contraintes et potentiel agronomique*

L'utilisation actuelle des sols bruns andiques est la canne à sucre en général non irriguée. L'absence totale d'irrigation est le premier facteur limitant l'obtention de bons rendements. Dans l'ouest, l'arrivée de l'irrigation grâce au « basculement des eaux » en cours devrait permettre d'aménager des parcelles de canne irriguée dans la bande sèche de 100 à 350m d'altitude (Raunet, 1991 ; Comm. Pers. Martiné, 2001).

I.B.2.b. Les andosols désaturés non perhydratés

**Propriétés physiques*

Ce sont aussi des sols épais (1-4 mètres), sans cailloux ni tâches d'hydromorphie (contrairement aux sols perhydratés). Le matériau est friable, d'aspect léger (faible densité apparente, toujours nettement inférieure à 1), toujours frais ou humide et extrêmement perméable ; pourtant, il paraît inhospitalier aux racines (Raunet, 1991).

**Propriétés chimiques*

Le pH compris entre 5 et 5,3 sur les versants ouest et sud en font des sols nettement acides. Dans les milieux plus humides des versants nord et nord-est, les pH sont plus acides encore : 4,5 à 5,1. Les andosols sont riches en matière organique (10 à 20%, C/N : 11-13) mais celle-ci est faiblement humifiée, ce qui est caractéristique des sols tropicaux de la Réunion. La matière organique, bien qu'abondante est très difficilement accessible à la minéralisation et à la nitrification. Sur ces sols, les apports de fumier ont toujours des effets très marqués. La CEC est assez faible et comprise entre 6 et 8 méq/100g de sol. Les andosols sont riches en phosphore total, surtout dans l'horizon de surface et le taux de phosphore dit assimilable donne également des valeurs relativement élevées, de 150 à 400 ppm. Pourtant les plantes cultivées souffrent d'une forte carence, ce qui confirme que le phosphore présent en grande quantité dans le sol est très peu biodisponible. Le problème est le même pour l'azote qui est difficilement accessible à la microflore. Le blocage de ces 2 éléments est encore plus important en altitude où la baisse des températures limite l'activité biologique (Raunet, 1991).

**Propriétés hydriques*

Les andosols de la Réunion sont toujours très riches en eau, bien que non hydromorphes, ce qui se traduit par des humidités pondérales élevées.

**Contraintes et potentiel agronomique*

On a vu que les andosols ont un très fort pouvoir fixateur de phosphore qui est par conséquent en très faible concentration dans la solution du sol. Le coefficient de minéralisation annuel de la matière organique des andosols est faible (0,6%) (Checkouri, 1990, cité par Raunet, 1991) et l'azote est lui aussi peu accessible à la microflore. Pour que l'apport de fertilisation phosphatée soit efficace et que le turn-over de l'azote soit accéléré, il faut favoriser la minéralisation de la matière organique, donc activer l'activité biologique (baisse du C/N) par apport de matière organique la fois fraîche et humifiée et autres pratiques culturales dignes d'un système de culture « conservatif ». Par ailleurs, le chaulage est nécessaire pour remonter le pH autour de 5,5. Outre les pentes omniprésentes, l'excessive et constante teneur en eau des sols sans armature pierreuse limite la portance et rend encore une fois la mécanisation difficile.

On comprend que l'île de la Réunion offre une diversité de potentialités agronomiques due à la variété des conditions pédo-climatiques. Ces différentes potentialités doivent être confrontées aux besoins de la canne à sucre, ce qui détermine les possibilités et limites de sa culture à la Réunion. En réalité, la canne à sucre est surtout limitée par le froid et l'altitude ; sous les tropiques elle ne pousse que jusqu'à 700-800m. La majeure partie des régions tropicales et de nombreuses zones subtropicales se prêtent donc à cette culture. La canne a besoin de soleil, d'eau et supporte les températures élevées. En revanche elle craint les vents violents et desséchants mais supporte mieux les cyclones que beaucoup de plantes grâce à son enracinement vigoureux (Fauconnier, 1991). Elle s'accommode plus ou moins de tous les sols car elle est très tolérante. Ses principales exigences sont celles d'une certaine profondeur (optimum 70 cm), d'une bonne aération (Mémento de l'Agronome, 1993), d'une bonne réserve utile et d'un sol riche en nutriments (Rehm & Epsig, 1991). Les îles, avec leur climat marin et leur topographie souvent accidentée, sont en général moins douées pour la production sucrière mais l'aire de culture est plus vaste que l'aire naturelle parce que la sécheresse est souvent corrigée par l'irrigation (Fauconnier, 1991).

Nous allons voir à présent comment le peuplement végétal de canne à sucre exploite, interagit avec son milieu et en tire son rendement.

II. LE FONCTIONNEMENT ECOPHYSIOLOGIQUE DE LA CANNE A SUCRE

La canne à sucre est une robuste graminée vivace à croissance « indéterminée » (Fauconnier, 1991 ; Fahrasmane & Ganou-Parfait, 1997). Sa voie photosynthétique en C₄ lui permet d'être une plante très efficace, voire la plus efficace des plantes en C₄ (Muchow et al., 1994) grâce à l'absence de photorespiration (Varlet-Grancher *et al.*, 1981). Elle apprécie la lumière en permanence (Bull & Glasziou, 1975 ; Nickell, 1977 ; Mémento de l'Agronome, 1993).

II.A. Les phases du cycle de la canne

II.A.1. Un développement original (comparé aux autres graminées cultivées)

II.A.1.a. La notion de « cycle de développement »

Il est difficile de parler de cycle au sens physiologique pour la canne car même s'il y a succession d'une phase de développement végétatif et d'une phase de mise en place de l'appareil reproducteur (et encore, certaines variétés ne fleurissent même pas naturellement si les conditions déclenchant le fléchage ne sont pas réunies), ce dernier est peu important en liaison

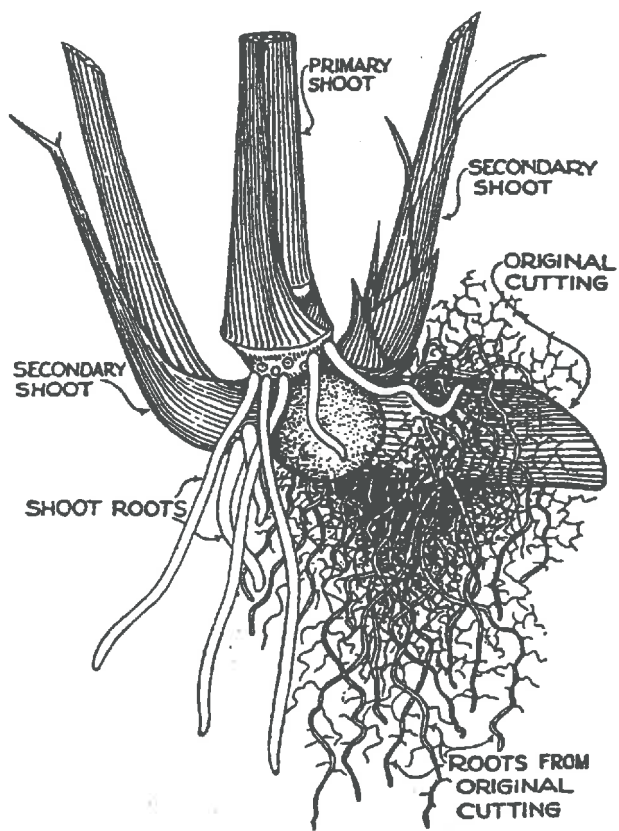


Figure 1.5 : Démarrage des tiges primaires, secondaires, des radicelles et racines de tige à partir d'une bouture (Lingle, 1999)



Photo 1.1 : Racines de tige et premier entre-nœud aérien (R570, juin 2001)

avec la capacité de la canne à se reproduire par multiplication végétative. A la différence des plantes dont on récolte les graines, le cycle, même s'il comporte parfois les étapes de production et remplissage des grains, est ici tronqué par la récolte des tiges et la production de grains n'a pas lieu. Seuls les sélectionneurs et améliorateurs de variétés laissent cette étape se réaliser (Comm. pers. Martiné, 2001).

II.A.1.b. Stades et organes

**Démarrage, repousses et système racinaire*

Grâce aux réserves des parties souterraines des tiges coupées s'il s'agit d'une repousse (ou de la bouture s'il s'agit de la plantation) et à l'eau contenue dans le sol qui l'entoure, les bourgeons se développent et donnent des tiges primaires pendant que les radicules issues des primordia de la zone radulaire de la bouture commencent l'alimentation de la jeune tige. Des nœuds souterrains de cette tige primaire partiront rapidement de nouvelles racines dites « de tige », qui prendront le relais plus direct de l'alimentation hydrique et minérale (Fauconnier, 1991 ; Lingle, 1999) (cf. Fig. 1.5 et photo 1.1). On constate que le démarrage des repousses est plus rapide que celui des cannes plantées et l'on suppose que ceci est dû à la présence du système racinaire de la souche, racines qui ne dégènèrent presque pas d'après des informations récentes et contrairement à celles contenues dans la bibliographie antérieure. De même le démarrage (accroissement d'indice foliaire et de matière sèche foliaire) des cannes coupées durant l'hiver austral est plus lent que celui des cannes coupées pendant l'été, à cause de températures et rayonnements plus faibles (Comm. pers. Martiné, 2001).

**Tallage et tiges*

Certains yeux souterrains des tiges primaires se développent en donnant des tiges secondaires, dont les nœuds et entre-nœuds souterrains et rapprochés produiront progressivement leurs propres racines et éventuellement des tiges tertiaires (Bull & Glasziou, 1975 ; Fauconnier, 1991). Le tallage, très dépendant de la lumière et de la température, se poursuit jusqu'à ce qu'un équilibre se crée entre le nombre de tiges, leurs divers besoins et l'offre du milieu (Fauconnier, 1991 ; Lingle, 1999). D'après des résultats expérimentaux d'études en conditions contrôlées, la quantité de rayonnement solaire est en effet un facteur majeur déterminant la production de tiges (Nickell, 1977). Une densité de 50000 à 75000 tiges /ha et une surface de feuilles supérieure à 1m²/tige (ce qui donne un LAI de 5 à 7,5) maximisent la lumière absorbée par la canne à sucre d'après Fahrasmane & Ganou-Parfait (1997). La canne ne se ramifie pas au-dessus du sol. Une touffe bien tallée peut comporter 10 à 15 tiges vivantes à la récolte, quand le peuplement est stabilisé, selon la variété (Mémento de l'Agronome, 1993) (cf. photo 1.2). Les variétés australiennes (ainsi que la R570) ont 10 tiges (à grandes feuilles)/m² à la récolte et les variétés sud-africaines, une quinzaine (à petites feuilles)/m² (Keating *et al.*, 1994). Nous reviendrons sur la notion de densité dans la 3^{ème} partie (cf. I.A.1.b.). Les tiges peuvent atteindre 2 à 4 m de hauteur pour un diamètre de 2 à 4 cm en moyenne. Chaque tige se compose d'une succession de nœuds ligneux où sont implantés les yeux (bourgeons) et d'entre-nœuds gorgés de sucre (Fauconnier, 1991 ; Mémento de l'Agronome, 1993).

**Croissance, feuilles et sénescence des feuilles et tiges*

Le bourgeon, végétatif terminal de chaque tige donne naissance avec l'accumulation d'unités de température à une suite de nœuds et d'entre-nœuds (dont la longueur finale peut dépasser 20 cm mais fait en général 10 à 15 cm) (cf. photo 1.3). A la récolte, on compte 20 à 30 entre-nœuds. Les tiges s'allongeant avec la température et une bonne alimentation hydrique, le feuillage prend progressivement son aspect normal : sept feuilles encore enroulées dans le fouet foliaire, une dizaine de feuilles vertes et d'autant plus de feuilles déjà sèches que cette tige est âgée (Fauconnier, 1991, Mémento de l'Agronome). La canne émettant constamment des feuilles n'en



Photo 1.2 :
Touffe de canne
tallée (R570, juin
2001)

entre - nœud



Photo 1.3 : Un entre-
nœud usinable
dépaillé et un nœud
avec son œil, sa
cicatrice foliaire et
sa zone radiculaire
(R570, juin, 2001)

cicatrice foliaire } nœud
 œil }
 zone radiculaire }

a donc pas un nombre limité, jusqu'au fléchage éventuel (indépendant du nombre de feuilles). Le phyllochrone (dont la valeur est une caractéristique variétale) est de 83°j/feuille (base 12) pour la R570 en conditions non stressées d'après Védie (1993, cité par Martiné, 1996a). Les feuilles, alternées sont composées d'une gaine (enveloppante) et d'un limbe reliés par une articulation souvent utilisée pour distinguer des variétés et servir de repère aux mesures d'élongation. La TVD (Top Visible Dewlap) qui sert à la mesure de hauteur d'une tige est la dernière (plus jeune) de ces articulations visible au sommet de la tige (Fauconnier, 1991). Les limbes, caractéristiques par leur port, leur taille, leur couleur etc., ont de 2 à 10 cm de large pour 60 à 150 cm de long. (Fauconnier, 1991, Mémento de l'Agronome). Les tiges sont plus ou moins débarrassées de leurs feuilles sèches selon la variété (Fauconnier, 1991). Nous avons vu (cf. 1^{ère} partie, I.A.2.b.) que la variété R570 ne perd pas ses feuilles naturellement, ce qui peut poser problème pour les mesures de hauteur (cf. 2^{ème} partie, III.B.2.a.). Au fur et à mesure de la croissance des tiges s'opère un déplacement apparent des parties vertes vers le haut de la culture (Varlet-Grancher, 1980). Le processus de sénescence des feuilles a rarement été étudié mais en conditions optimales, les observations réalisées à la Réunion (Védie, 1993, cité par Martiné, 1996a) sur R570 signalent un début de sénescence des feuilles les plus âgées quand 12 à 14 feuilles sont déjà apparues (fouet enroulé non compris). En ce qui concerne les tiges, la mortalité affecte d'abord les plus jeunes situées sous le couvert où la quantité de lumière arrivant à la surface du sol est réduite (Van Dillewijn, 1952, cité par Lingle, 1999) et les cannes les plus âgées ne sont pas atteintes. L'apparition de nouvelles tiges, au-dessus du sol, cesse généralement peu après le début de sénescence des tiges (Martiné, 1996a). La cause de la mort des tiges immatures n'est pas précisément connue : il peut s'agir d'une assimilation insuffisante due à l'ombrage ou à une inhibition par dominance du reste de la « plante » (tiges primaires) (Van Dillewijn, 1952, cité par Lingle, 1999). Cependant la capacité de la plante au tallage n'est pas limitée de façon irréversible et l'effet d'une verse sur la réouverture du couvert se traduirait par l'émergence de nouvelles tiges (Lingle, 1999).

**Remplissage et maturation des tiges (cf. Fig. 1.6)*

Nous ne parlerons bien évidemment pas ici du remplissage et de la maturation des grains dont l'existence dépendrait de la floraison et qui de toutes façons ne sont pas les organes récoltés. Sous l'influence souvent combinée du froid (même relatif) et du manque d'eau, le saccharose s'accumule dans les tiges, tandis qu'y diminuent le glucose, l'acidité et la teneur en eau. Cette maturation technologique reste à son meilleur niveau pendant une durée limitée qui varie avec la variété et les conditions du milieu (maintien du stress hydrique et thermique). Au-delà, il peut y avoir surmaturation (provoquée par un retour des chaleurs et la disponibilité de l'eau), qui se note par un départ en végétation des bourgeons latéraux de la tige, par son dessèchement progressif et par une perte de saccharose et de pureté du jus. Ces gros rejets tardifs aqueux sont très pauvres en sucre (Fauconnier, 1991) et ont tendance à remobiliser le sucre à partir des tiges remplies (Lingle, 1999). L'apparition de nouvelles tiges immatures peu avant la récolte, éventuellement causée aussi par la réouverture accidentelle du couvert, peut ainsi réduire la qualité du jus (teneur en sucre) de la culture entière (Lingle, 1999).

**Floraison éventuelle*

Les influences de la latitude (par la vitesse de réduction de la durée du jour), et de la variété sur le « fléchage » sont prépondérantes. Si les conditions le permettent, le bourgeon apical végétatif des tiges ayant atteint un certain âge (à peu près 1 an) peut se transformer en bourgeon floral, lequel donnera une inflorescence (cf. photo 1.4). Cette floraison, quasi-nulle pour la variété R570 (3-4% des tiges sont concernées), apparaît à l'automne, c'est à dire à la fin de la saison des pluies dans les climats tropicaux usuels (Fauconnier, 1991). Les jours courts induisent souvent une floraison généralement non souhaitée (Rehm & Epsig, 1991). La floraison n'est en effet pas

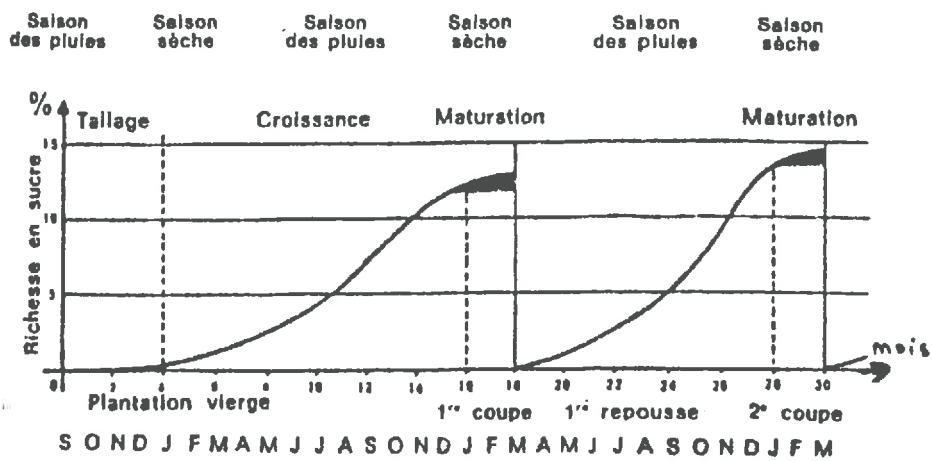


Figure 1.6 : Schéma simplifié de l'évolution du sucre en % de matière fraîche de canne en fonction des saisons (Memento de l'Agronome, 1993)



Photo 1.4 : L'inflorescence de canne (environ 40 cm de hauteur) (R579, juin 2001)

désirée car elle limite le rendement tant en cannes (perte de mois de croissance) qu'en sucre (perte de qualité sucrière) (Fauconnier, 1991). Suite à la floraison, la croissance en longueur s'arrête et la croissance en biomasse est réduite car le LAI diminue (aucune apparition et croissance des limbes alors que la sénescence continue) et la source de carbone (PAR intercepté) se tarit. Le manque de connaissances sur la floraison et son effet sur la teneur en sucre rendent sa modélisation difficile (Comm. Pers. Martiné, 2001).

II.A.1.c. Besoins de la canne

**Température*

Il a été montré que la température est le facteur principal déterminant les phases du développement de la canne à sucre (comme de la plupart des plantes d'après Monteith, cité par Bissuel, 2000), l'élongation de ses tiges en est linéairement dépendante (Inman-Bamber, 1994, cité par Lingle, 1999). Il convient donc de s'intéresser aux valeurs minimales, maximales et optimales conditionnant ce développement pour la canne à sucre. La réponse de la canne à la température dépend des variétés et il existe des contradictions entre les auteurs. Nous considérerons donc que la température de base (à partir de laquelle la canne à sucre peut se développer et croître) est égale à 12°C : c'est par exemple la température qui donne la meilleure relation entre la somme des degrés jour et le nombre de tiges apparues (Martiné, 1996a) ou le rythme d'élongation de la tige (Martiné *et al.*, 1999). On retrouve aussi 12°C en prolongeant la droite modélisant la relation linéaire (entre 15 et 26°C) entre la vitesse d'apparition journalière des feuilles et la température moyenne (Vedie, 1993, cité par Martiné, 1996a). L'assimilation est maximale et la croissance optimale vers 30°C d'après Fauconnier (1991) et Lingle (1999). La croissance en surface foliaire et biomasse de tige serait maximale autour de 45°C (Comm. Pers. Brisson, 2001).

**Photopériode*

La photopériode est la durée de l'éclairement reçu par une plante au cours d'une journée. Pour des durées de jour longues, la vitesse de développement est diminuée pour les plantes dites de jour court (Bonhomme *et al.*, 1996). La canne à sucre est une plante photopériodique de jour court et l'occurrence de sa floraison dépend de la photopériode. 13,5h et 23h seraient respectivement les photopériodes saturante et de base. Ceci signifie que jusqu'à 13,5h la vitesse de développement est maximale et au-delà de 23h minimale (Comm. Pers. Brisson, 2001).

**H2O*

Il faut en moyenne 1500mm de hauteur d'eau (pluie ou arrosage), soit 15000t d'eau/ha pour obtenir, d'une parcelle bien conduite, 100t (en matière fraîche) de cannes usinables à la récolte. Le rendement ou l'efficacité de l'eau est alors de 1 pour 150 (15mm/t de cannes), l'essentiel de cette eau étant transpirée par la plante (Fauconnier, 1991).

Le cycle de la canne, sa croissance et sa maturation sont étroitement conditionnés par le climat et en particulier par la température et le régime hydrique. En résumé l'eau et la chaleur favorisent la croissance tandis que la sécheresse et le froid sont favorables à la maturation (Fauconnier, 1991 ; Mémento de l'Agronome, 1993). Les autres facteurs édaphiques, nutritionnels, biologiques ou humains viennent après (Fauconnier, 1991). Les sols lourds permettent de mieux franchir des périodes sèches. Les sols plus légers et perméables (grâce à une profonde aération et décompaction) favorisent la maturation et les transports à la récolte (Mémento de l'Agronome, 1993).

II.A.2. Elaboration du rendement et facteurs de variation

On a vu que ce qui est important pour la sucrerie et par conséquent pour l'agriculteur est d'obtenir, avec des pratiques adaptées au contexte climatique, la plus grande quantité de sucre possible (au détriment du non-sucre) à partir de tiges les plus riches (entre-nœuds bien remplis de sucre), longues (entre-nœuds longs et nombreux) et nombreuses possible. Et ce, en intégrant les contraintes matérielles et temporelles d'organisation de la campagne sucrière, les contraintes économiques de coût de transport et d'extraction.

II.A.2.a. Nombre de tiges

Le rendement est très lié au nombre de tiges usinables /ha et il est donc nécessaire qu'en premier lieu la « germination » des bourgeons et le tallage aient été précoces et maximaux (Nickell, 1977 ; Lingle, 1999). L'augmentation de l'écartement entre les rangs et entre les boutures d'un rang augmente le nombre de tiges /« plante » et les cannes ont tendance à être plus épaisses et courtes. Cependant, une densité de plantation plus élevée favorise l'augmentation de la population de cannes usinables/ha. Cette population fournit un rendement d'autant plus important qu'elle est constituée de tiges primaires (dont le nombre est étroitement lié à la densité d'yeux plantés) (Lingle, 1999). Les connaissances des processus d'apparition et de sénescence des tiges sont limitées et le déterminisme du nombre de tiges mériterait des études physiologiques plus poussées (Martiné, Mosicas). Cependant, on peut connaître les nombres de tiges vivantes, mortes et le total à tout moment dans le cycle, ce qui permet de reconstituer leur évolution au cours du temps, dépendante du rayonnement et de la température. D'après les travaux de Martiné (1996a) il semblerait que des tiges commencent à apparaître 90°j après la coupe (pour la variété R570 avec un écartement de 1,5 m entre les rangs). Leur nombre augmente (à peu près au rythme de $2/m^2/°j$?) ; elles atteignent assez rapidement (au bout d'environ 500°j) le nombre moyen de tiges usinables qu'on obtient à la récolte (une petite dizaine en général, $8/m^2$), mais d'autres continuent d'apparaître. Autour de 1000°j, la sénescence débute et touche les tiges nouvellement apparues avec une mortalité d'environ $0,6$ tiges/ $m^2/100°j$. La sénescence des jeunes tiges débute quand l'efficacité d'interception du rayonnement atteindrait $0,6-0,7$ ce qui correspond au début de la fermeture du couvert d'après Lingle (1999), et aux valeurs obtenues par Inman-Bamber, (1994, cité par Martiné, 1996a) et Martiné *et al.* (1999). Sénescence et apparition peuvent coexister. Ensuite l'apparition de nouvelles tiges cesse à environ 1200°j après coupe, ce qui stabilise le nombre de tiges total (autour de 20-30) et correspond au nombre maximal de tiges vivantes. A partir de ce moment le nombre de tiges vivantes diminue et est compensé par l'augmentation du nombre de tiges mortes jusqu'à l'obtention d'un équilibre et le nombre de tiges vivantes correspond au nombre de tiges qui seront récoltées (Comm. pers. Martiné, 2001). Bull & Glasziou (1975) n'ont pas observé de diminution de la surface foliaire totale avec la diminution du nombre de tiges vivantes. Cette diminution doit en effet être compensée par l'augmentation du nombre de feuilles par tige et de leur taille (Inman-Bamber, 1994).

II.A.2.b. Transformation des tiges en tiges usinables et longueur des tiges usinables

Avant la phase de maturation, le partage de la biomasse produite est très orienté vers la formation de feuilles, les tiges sont nombreuses, tendres, courtes et munies de nombreuses feuilles (Martiné, 1996a). Lorsqu'elles atteignent une certaine taille (que les jeunes cannes en cours de dégénérescence n'atteindront jamais) et que le premier entre-nœud aérien produit a fini son élongation (en général quand la canne possède 5 feuilles vertes visibles en dessous de la Hauteur TVD) celui-ci devient dur et change de couleur (Martiné, 1996a). Compte tenu de la durée qui peut s'écouler entre l'apparition des premières tiges et des suivantes (parmi celles qui

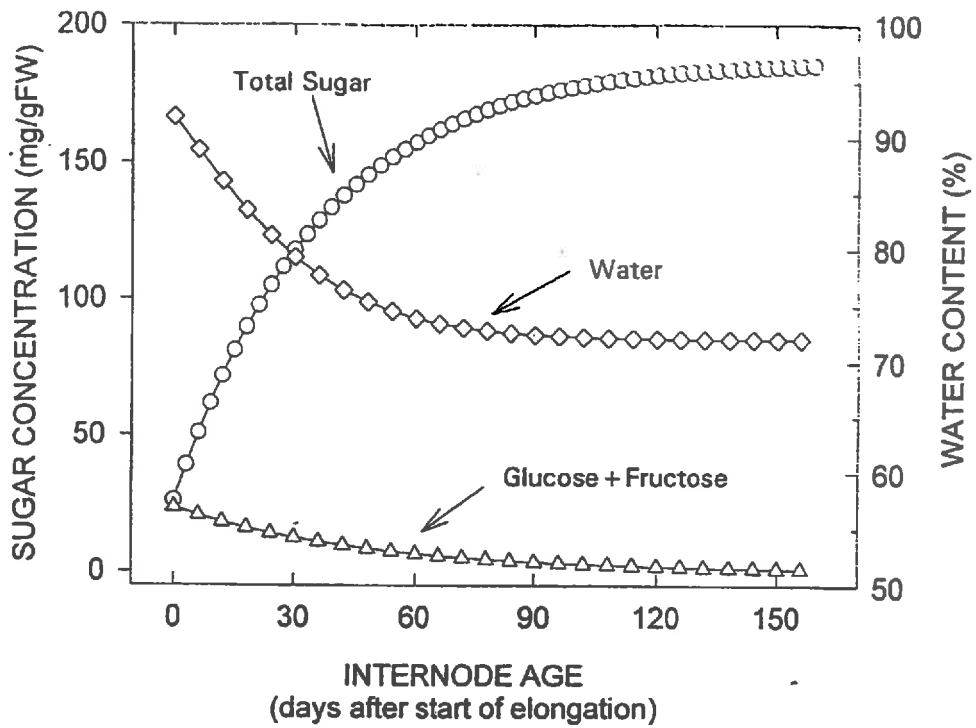


Figure 1.7 : Accumulation du sucre dans un entre-nœud usinable au détriment du non sucre et de l'eau
(Lingle, 1999)

deviendront potentiellement usinables), nous comprenons que le peuplement des cannes est très hétérogène en âge et maturité (Lingle, 1999).

La longueur d'une tige usinable dépend du nombre et de la longueur des entre-nœuds qui la composent. Au fur et à mesure que la tige croît, de nouveaux entre-nœuds (associés chacun à une feuille) se forment sans arrêt en haut de la tige, partie verte, en croissance et à 0% de sucre et 90% d'humidité. Leur nombre est déterminé par le phyllochrone mais peut être affecté par le manque d'azote qui ralentit le rythme d'émission des feuilles d'après Nickell (1977). Approximativement, le pas de temps entre la création d'un ensemble feuille-entre-nœud varie de 1 à 3 semaines (Fauconnier, 1991). Les plus anciens (situés au bas de la tige) arrêtent leur croissance et leur humidité diminue (tend vers 70%). Leur longueur dépend surtout de l'alimentation hydrique, qui, si elle est limitante, réduit la taille de l'entre-nœud mais sans compromettre la croissance du suivant si les conditions redeviennent favorables. Elle peut aussi être affectée par le manque d'azote d'après Martiné (Comm. Pers., 2001). Rappelons que la tige usinable est la partie mûre et dure de la tige, qui augmente au fil du temps avec l'augmentation du nombre d'entre-nœuds ayant terminé leur croissance (elle ne comprend donc pas le « bout blanc »). Elle croît à la même vitesse que celle de l'allongement de la tige (Comm. Pers. Martiné, 2001).

II.A.2.c. Contenu en eau et en sucre des tiges usinables

Des conditions de stress hydrique ou nutritionnel et des températures fraîches favorisent l'arrêt d'élongation des entre-nœuds et donc leur remplissage de sucre (Bull & Glasziou, 1975). En effet, la sécheresse ralentit d'abord l'élongation, puis l'accumulation des structures et en dernier celle du sucre, ce qui explique la concentration du sucre dans un entre-nœud. Mais cette concentration a des limites et le poids de sucre, même s'il continue à augmenter par unité de surface tant que les tiges croissent, plafonne en moyenne entre 50 et 60% de la matière sèche de l'entre-nœud, soit 12 à 15% de la matière fraîche (15% dans les entre-nœuds les plus âgés, 12% dans les derniers remplis). La richesse en sucre d'un entre-nœud ou d'une tige atteint donc un maximum, ce qui, on le rappelle, ne signifie pas que le sucre arrête de s'accumuler dans de nouveaux entre-nœuds formés plus haut sur la tige. Le moment où la richesse en sucre maximale d'un entre-nœud est atteinte correspond en général à la mort de la feuille qui lui est associée (Lingle, 1999) (cf. fig. 1.7). La valeur de ce maximum dépend de la variété et des conditions environnementales (Lingle, 1999). Parfois même la richesse en sucre diminue suite à un changement des conditions climatiques comme la remontée des températures ou l'arrivée progressive de pluies (Comm. Pers Martiné, 2001), c'est la surmaturation dont on a parlé. En général, à la récolte, une tige usinable remplie de sucre pèse entre 500g et 2kg de matière fraîche (Fauconnier, 1991).

Dans l'ensemble, le processus d'accumulation du sucre est compliqué, très dépendant des conditions de culture et différents stress ; le manque de connaissances rend difficile la modélisation de l'évolution de la teneur en sucre à l'échelle de la parcelle (Inman-Bamber, 1996).

II.B. Fonctions physiologiques de la canne à sucre

II.B.1. Assimilation

L'analyse de Monteith, à laquelle on fait souvent référence, s'appuie sur une hypothèse simple : le fait que la production de matière sèche peut être considérée comme proportionnelle au

rayonnement intercepté par la culture, dépendant lui-même de l'indice foliaire. La présentation suivante repose sur cette schématisation.

II.B.1.a. Interception par les feuilles et Indice Foliaire

On considère communément que l'indice foliaire (surface de feuilles m^2/m^2 de sol, aussi appelé LAI pour Leaf Area Index) se met en place à partir de la levée et que sa cinétique d'évolution en fonction de la somme des températures ΣT ($^{\circ}j$) est correctement modélisée par la loi de Gompertz définissant une sigmoïde (Thornley, 1990, cité par Martiné 1996a). La température de base T_0 utilisée pour le calcul de la somme des températures (à partir des températures moyennes journalières $T_{moy j}$) est le plus souvent de $12^{\circ}C$, celle qui donne la meilleure relation entre LAI et la somme des températures (Martiné, 1998a).

$$\begin{aligned} \Sigma T &= \Sigma_j (T_{moy j} - T_0) \text{ (d'après le modèle de la somme des températures)} \\ \text{soit } \Sigma T &= \Sigma_j (T_{moy j} - 12) \\ LAI &= g(\Sigma T) \end{aligned}$$

Martiné initialise dans son modèle de croissance MOSICAS la mise en place du LAI à $100^{\circ}j$, avec un LAI initial $LAI_0 = 0,1$ et définit un LAI maximal $LAI_{max} = 6$ (Martiné, 1996a). Le LAI optimum pour l'interception est d'environ 4,5 – 5, et au-delà, la modélisation est moins précise car les mesures de LAI élevés sont moins fiables. Cependant, l'interception du rayonnement ne varie plus beaucoup pour des valeurs de LAI élevées donc la perte de précision n'a pas trop de répercussions (Varlet-Grancher, 1982 ; Martiné, 1996a).

L'efficacité journalière d'interception \bullet_i est ensuite estimée à partir de l'indice foliaire selon l'équation de Beer-Lambert (Varlet-Grancher & Bonhomme, 1979 ; Martiné, 1996a ; Amir & Sinclair, 1991, cités par Brisson *et al.*, 1998). L'efficacité maximale $\bullet_{i max}$ est supérieure à 90 % du rayonnement incident chez tous les végétaux, sa valeur est en général considérée comme constante et égale à 0,95 (Varlet-Grancher, 1982 ; Varlet-Grancher *et al.*, 1989), bien que le calage de l'équation avec les observations de Martiné (1996a) donne $\bullet_{i max} = 0,98$. Le coefficient k d'extinction de la lumière dans le couvert végétal est caractéristique de l'espèce et de la variété, détermine le port de la plante et dépend du mode de plantation (écartement entre rangs). Il est égal à 0,55 dans notre cas, variété R570 avec écartement de 1,5m entre les rangs (Martiné, 1995). Des mesures récentes de LAI et d'efficacité d'interception auraient tendance à fournir une valeur de coefficient d'extinction de 0,48 (Comm. pers. Martiné, 2001). 0,59 est la moyenne obtenue par Varlet-Grancher (1982) pour un ensemble de variétés de canne à sucre, ce qui est cohérent avec la fourchette (0,4-0,7) obtenue pour les graminées par Jones (1985, cité par Martiné 1996a).

$$\bullet_i = \bullet_{i max} (1 - e^{-kLAI}) \text{ soit } \bullet_i = 0,95(1 - e^{-0,55LAI}) \text{ soit encore } \bullet_i = 0,95(1 - e^{-0,55g(\Sigma T)})$$

Le domaine de validité de cette équation dépend de celui de la fonction LAI. On peut exprimer l'efficacité d'interception directement en fonction de la somme des températures avec une loi tirée de celle de Gompertz. L'interception débiterait avec le LAI vers $100^{\circ}j$ et son efficacité atteindrait la valeur de 0,9 pour le LAI optimum de 4,5.

L'efficacité d'interception permet d'estimer la quantité de rayonnement incident PAR_{0j} (MJ/m^2) qui est interceptée (PAR_{ij} (MJ/m^2)) par le couvert au cours d'une journée, le PAR_{0j} étant lui-même une fraction du rayonnement global incident R_g (MJ/m^2). On considère en général que la moitié du rayonnement global est utile à la photosynthèse (longueurs d'onde du visible) et

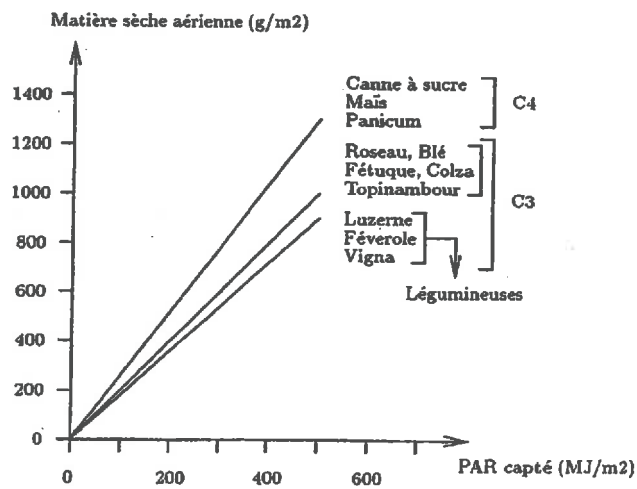
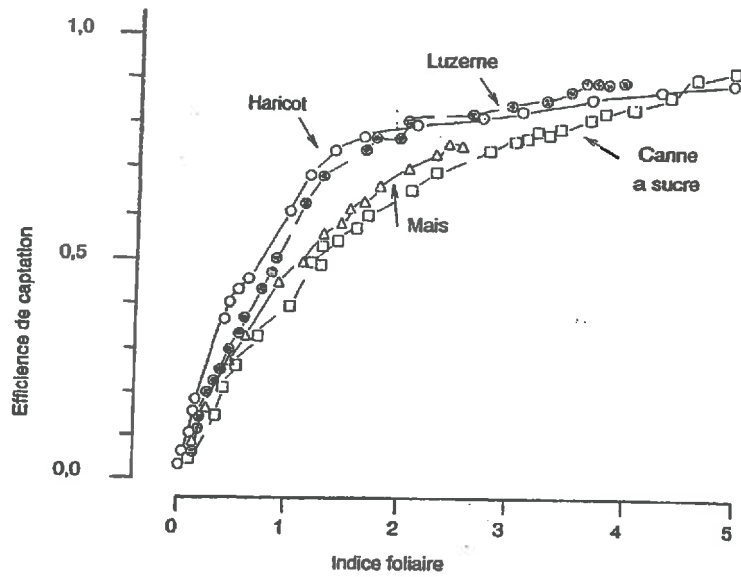


Figure 1.8 : Efficience d'interception du rayonnement par la canne à sucre et de sa conversion en biomasse comparées à d'autres types de plantes (Bonhomme, 1996)

l'efficacité climatique la plus utilisée est 0,48 d'après Jones (1992, cité par Martiné, 1996a), Varlet-Grancher (1982) et Varlet-Grancher *et al.* (1989).

$$PAR_{0j} = 0,48R_{gj} \text{ et } PAR_{ij} = \bullet_i \times PAR_{0j}$$

Nous comprenons que le LAI de cannes démarrant en saison fraîche se mettra en place plus lentement que des cannes démarrant en saison chaude. De même l'accumulation de biomasse aérienne sera plus lente pour des cannes démarrant en période de faible rayonnement (hiver) que pour celles démarrant en été. La saison de la date de coupe a beaucoup d'effet sur la mise en place de l'indice foliaire et l'accroissement en biomasse, que ces équations permettent de prendre en compte.

II.B.1.b. Conversion et biomasse aérienne

Le modèle de Monteith (Monteith, 1981, cité par Martiné 1996a) permet le calcul de la croissance (pendant un certain pas de temps) en biomasse aérienne (g/m^2) en fonction du rayonnement photosynthétiquement actif intercepté (au cours de ce pas de temps) à travers l'efficacité \bullet_c (g/MJ) de conversion de l'énergie lumineuse (MJ/m^2) en matière sèche. Cette formalisation globale ne distingue pas photosynthèse et respiration mais fournit la matière sèche aérienne nette produite.

$$MSa_j = \bullet_c \times PAR_{ij} \text{ donc } MSa = \sum_j \bullet_c \times PAR_{ij}$$

Le maximum de matière sèche aérienne produite par jour dépend donc du climat et du taux de couverture foliaire. Thomson (1978, cité par Lingle, 1999) calcule (en moyenne sur la durée du cycle) un maximum de $9g/m^2/j$ pour une culture irriguée et $11g/m^2/j$ pour une culture non irriguée.

L'efficacité de conversion varie avec l'âge, qui induit une augmentation de la respiration d'entretien, et la température (Martiné *et al.*, 1999). C'est à la base des jeunes feuilles que l'assimilation est plus active (Fauconnier, 1991). La température optimale est comprise entre 30 et 32°C d'après Fauconnier (1991), ce qui est cohérent avec les 31°C obtenue par Martiné (1996a) pour une efficacité de conversion maximale $\bullet_{c \max}$ trouvée égale à 3,46 g/MJ de PAR_{ij} à la Réunion (Martiné, 1998a). Cette valeur appartient au domaine de valeurs de RUE_{\max} (Radiation Use Efficiency) obtenues par Muchow (1994) et Robertson (1996) en Australie (3,2-3,5 g/MJ de PAR_{ij} soit 1,6-1,75 g/MJ de R_g). Cependant la comparaison n'est pas rigoureuse car ces valeurs ont été obtenues à partir de cumuls de biomasse et de rayonnement intercepté et non à partir des valeurs journalières (Martiné *et al.*, 1999). 1,75 g/MJ de R_g serait aussi, d'après Muchow *et al.* (1994), le maximum théorique pendant la phase linéaire de croissance pour l'ensemble des plantes en C_4 en conditions non stressées. La figure 1.8 situe l'efficacité d'interception et de conversion de la canne parmi d'autres types d'espèces cultivées.

Toutes ces équations (paramétrées par espèce ou groupes d'espèces) caractérisent le fonctionnement de tous les végétaux au potentiel climatique (limité par la température et la lumière uniquement) et permettent de prédire le rendement agricole en conditions hydriques, nutritionnelles, phytosanitaires et de densité optimales.

II.B.1.c. Partition des assimilats dans la biomasse aérienne et relation « source-puits »

La relation entre la matière sèche aérienne de tige et la matière sèche de feuilles en conditions optimales est indépendante de l'environnement thermique et radiatif. Le taux de partition (MS_j de tiges/ MS_j de feuilles) est nul au départ (la plante ne comporte quasiment que des feuilles) et

augmente linéairement jusqu'à 0,75 où il se stabilise d'après Martiné (1996a). Lorsque les tiges de canne croissent et se remplissent, les assimilats produits par les feuilles sont dirigés à la fois vers ces dernières pour le maintien de l'assimilation et vers les tiges. La compétition est intense et un équilibre nécessaire, les conditions favorables à la croissance n'étant pas les mêmes, on l'a vu, que celles favorables à l'accumulation de sucre (Lingle, 1999). Le rendement en cannes fraîches sera déterminé par l'importance de la matière sèche de tige usinable (par rapport au reste de la MSA) et par son humidité, dont les proportions évoluent au cours du temps et avec la biomasse aérienne totale. Nous savons que le manque d'azote et l'indisponibilité de l'eau favorisent la concentration du sucre et minimisent la teneur en impuretés sans trop affecter le rendement (Lingle, 1999). Les connaissances sur la répartition des assimilats et l'influence de différents facteurs sur cette répartition sont toutefois encore assez limitées. Elles seraient cependant utiles à la compréhension de l'effet du sevrage pratiqué usuellement et à sa modélisation.

Quant à la partition des assimilats entre biomasse aérienne et racinaire, elle est très peu connue. En général les équations permettent de convertir directement le rayonnement en biomasse aérienne, l'allocation aux racines n'étant pas modélisée ou indirectement prise en compte.

II.B.2. Absorption minérale et action des stress

II.B.2.a. Un enracinement particulier

Après les « racines de bouture », à la vie passagère, minces, ramifiées et superficielles, viennent les « racines de tiges », plus longues et plus durables. Elles ont deux rôles, l'absorption et la fixation. Il convient d'après Evans (1936, cité par Fauconnier, 1991 et Chopart & Marion, 1994) d'en distinguer trois sortes : des racines superficielles (ramifiées, absorbantes), des racines de fixation (plus profondes) et des racines cordons (qui peuvent descendre jusqu'à 6m en conditions de sol favorables). 50% des racines se trouvent entre 0 et 25cm et 90% jusqu'à 60cm ; elles sont très sensibles à l'excès d'humidité, au manque d'air et à la température du sol (Fauconnier, 1991). Le rapport poids de tiges sur poids de racines n'a aucune signification chez la canne cependant, il est vrai que la biomasse racinaire tend à diminuer avec l'âge de la culture et au cours du cycle de culture en même temps que la biomasse aérienne des repousses successives (Van Antwerpen *et al.*, 1993). L'absorption d'eau est limitée entre autres par la densité du système racinaire.

II.B.2.b. Le prélèvement des éléments minéraux

L'absorption d'eau est aussi liée à l'évapotranspiration réelle ETR (mm) journalière qui dépend du niveau de remplissage de la réserve utile en eau et de l'évapotranspiration maximale ETM (mm) directement liée à l'ETP par l'intermédiaire du coefficient cultural K qui dépend de l'état du couvert (indice foliaire) (Martiné, 1996b). L'ETR n'est plus maximale à partir du moment où la plante subit un stress hydrique, *i.e.* quand elle commence à puiser l'eau dans la réserve difficilement utilisable (fraction de la réserve utile du sol). L'absorption d'eau dans ce cas est réduite.

En ce qui concerne le prélèvement d'azote minéral, il dépend de la quantité présente dans le sol, de sa disponibilité (dépendante des conditions hydriques) et des besoins de la plante (bien qu'une consommation de luxe soit possible). Les besoins d'une plante en azote sont exprimés par sa courbe de « dilution critique » de l'azote dans la biomasse aérienne. Si le pourcentage d'azote dans la biomasse passe en dessous de la teneur critique (établie pour cette valeur de biomasse), les besoins ne sont plus satisfaits et la plante subit un stress azoté.

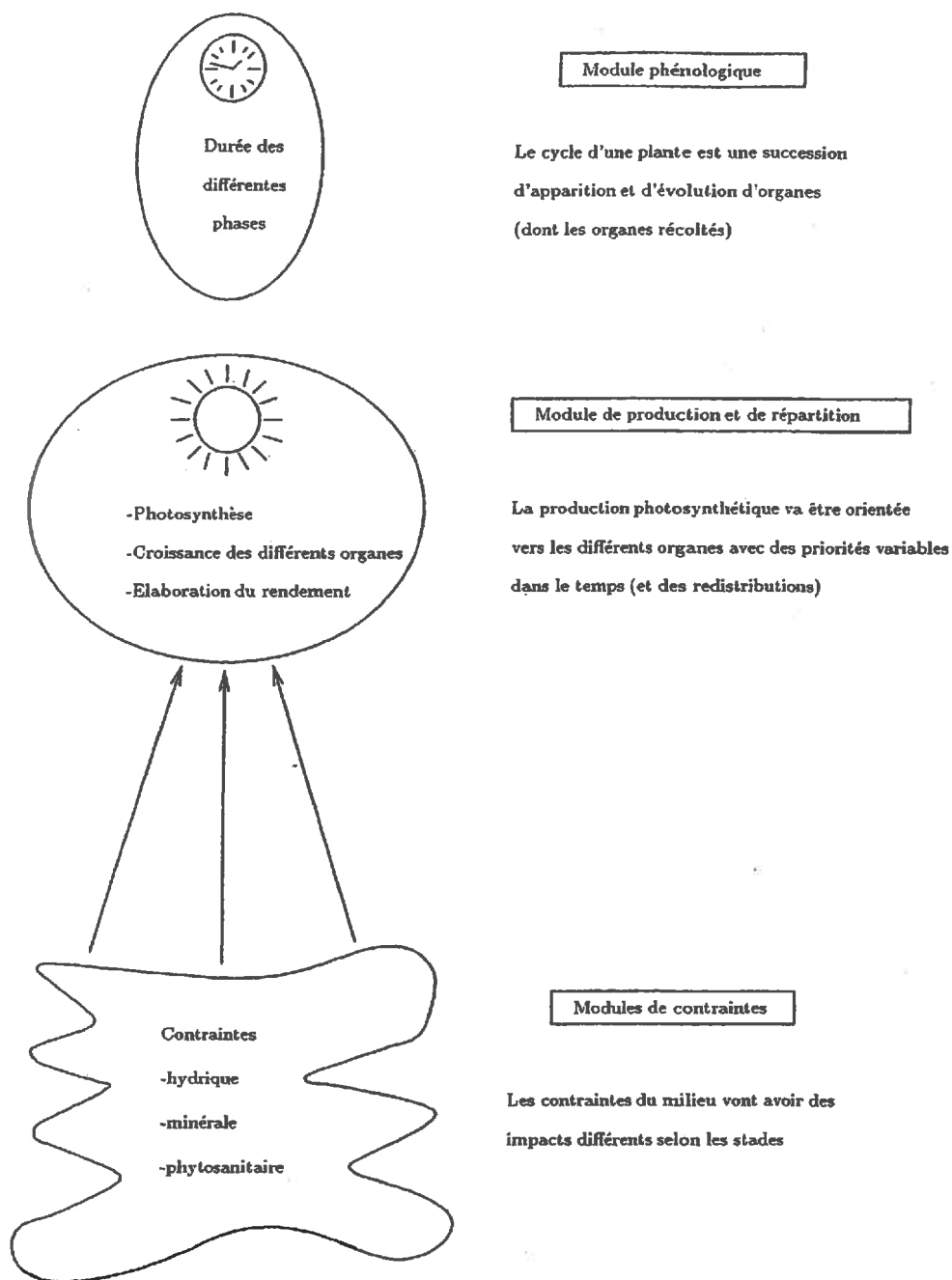


Figure 1.9 : Schéma général des modèles de simulation de culture (Bonhomme, 1996)

Nous n'irons pas dans le détail des bilans hydriques et azotés puisque, dans notre travail, nous nous intéresserons surtout aux parties aériennes fonctionnant en conditions d'alimentation optimales. Nous ne nous intéresserons pas non plus à l'influence des ravageurs car les pertes de rendement dues à des attaques ne sont jamais prises en compte dans les modèles actuels de simulation de culture, qui cependant intègrent de plus en plus les contraintes hydrique et azotée.

III. LA MODELISATION, LES MODELES CANNE ET LE MODELE STICS

III.A. Généralités sur les modèles de simulation de culture

III.A.1. Définitions (Bonhomme *et al.*, 1996 ; Brisson *et al.*, 1996 ; Delécolle *et al.*, 1996)

Un modèle de fonctionnement d'une culture est un ensemble de relations mathématiques permettant de représenter par analogie un aspect de la réalité. Un tel modèle permet de calculer l'état du système à travers des **variables d'état** en fonction de valeurs ajustées, les **paramètres** relatifs aux différents processus et de **variables d'entrée** connues, internes ou non au système, dont la valeur est susceptible de changer à chaque pas de temps. Le calcul des variables de sorties conduit à une vision quantitative et dynamique de l'action combinée de différents facteurs environnementaux sur le fonctionnement d'ensemble d'une culture. Ces modèles de simulation sont aussi appelés modèles mécanistes.

Un paramètre a une valeur qui ne varie pas au cours d'une simulation, l'ensemble des paramètres constitue la boîte noire du modèle. La valeur des paramètres est ajustée pour que le modèle puisse représenter au mieux et raisonnablement l'état du système. La **sensibilité** des variables de sortie à ses paramètres diffère selon les paramètres et les résultats d'un modèle seront d'autant meilleurs que ses paramètres sensibles seront bien ajustés et que ses conditions d'application seront proches de celles dans lesquelles il a été établi.

Les qualités de ce type de modèles résident dans la capacité à simuler ou prévoir les phénomènes qu'ils décrivent de façon simplifiée, dans un **domaine de validité** (ensemble de conditions pour lesquelles le modèle fonctionne) le plus étendu possible. Le principal intérêt de ces modèles est l'intégration des connaissances associée à une échelle de temps et d'espace. En tant qu'outil de compréhension, ils permettent d'expliquer des résultats expérimentaux et souligner les manques de connaissances. Tous les modèles peuvent se décomposer en trois grandes parties (d'après les travaux de de Wit (1965, cité par Bonhomme *et al.*, 1996) qui sont à la base du développement de ce type de modèles (*cf.* Fig. 1.9) :

- un module **phénologique** qui rend compte des différents stades d'une culture et donc de la priorité de croissance des différents organes. Les variables climatiques concernées sont principalement la température et éventuellement la photopériode.
- un module de **production et de répartition de la biomasse** : il fait intervenir les phénomènes biologiques liés à la photosynthèse et à la respiration. C'est le rayonnement solaire qui est le moteur de cette production, orientée par la suite entre les différents organes suivant les priorités de croissance définies dans le calendrier phénologique.
- un module de **contraintes** : l'introduction de différentes contraintes permet de passer de la production potentielle, modélisée par les modules précédents, à la production réelle d'une culture

Tableau 1.1 : Comparaison des modèles de simulation de la culture de canne

Modèle	Référence	Spécifiques canne	Domaine de validité	Prise en compte de la sénescence	Formalisation conversion	Effet T°C sur la conversion	partition	Humidité des tiges usinables
AUSCANE	Jones <i>et al.</i> , 1989 (Australie)	oui			globale	oui		f(MStu, âge)
CERES-cane	Inman-Bamber, 1991	non			fonctionnelle			
CANEGRO	Inman-Bamber, 1991, 1995 (Afrique du Sud)	oui	Variété NCo376	De LAI	fonctionnelle	non	f(biomasse aérienne totale)	f(MStu, âge)
APSIM-sugar	Keating <i>et al.</i> , 1994 ; Robertson <i>et al.</i> , 1995 (Australie)	non	Variétés australiennes	aucune	globale	oui	f(biomasse aérienne totale)	
QCANE	Liu & Kingston, 1995 (Australie)	oui	Variétés australiennes	De LAI	fonctionnelle	oui	f(T°C, rayonnement et saison)	
MOSICAS	Martiné, 1996 (La Réunion)	oui	Variété R570, repousse	De LAI et tiges	Fonctionnelle	oui	f(biomasse aérienne totale)	f(Σ T base 0)

III.A.2. Les différentes étapes de construction d'un modèle

(inspiré de Leterme, 2001)

- Il s'agit tout d'abord de poser la question à laquelle le modèle permettra de répondre et dans quel champ d'application, puis d'exprimer les **hypothèses** et de définir les **concepts** et sur lesquels reposera ce modèle. Il est alors possible de **formaliser un jeu d'équations** reliant les variables d'état aux paramètres et variables d'entrée et de délimiter leur domaine de validité.
- L'étape suivante de **calibration** suppose que les formalismes sont exacts et s'attache à donner des valeurs aux paramètres par différents moyens et à les caler sur un jeu de données. Si le résultat de cette étape ne donne déjà pas satisfaction, il faut retourner aux formalismes et éventuellement aux hypothèses de départ.
- Une fois le jeu de paramètre considéré comme correct, on doit procéder à l'**évaluation** de la qualité prédictive du modèle sur jeu de données indépendant en confrontant ses résultats à la réalité. Si elle met en relief des défauts, il est nécessaire de retoucher aux paramètres et si l'échec persiste, on remonte les différentes étapes de construction du modèle.
- A condition que le modèle soit muni de ses équations et paramètres, on peut passer à son **application** en réponse à des objectifs divers du moment qu'on ne s'écarte pas du domaine de validité.

III.A.3. Besoin en modèles et utilisation

Les modèles de simulation de culture sont construits dans un but plus ou moins opérationnel, conçus pour donner une réponse adaptée aux vraies questions des agriculteurs (Boote *et al.*, 1996) et s'adressent à différentes catégories d'utilisateurs. Ils ne se substituent pas à l'expérimentation mais orientent l'agronome vers une solution. Ce sont des outils de diagnostic et d'aide à la décision. Ils permettent par exemple de réaliser des bilans dynamiques à l'échelle du cycle de la culture et d'évaluer les risques environnementaux, ou d'orienter la gestion d'une culture et ses choix stratégiques (irrigation, etc...). Leur abondance est le reflet de l'inexistence d'un modèle universel selon Sinclair et Seligman (1996).

III.B. Avantages et limites des modèles de simulation de la culture de canne existants

Il existe actuellement 3 principaux modèles de simulation de la culture de canne. Ils ont été créés pour répondre aux divers besoins des agriculteurs d'améliorer leur efficacité de production et de l'industrie sucrière pour optimiser l'extraction du sucre. Il s'agit du sud africain CANEGRO et des australiens APSIM-sugar et QCANE. Les concepts agronomiques et écophysologiques qu'ils incarnent diffèrent selon ces besoins. Ainsi, le modèle QCANE est basé sur des concepts de couvert plus sophistiqués que les autres modèles. Ces modèles dérivent de précurseurs comme CERES-maïs (Jones & Kiniry, 1986, cités par Inman-Bamber, 1991) ou AUSCANE lui-même inspiré d'EPIC (Williams *et al.*, 1984, cités par O'Leary, 2000). Les versions des 3 modèles antérieures à 1994 n'allaient pas jusqu'à la prédiction du rendement en sucre et ne simulaient que la croissance en biomasse et le rendement en conditions de potentiel. La comparaison de leur niveau de détail et de complexité dans la représentation des processus a été effectuée dans un article de Keating *et al.* (1994) selon la méthode de Ritchie (1991, cité par Keating *et al.*, 1994). CANEGRO s'est avéré très sensible à la date de plantation. QCANE et CANEGRO semblent mieux qu'APSIM et AUSCANE prédire l'éventuelle diminution de matière fraîche en fin de cycle grâce à leur prise en compte de la respiration d'entretien. Le tableau 1.1 présente ces différents modèles, leurs auteurs et ce qui les réunit et les distingue.

Tous ces modèles présentent en général de bonnes performances globales même si les simulations d'indice foliaire s'écartent des observations à partir d'un LAI supérieur à 4, ce qui n'a pas beaucoup d'incidence car l'efficacité d'interception du rayonnement au-delà de cette valeur de LAI ne varie presque plus. Un modèle de fonctionnement et d'élaboration du rendement de la canne à sucre en conditions potentielles MOSICAS a été développé plus récemment à la Réunion par Martiné (1996a) à partir d'AUSCANE et CANEGRO. Il s'est montré capable de fournir des références régionales sur les potentialités de la canne à sucre à la Réunion dont on a vu que les conditions climatiques sont très variées. Son utilisation a souligné l'importance de l'altitude, de la date de coupe, de l'âge et de la variabilité interannuelle sur la croissance (Martiné, 1997a). Dans MOSICAS, comme dans la plupart des modèles, la croissance en biomasse racinaire n'est pas modélisée à partir d'allocation d'assimilats mais indépendamment. Les coefficients des équations de conversion du rayonnement intercepté en biomasse sont calés sur ce qui est mesurable, à savoir la biomasse aérienne uniquement. Sa formalisation dynamique lui permet d'intégrer ultérieurement l'action de stress. L'humidité des tiges usinables est mal estimée dans tous ces modèles, mais une amélioration est possible avec l'intégration des effets de stress (Martiné *et al.*, 1999).

Après 1995, ces modèles à pas de temps journalier ont commencé à s'intéresser à la simulation de l'accumulation de sucre et à son évolution en conditions de stress hydrique. Un nouveau bilan de leur performance dans la prédiction du rendement en sucre en conditions non optimales a été réalisé par O'Leary (2000). Notons qu'aucun de ces modèles ne se base sur des stades bien définis pour piloter le développement et la croissance. Tous ont permis une meilleure compréhension des processus d'élaboration du rendement et de l'influence du climat même si l'on manque encore de connaissances précises sur l'effet du stress hydrique sur la partition des assimilats en sucre stocké et sur sa variabilité variétale et entre cannes vierges et repousses. Cette approche modélisatrice devrait permettre de proposer des pistes de gestion de la culture et de l'irrigation de la canne à sucre selon différentes stratégies de maturation en vue d'optimiser le rendement en canne et la pureté de son jus tout en préservant la ressource en eau et en respectant l'environnement. Il s'agira pour nous ensuite de vérifier que le modèle STICS, par définition non spécifique à la canne à sucre, est capable de remplir cet objectif. Procédons tout d'abord à sa présentation détaillée

III.C. Les particularités du modèle STICS

Le but de cette partie est de présenter les objectifs du modèle STICS, ses caractéristiques et les processus qu'il permet de modéliser. Nous nous intéresserons ensuite plus particulièrement aux formalismes et concepts des modules concernant l'évolution de la biomasse aérienne en vue de faire ultérieurement (*cf.* 2^{ème} partie, I.A. et 3^{ème} partie, II.A.) le bilan de leur confrontation aux processus réels du développement, de la croissance en biomasse aérienne et de l'élaboration du rendement de la canne à sucre que nous avons étudiés.

III.C.1. Généralités et principes de généricité et de modularité

(Brisson *et al.*, 1998 ; Tayot *et al.*, 1998, Les échos du département E.A., 2001)

Le modèle STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard) a pour objectif de simuler les effets du contexte pédo-climatique et des pratiques culturales sur la production en qualité et en quantité d'une culture et sur son environnement. STICS est un modèle dynamique qui fonctionne au pas de temps journalier et les principaux processus simulés sont la croissance

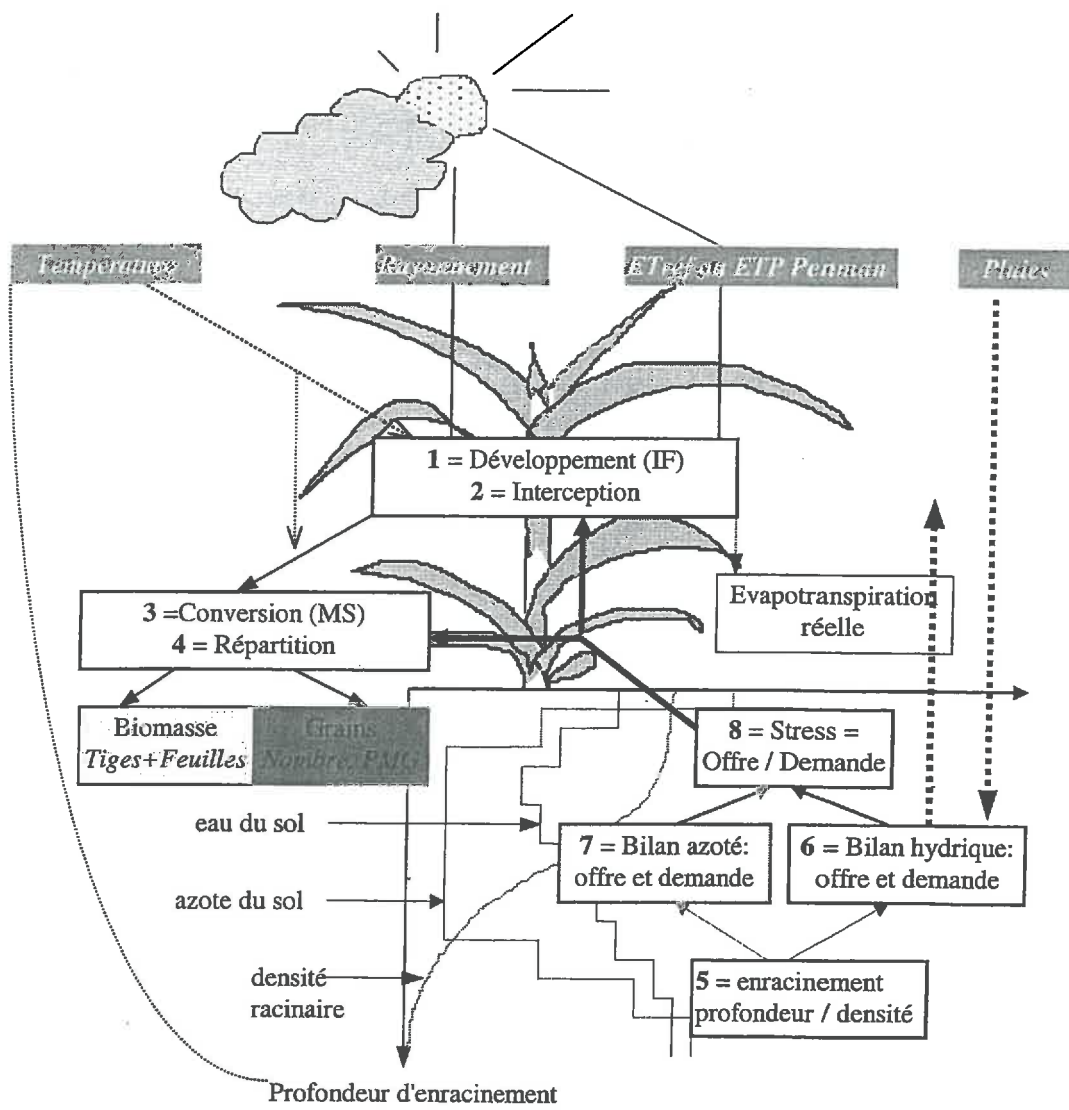


Figure 1.10 : Principe de fonctionnement du modèle STICS (Tayot, 1998)

et le développement de la culture ainsi que les bilans hydrique et azoté du système sol-culture-atmosphère sur la durée du cycle cultural. L'objet simulé est la situation culturale pour laquelle on peut définir de façon déterministe un milieu physique et un itinéraire technique homogènes (par exemple la parcelle agricole). STICS est capable d'intégrer une variabilité spatiale et temporelle. Les formalisations choisies reposent le plus souvent sur des analogies connues ou sur la simplification de formalismes plus complexes. Ses variables d'entrées sont relatives au climat au sol et au système de culture. Ses variables de sorties concernent l'état du couvert, au rendement et à l'évolution des caractéristiques du milieu sous l'effet de la culture. La limite supérieure du système est l'atmosphère caractérisée par les variables climatiques standard et la limite inférieure l'interface sol-sous-sol.

Dans STICS, la culture est appréhendée globalement par sa biomasse aérienne (échelle du couvert), son indice foliaire et le nombre et la biomasse des organes récoltés par unité de surface. Les organes végétatifs (tiges et feuilles) sont considérés comme formant un tout contrairement à certains des autres modèles présentés ci-dessus qui s'inquiètent de la dynamique d'apparition et de sénescence des feuilles et tiges. Dans le cas de la canne, la modélisation de l'indice foliaire par l'intermédiaire de ses composantes fonctionne assez bien mais peut encore être améliorée (Martiné, 1996a). Nous verrons ultérieurement (cf. 3^{ème} partie, II.A.3.) comment séparer pour la canne la partie structurale des tiges de la partie sucre (qui leur confère leur rôle d'organe récolté) dans le formalisme de STICS. Dans STICS, c'est donc la température qui est la variable d'entrée expliquant la croissance potentielle des feuilles. Ceci n'est pas le cas dans d'autres modèles (dont les formalismes ne sont en général pas très robustes) basés sur la surface spécifique des feuilles (Van Keulen & Seligman, 1987, cités par Brisson *et al.*, 1998) dépendant du rapport masse structurale/non structurale (Thornley, 1996, cité par Brisson *et al.*, 1998). Ce rapport varie lui-même en fonction de l'âge de la feuille, de la température (Gary *et al.*, 1993, cités par Brisson *et al.*, 1998) et d'autres contraintes. Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales, chacune étant caractérisée par son épaisseur, sa réserve en eau et en azote minéral ou organique. Les interactions entre le sol et la culture sont assurées par les racines, définies par une densité racinaire distribuée dans le profil de sol.

La croissance de la culture est pilotée de façon classique par le bilan de carbone (formalisation globale : photosynthèse nette) : interception du rayonnement incident par l'indice foliaire et conversion en biomasse aérienne (cf. module décrit dans le point III.C.3.). Le module de **développement**, piloté par un indice thermique (la somme des degrés-jours, éventuellement modulée par la photopériode), permet de modéliser les dates d'apparitions de stades (qui n'existent pas aussi nettement dans les modèles de simulation de la culture de canne présentés ci-dessus) sur lesquels est basée la cinétique de l'indice foliaire et du remplissage des organes récoltés (cf. module décrit dans le point III.C.2.). Le type de modélisation de l'**interception** et de la **conversion** est en général commun aux différents modèles et c'est plutôt dans la répartition des assimilats et la prise en compte des stress que les modèles se distinguent (Comm. Pers. Ruget, 2001). L'existence éventuelle de stress hydrique ou azoté est prise en compte au travers d'indices (rapports entre l'offre et la demande) dont la valeur est comprise entre 0 et 1 et qui peuvent réduire la croissance foliaire, l'accumulation de biomasse aérienne et la croissance racinaire en longueur en conditions limitantes. La **croissance des racines** est supposée indépendante de celle des parties aériennes, la profondeur racinaire étant calculée en fonction du temps thermique. La **biomasse aérienne** est quant à elle répartie entre les organes végétatifs et reproducteurs (relation source-puits). Le **rendement** (en quantité) est calculé par accroissement d'un indice de récolte par degré-jour (cf. module décrit dans le point III.C.5.). Le **bilan hydrique** est réalisé par couche de sol. L'évapotranspiration est la somme de l'évaporation du sol (fonction de l'humidité du sol en surface et de l'état de la culture) et de la transpiration de la culture

(fonction de l'indice foliaire). Le **bilan azoté** calculé par tranche de 1 cm simule l'azote présent dans le sol (minéralisation, apports, lessivage), l'offre en azote disponible par l'enracinement et la demande de la culture estimée par les courbes de dilution. La modélisation des bilans, carboné, hydrique et azoté, permet de calculer des données agricoles (rendement, consommation d'intrants), aussi bien qu'environnementales (pertes en eau, lessivage de nitrates) (cf. Fig. 1.10).

STICS est typiquement un modèle d'« ingénierie » conformément à la dénomination de Passioura (1996) : il s'agit d'un outil de simulation qui doit être opérationnel en conditions agricoles. Les paramètres sont relativement peu nombreux et tirés de publications antérieures. Les variables d'entrée sont facilement accessibles en conditions agricoles.

L'originalité de STICS réside dans trois caractéristiques principales qui ont influencé la conception de sa structure :

- sa **généricité** : adaptabilité à différents types de plante (blé, maïs, fourrages, tomate, tournesol, vigne, betterave...). Seuls quelques paramètres par fonctions nécessitent des adaptations par espèce.

- sa **robustesse** : capacité à simuler des conditions pédo-climatiques variées sans générer de biais importants, au détriment parfois de la précision locale.

- sa **modularité** : organisation en différents modules ou sous-systèmes traitant de mécanismes spécifiques. Un premier ensemble de modules concerne l'écophysiologie des parties aériennes de la plante (développement, croissance aérienne et élaboration du rendement). Un second traite du fonctionnement du sol en interaction avec les parties souterraines des plantes (croissance racinaire, bilan hydrique, bilan azoté, transferts d'eau, de nitrates et de chaleur). A l'interface se trouve un module de gestion des interactions entre les techniques culturales et le système sol-culture (apports d'eau, d'engrais). Le principe d'**optionalité** (sous-modules au choix dans les modules) permet d'étendre l'adaptation du modèle à des types de plante et des systèmes de culture variés (option croissance déterminée/indéterminée, culture pérenne/annuelle, mode de récolte, décision de récolte, présence de cailloux ou non, besoins en froid ou non, action du gel ou non...). Le tout confère à STICS une certaine **évolutivité**.

Nous ne présenterons ici en détail que les modules de l'ensemble traitant d'écophysiologie des parties aériennes puisque seul ceux-ci feront l'objet de notre travail présent (Brisson *et al.*, 1998 ; Notice concepts et formalismes, 1999 et Comm. Pers. Brisson (2001) pour les nouveautés qui feront partie de la version STICS 5.0).

III.C.2. Concepts et formalismes du module de « Développement »

✓ Le sous-programme de « Levée », calcule la date d'apparition de ce stade (variable de sortie : jour ILEV (jour julien)) pour les cultures semées ou le démarrage de la culture après plantation pour les cultures plantées, ce qui sera considéré être notre cas (date de plantation : paramètre d'entrée technique IPLT (jour julien)). Pour les cultures plantées, une phase de latence entre plantation et démarrage peut être simulée de façon analogue à une phase de germination à partir d'une somme de degrés-jours (paramètre STPLTGER (°j)), la température de base correspondant à la valeur donnée au paramètre TGMIN (°C). Les défauts de levée ne sont pas pris en compte, par conséquent la densité de plantes introduite comme paramètre technique d'entrée correspond à une densité de plantes levées (Nous reviendrons sur les problèmes posés par la notion de plante et de densité appliquées à la canne à sucre dans le point II.A.1.b).

✓ Entre la levée et la maturité physiologique, les durées séparant les stades successifs sont propres à l'espèce et à la variété (paramètre d'entrée technique GPRECO). Les stades définis

Tableau 1.2 : Variables et paramètres du module de développement

Variable d'entrée	Paramètres d'entrée (technique)	Paramètres internes	Unité	Variables de sortie (jour julien)	
$T_{moy j}$ (°C)	IPLT (jour julien) GPRECO IRECBUTOIR	STPLTGER	Dégrés-jours	ILEV	Dates d'apparition des différents stades
		TGMIN	°C	IAMF	
		TDMIN	°C	ILAX	
		TDMAX	°C	ISEN	
		STLEVAMF	Dégrés-jours	ILAN	
		STAMFLAX	Dégrés-jours	IDRP	
		STLAXSEN	Dégrés-jours	INOUE	
		STSENLAN	Dégrés-jours	IMAT	
		STLEVDRP	Dégrés-jours	IREC	
		STDRPNOU	Dégrés-jours		
		DUREEFRUIT	Dégrés-jours		
				Date de récolte	

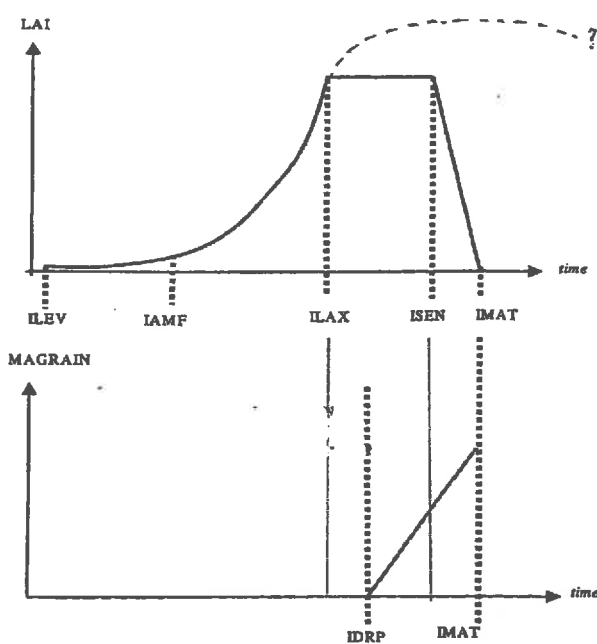


Figure 1.11 : Relation entre l'indice foliaire, le poids sec des fruits et les stades de développement (en pointillé pour les indéterminées) (Brisson et al., 1998)

Tableau 1.3 : Echelles phénologiques de développement dans STICS

Stades de développement de la phase végétative		Stades de développement de la phase reproductrice	
IPLT			
LEV			
AMF	Accélération maximale de la croissance foliaire Fin de phase juvénile	DRP	Début de remplissage du grain (déterminées) ou fruit (indéterminées)
LAX	Indice foliaire maximal (déterminées) ou vitesse d'accroissement maximale (indéterminées)	NOU	Fin de nouaison des fruits
SEN	Début de sénescence nette de la plante	MAT	Maturité physiologique
LAN	Indice foliaire nul		
REC			

III.C.3.a. LAI

Le sous-programme de « croissance en surface des feuilles » calcule l'évolution de l'indice foliaire par différence entre le LAI brut formé et le LAI sénéscent dans l'option calcul LAInet = LAIbrut - LAIsénéscent que nous avons choisi d'utiliser et de présenter. Il est important que le modèle simule précisément le LAI surtout pendant les phases de mise en place en début de cycle (importance du choix de la valeur du paramètre STLEVAMF, d'après Brisson *et al.*, 1998) et pendant celle de sénescence nette (si on peut considérer qu'elle existe chez la canne...). En effet le besoin de précision est moins important quand le LAI est élevé car on a vu que l'interception atteint son niveau de saturation, or le LAI n'a dans le modèle qu'un rôle d'interception du rayonnement)

L'équation de la croissance foliaire nette (variable interne DELTAI (m²feuilles/m²sol/j) active dans STICS est inspirée des travaux de : DELTAI de Singels & de Jager (1991, cités par Brisson *et al.*, 1998)

$$\text{DELTAI} = \text{DLAIMAXBRUT} / (1 + e^{\text{PENTLAIMAX} \times (\text{VLAIMAX} - \text{ULAI})}) \times (\text{TCULT} - \text{TCMIN}) \times \min(\text{TURFAC}, \text{INNS}) \times \text{EFDENSITE} \times \text{DENSITE} \times \text{SPLAI}$$

Le paramètre TCMIN (°C) représente la température minimale de croissance de l'indice foliaire. Le paramètre DLAIMAXBRUT (m²feuilles/m²sol/plante/°j) est le maximum de croissance foliaire par plante. La croissance foliaire nette par °j par plante sans stress (soit DLAIMAXBRUT / (1 + e^{PENTLAIMAX x (VLAIMAX - ULAI)})), est une fonction de l'unité arbitraire de développement foliaire (variable interne ULAI). ULAI vaut 1 au stade LEV, 2 au stade AMF et 3 au stade LAX. Le paramètre PENTLAIMAX représente la pente au point d'inflexion (paramètre VLAIMAX). Pour les plantes à croissance déterminée, cette fonction retombe à zéro entre ULAI = UDLAIMAX et ULAI = 3. Pour les plantes à croissance indéterminée, la fonction ne s'annule pas et reste à son maximum (DLAIMAXBRUT) jusqu'au stade SEN (*cf.* fig. 1.12).

Dans STICS, la notion de culture à croissance indéterminée signifie que la phase végétative avec croissance de feuilles chevauche la phase reproductrice et qu'il y a compétition trophique entre le feuillage et les organes récoltés. La phase de plateau de LAI (entre les stades LAX et SEN) n'existe pas : on est soit en croissance nette (jusqu'à SEN et plus seulement jusqu'à LAX), modulée par le rapport source/puits, soit en sénescence nette (reportée très loin dans la saison). L'idée de découpler l'accroissement de LAI (courbe logistique) de sa sénescence (logistique ou exponentielle) vient des travaux de Baret (1986), Milroy & Goyne (1995) et Chapman *et al.* (1993) (cités par Brisson *et al.*, 1998) et n'a été introduite dans STICS que récemment.

La sénescence, basée sur la durée de vie des feuilles (et accélérée par les stress eau, azote et éventuellement gel) est calculée par jour au moyen d'un Q₁₀ de 2 selon l'expression suivante :

$$2^{(\text{TCULT} - \text{TCMIN}) / 10}$$

Elle s'applique à partir du moment où la durée vie d'une feuille (paramètre DURVIEF) est écoulée, avec possibilité que la durée de vie pour les feuilles apparues entre LEV et AMF (paramètre DURVIEI (proportion de DURVIEF)) soit inférieure à DURVIEF et croisse entre AMF et LAX pour atteindre le maximum à LAX. Avant l'introduction du calcul LAIbrut-LAI sénéscent, la sénescence indirectement était prise en compte dans le calcul direct.

L'effet densité EFDENSITE (variable interne prenant une valeur comprise entre 0 et 1) suppose qu'en dessous d'une densité seuil (paramètre BDENS (plantes/m²)), il n'y a pas compétition

entre les plantes : la surface foliaire d'une plante est indépendante de la densité et l'indice foliaire est obtenu en faisant le produit de cette surface avec la densité (paramètre technique d'entrée DENSITE (plantes/m²)). Au-delà de cette densité seuil, la surface foliaire par plante décroît selon une exponentielle. Le paramètre ADENS représente la capacité de la plante à supporter des densités croissantes. Il dépend de l'espèce et éventuellement de la variété. Pour les plantes qui tallent, ADENS représente la capacité de tallage, pour les mono-tiges, il représente la compétition inter plante en peuplement. L'effet densité est actif à partir d'un certain seuil de LAI (paramètre LAICOMP). L'équation présentée ci-dessous et adoptée dans STICS vient des travaux de Singels & de Jager (1991, cités par Brisson *et al.*, 1998) (cf. Fig. 1.13). Nous verrons que le renseignement de ces paramètres peut être difficile pour la canne à sucre.

$$\text{EFDENSITE} = (\text{DENSITE} / \text{BDENS})^{\text{ADENS}} \text{ avec } 0 \leq \text{EFDENSITE} \leq 1$$

Les paramètres TURFAC et INNS représentent respectivement les indices de stress hydrique et azoté.

La fonction SPLAI, variable interne, prend la valeur du rapport source/puits (variable interne SOURCEPUITS, calculée dans le module d'élaboration du rendement) entre 2 seuils (paramètres SPLAIMIN et SPLAIMAX), la valeur 0 en dessous de SPLAIMIN et la valeur 1 au-dessus de SPLAIMAX (cf. Fig. 1.14). On définit la force de puits des organes végétatifs (matière sèche attribuée aux feuilles : variable interne FPV (g/m²/j)) à partir de la croissance foliaire nette journalière DELTAI (modulée par SPLAI) et de la variable interne SBVMIN (cm²/g). SBVMIN est calculée à partir de la surface massique des feuilles (paramètre SLAVERTMIN (cm²/g)) et du rapport masse structurale de tiges / masse de feuilles (paramètre TIGEFEUILLE).

$$\begin{aligned} \text{SBVMIN} &= \text{SLAVERTMIN} / (1 + \text{TIGEFEUILLE}) \\ \text{FPV} &= \text{DELTAI} \times 10^4 / \text{SBVMIN} \end{aligned}$$

↘ C'est le cumul des valeurs de DELTAI calculée jour après jour qui donne l'indice foliaire. Le tableau 1.4 récapitule les variables et paramètres intervenant dans son calcul.

III.C.3.b. Biomasse aérienne

✓ Le sous-programme d' « interception du rayonnement » permet le calcul de la quantité de rayonnement solaire intercepté par jour (variable interne RAIN (MJ/m²/j)) par une culture homogène (par opposition aux cultures en rang comme la vigne). L'équation utilisée correspond à une loi de Beer, TRG étant la variable d'entrée rayonnement global incident (MJ/m²/j), EXTIN (paramètre) le coefficient d'extinction spécifique à la culture et LAI la variable calculée par le sous-programme décrit précédemment.

$$\text{RAIN} = 0,48 \times \text{TRG} \times 0,95(1 - e^{-\text{EXTIN} \times \text{LAI}})$$

✓ Le sous-programme de « croissance en biomasse des parties aériennes » calcule l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté et l'accumulation journalière de biomasse aérienne. Cette accumulation (variable interne DLTAMS (t/ha/j)) répond au rayonnement intercepté selon une loi parabolique qui fait intervenir une efficacité d'utilisation maximale du rayonnement propre à chaque espèce, la variable intermédiaire EBMAX (g/MJ de RAIN). Cette efficacité peut être différente selon les phases du cycle. Elle est égale à la valeur des paramètres suivants :

- EFCROIJUV pendant la phase de démarrage (LEV-AMF) où on tient compte indirectement de l'accumulation préférentielle d'assimilats dans les racines en début de cycle,
- EFCROIPEG pendant la phase de croissance suivant celle de croissance juvénile et

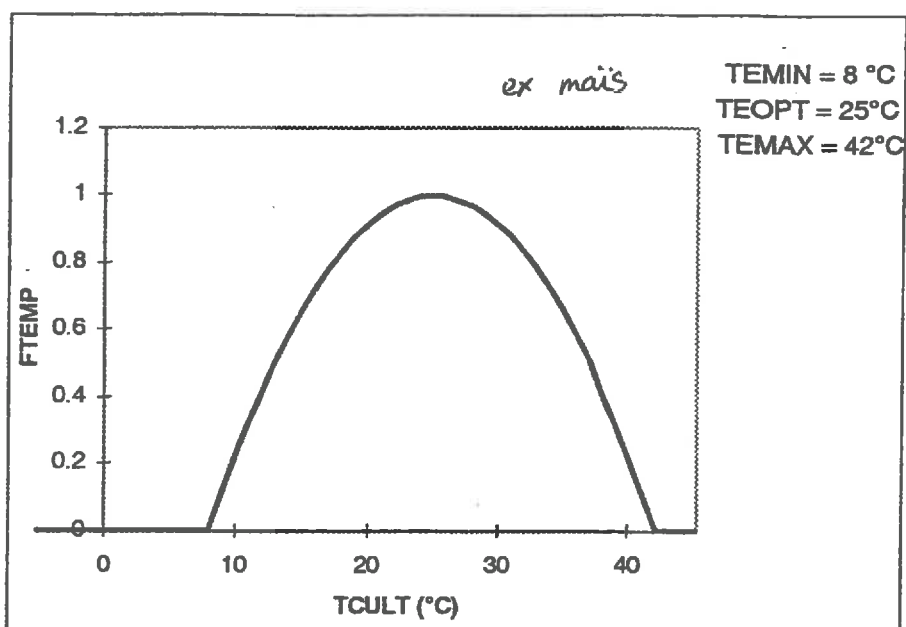


Figure 1.15 : La fonction FTEMP (effet de la température sur l'efficacité de conversion) de STICS (Brisson, 1999)

Tableau 1.5 : Variables et paramètres intervenant dans le calcul de la biomasse aérienne

Variables d'entrée	Paramètres internes	Unité	Variables de sortie	
TRG (MJ/m ²)	EXTIN		RAINT	MJ/m ² t/ha
T _{moy j} (°C)	EFCROIJUV	g/MJ	MASEC	
	EFCROIVEG	g/MJ		
	EFCROIREPRO	g/MJ		
	TEMIN	°C		
	TEOPT	°C		
	TEOPTBIS	°C		
	TEMAX	°C		
	H ₂ OFRUILVERTE	g H ₂ O/g MF		
	H ₂ OFEUILJAUNE	g H ₂ O/g MF		

- EFCROIREPRO à partir du stade DRP. La valeur du coefficient de la parabole (0,0815) vient des travaux de Boote & Jones (1986) (cités par Brisson *et al.*, 1998). La forme parabolique indique un ralentissement de l'étape de conversion pour de forts rayonnements.

$$DLTAMS \times 100 = (EBMAX \times RAIN - 0,0815 \times RAIN^2) \times f(TCULT) \times SWFAC \times INNS$$

DLTAMS est également une fonction de la température selon une courbe ($f(TCULT)$) qui met en jeu 3 températures cardinales : les paramètres TEMIN, TEMAX et TEOPT (°C). S'il existe un plateau de température optimale on peut l'introduire grâce à une seconde température optimale (paramètre TEOPTBIS). TEMIN et TEMAX peuvent être égales aux températures seuils de la croissance foliaire TCMIN et TCMAX (cf. Fig. 1.15).

Si $TCULT < TEOPT$ alors $f(TCULT) = 1 - [(TCULT - TEOPT)/(TEMIN - TEOPT)]^2$

Si $TCULT \geq TEOPT$ alors $f(TCULT) = 1 - [(TCULT - TEOPT)/(TEMAX - TEOPT)]^2$

Avec $0 \leq f(TCULT) \leq 1$

Les deux stress intervenant aux travers des indices de stress hydrique (variable interne SWFAC) et azoté (INNS), sont ici supposés agir de façon indépendante sur DLTAMS.

✓ STICS propose un calcul de la sénescence en biomasse de la plante à partir du stade SEN, mais nous ne détaillerons pas ces formalismes car la canne est supposée ne pas mourir à l'échelle d'un cycle de culture. Nous en discuterons dans la 3^{ème} partie (cf. II.A.2.b.).

✓ La teneur en eau des organes non récoltés est constante. Les paramètres correspondants aux différents organes ou compartiments sont (g d'eau /g de matière fraîche) H₂OFEUILVERTE, H₂OFEUILJAUNE, H₂OTIGESTRUC et H₂ORESERVE. Ils servent à calculer la matière fraîche de chacun des organes.

✎ C'est le cumul des valeurs de DLTAMS calculée jour après jour qui donne la biomasse aérienne totale.

Le tableau 1.5 récapitule les variables et paramètres intervenant dans son calcul.

III.C.4 Quelques précisions sur le module de « Croissance racinaire »

En ce qui concerne la croissance des racines, STICS calcule une avancée en longueur du front d'enracinement (variable de sortie ZRAC (cm)) par l'intermédiaire du paramètre CROIRAC (cm/°j) qui définit la vitesse de croissance potentielle pour l'espèce considérée. Elle peut être affectée par l'anoxie (paramètre SENSANOX à valeur comprise entre 0 et 1) si le sol est trop humide et par la sécheresse si l'option frein hydrique sur la progression racinaire est activée. La progression du front racinaire dépend de la température, les seuils étant TCMIN et TCMAX si c'est l'option « pilotage par la température de culture » qui est sélectionnée. Elle démarre à la profondeur PROFSEM (paramètre technique d'entrée(cm)) et s'arrête si elle atteint un obstacle à la profondeur OBSTARAC (paramètre d'entrée sol (cm)) ou au plus tard à LAX pour les plantes à croissance déterminée ou SEN pour les indéterminées. Le même sous programme calcule la densité racinaire en fonction de la profondeur (option « profil de densité optimale »). A chaque profondeur atteinte par la variable ZRAC, on fait correspondre un profil efficace de forme sigmoïdale dépendant des paramètres ZLABOUR (profondeur de la couche labourée (cm)), ZPENTE (profondeur où l'efficacité d'absorption racinaire est réduite de moitié) et ZPRLIM.

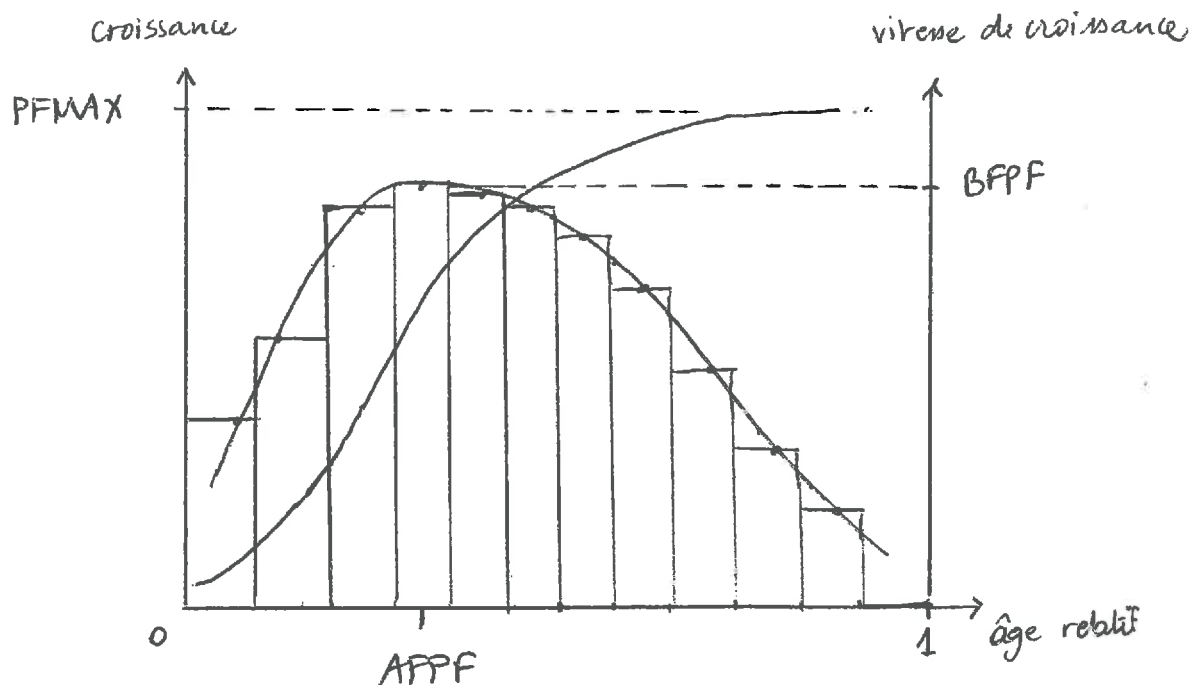


Figure 1.16 : La fonction de croissance des fruits, leur vitesse de croissance et le principe des boîtes

Tableau 1.6 : Variables et paramètres du module d'élaboration du rendement et de la qualité

Variable d'entrée	Paramètres d'entrée (technique)	Paramètres internes	Unité	Variables de sortie	
$T_{moy j}$ (°C)	DENSITE GPRECO	NBINFLO AFRUITPOT STFLODRP STDRPNOU DUREEFRUIT NBOITE AFPFF BPPFF PGRAINMAXI VITPROPSUCRE SPFRMIN SPFRMAX H ₂ OFRVERT STDRPDES DESHYDBASE	/pl /°j/inflorescence Degrés-jours Degrés-jours Degrés-jours g MS g sucre/g MS/°j g H ₂ O/g MF Degrés-jours g H ₂ O/g MF/j	MAFRUIT NBFruit PDSFRUITFRAIS SUCRE H ₂ OREC	t/ha /m ² t/ha g/g mF g H ₂ O/g MF

III.C.5. Concepts et formalismes du module d'« Elaboration du rendement »

Ce programme calcule le nombre d'organes récoltés (variable de sortie NBFruit (/m²) et leur poids individuel (g) et total (total sec : variable de sortie MAFruit (t/ha), total frais : variable de sortie PDSFRUITFRAIS (t/ha)). Il prédit donc le rendement, en tenant compte des interactions entre le remplissage de ces organes récoltés et la croissance végétative pour les plantes à croissance indéterminée.

✓ Le formalisme et le vocabulaire de ce module viennent de la tomate. On considère que les organes récoltés se mettent en place pendant la phase qui va du stade DRP (commençant à la date IDRP) au stade NOU (fin de « nouaison », nous verrons à quoi faire correspondre cette notion chez la canne à sucre dans la 3^{ème} partie, II.A.3.) dont la durée est définie par le parcours de développement prenant la valeur du paramètre STDRPNOU (°j). Pendant cette période, chaque jour le nombre de « fruits noués » (variable interne NFRUITNOU (m².j⁻¹)) dépend du nombre potentiel de fruits noués par degré-jour et par inflorescence (paramètre AFRUITPOT (°j⁻¹)), du nombre d'inflorescences par plante (paramètre NBINFLO), de la densité, de SPFRUIT, de l'unité de développement thermique et de l'action du gel inexistante dans notre cas. Nous reviendrons dans la 3^{ème} partie (point II.A.3.a.) sur ce que nous considérerons comme une inflorescence pour la canne. SPFRUIT (variable interne de la même forme que SPLAI) prend la valeur du rapport source/puits (variable intermédiaire SOURCEPUITS) entre 2 seuils (paramètres SPFRUITMIN et SPFRUITMAX), la valeur 0 en dessous de SPFRUITMIN et la valeur 1 au-dessus de SPFRUITMAX. Une option permet de faire jouer le stress azoté sur le nombre de fruits noués.

$$\text{NFRUITNOU} = \text{AFRUITPOT} \times \text{NBINFLO} \times \text{DENSITE} \times \text{SPFRUIT} \times \text{UDEVCULT} \\ (\times \text{GELFLO} \times \text{INNS})$$

Le cumul des valeurs prises par cette variable sur le nombre de jours correspondant à la durée STDRPNOU donne le nombre de fruits /m² à la récolte.

Une fois le fruit mis en place, il entre dans une première « boîte », chaque boîte (nombre de boîtes : paramètre NBOITE) correspondant à une classe d'âge à laquelle est appliquée une vitesse de croissance calculée par la fonction FPFT. La durée totale de croissance du fruit correspond à la valeur du paramètre DUREEFRUIT (°j) (à DUREEFRUIT / NBOITE °j près). Chaque fruit reste dans chaque boîte pendant une durée DUREEFRUIT / NBOITE sauf éventuellement dans la première boîte pour les fruits entrés peu avant le passage collectif de l'ensemble des fruits de la boîte dans la boîte suivante. C'est la variable interne POUFRUIT, prenant les valeurs 1 ou 0, qui fait respectivement passer ou non l'ensemble des fruits d'une boîte dans la suivante. La fonction FPFT (g/m²/j) est la dérivée d'une fonction de croissance de type logistique et admet comme paramètres AFPP, BFPP et PFMAX. AFPP est l'âge relatif des fruits pour lequel la vitesse de croissance est maximale, PFMAX est le potentiel de croissance atteint par un fruit (fixé par le paramètre PGRAINMAXI), enfin BFPP correspond à la courbure de la logistique (cf. Fig. 1.16).

La variable SOURCEPUITS est calculée par le rapport entre la croissance totale journalière (DLTAMS + remobilisation éventuelle à partir des réserves) sur la force totale des puits et varie entre 0 et 1.

$$\text{SOURCEPUITS} = (\text{DELTAMS} \times 100 + (\text{REMOBIL})) / (\text{FPV} + \Sigma \text{FPFT})$$

La plante puise dans ses réserves (variable interne MARESPERENNE représentant la biomasse ne faisant ni partie des fruits, ni des feuilles, ni de la biomasse structurale de tige) jusqu'à une proportion maximale (paramètre REMOBRES) si SOURCEPUTS est inférieure à 1.

✓ STICS propose depuis peu une estimation simple de la teneur en sucre dans les nouveautés du module « qualité ». On suppose qu'il y a une augmentation linéaire de ce composé dans la matière sèche des fruits entre le début de remplissage et la maturité physiologique. Cette augmentation est dimensionnée par le paramètre VITPROPSUCRE (g/g MS/°j). La combinaison de cette évolution et de celle de la teneur en eau calculée de façon dynamique pour les organes récoltés aboutit à des teneurs dans la matière fraîche (variable de sortie SUCRE (g/g MF)).

✓ On suppose que la teneur en eau dans les fruits (paramètre H₂OFRVERT) est constante jusqu'à un stade caractérisé par une somme de température STDRPDES (paramètre (°j)). Ce stade de début de déshydratation peut être antérieur à la maturité physiologique. A partir de ce stade, STICS calcule l'évolution de l'humidité des fruits (représentée par la variable de sortie H₂OREC) à partir du paramètre DESHYDBASE (g d'eau/g MF/j). Un stress hydrique peut temporairement accentuer la déshydratation par l'intermédiaire du paramètre TEMPDESHYD (g d'eau/g MF/j).

✓ STICS peut calculer une date de récolte à partir de différents critères de décision. On peut choisir de déclencher la récolte à la maturité physiologique, ou quand la teneur en eau ou en sucre atteignent un minimum ou un maximum. En ce qui nous concerne, la variable SUCRE déclenche la récolte si elle dépasse la valeur du paramètre SUCREREC (g/g MF).

Le tableau 1.6 récapitule les variables et paramètres intervenant dans le module d'élaboration du rendement et de la qualité.

Problématique

Cette étape de synthèse bibliographique met en relief l'**originalité du fonctionnement de la canne à sucre**, en comparaison avec les autres plantes auxquelles Stics a été adapté, et fait ressortir les concepts caractérisant ce dernier. Nous comprenons ainsi pourquoi l'« adaptation » de Stics à la canne à sucre passe inévitablement par une phase de **confrontation** de l'état actuel du modèle et de ses formalismes et paramètres à la réalité de la physiologie de la canne à sucre. Ceci soulève une nouvelle fois la question : Comment concilier la **préservation de la généricité** qui fait la particularité du modèle et des buts de ses créateurs avec les **objectifs à long terme d'application de Stics-canne** par ses utilisateurs exigeant une certaine qualité de prédiction ? Ces objectifs définissent le cadre de la calibration envisagée et nécessitent une certaine adéquation (même simplifiée) des formalismes aux vrais processus commandant le développement et la croissance de la canne à sucre.

Dans l'optique de l'hypothèse formulée dans l'introduction, nous décidons donc de ne pas toucher aux formalismes initiaux de Stics, communs avec d'autres cultures, et d'établir dans la mesure du possible et en les discutant, des correspondances entre ses concepts (notions de « levée », « densité », « stades » de développement, « fruit », « maturité »...) et la logique de fonctionnement de la canne à sucre.

Les questions qui se posent après cette étape importante de choix de la manière d'intégrer au mieux les mécanismes réels dans la structure générique de Stics que nous avons choisi de respecter sont de nature à guider la démarche de calibration. Comment renseigner les paramètres des modules qui ne feront pas l'objet du calage (croissance racinaire, bilans hydrique et azoté, transferts d'éléments) mais qui doivent quand même tourner avec des valeurs moyennes et plausibles représentant le milieu tropical dans lequel la canne puise ses éléments nutritifs pour une alimentation non limitante ? Quels paramètres caler dans les modules de mise en place d'indice foliaire, de croissance de la biomasse aérienne et d'élaboration du rendement, et selon quelles priorités ? Quelle valeur leur attribuer et à partir de quelle source ? Sur quelles variables de sorties les ajuster ? A partir de quelles données expérimentales et obtenues de quelle façon ?

L'objectif que nous nous fixons et qui nécessite la réponse à l'ensemble des questions précédentes consiste à essayer d'obtenir, dans le respect des contraintes imposées, avec les moyens dont nous disposons et en suivant une démarche rigoureuse, un **jeu de paramètres caractérisant la mise en place et l'évolution des parties aériennes de la variété R570 fonctionnant au potentiel climatique**.

Il sera nécessaire enfin de préciser les limites de ce calage. Elles conditionnent en effet la suite du travail (qui ne fera pas l'objet du présent mémoire), constitué des étapes de paramétrage en conditions non optimales, d'évaluation sur jeu de données indépendant et éventuellement recalibration avant utilisation du modèle pour répondre à l'objectif agronomique initial. C'est sa perspective qui guide et justifie la démarche adoptée.

2^{ème} PARTIE

MATERIEL ET METHODES

Nous avons procédé par étapes afin d'essayer autant que possible de renseigner solidement un premier jeu de paramètres sur lequel une suite donnée à ce présent travail pourra se baser. Les valeurs de paramètres proposées en fin de ce mémoire ne sont pas indépendantes les unes des autres et sont à considérer avec le raisonnement qui a conduit à les attribuer. Pour résoudre les problèmes soulevés par l'adaptation de STICS à la canne à sucre, nous avons d'abord fait le point des moyens dont nous disposions, déterminé ce dont nous avons besoin par rapport aux objectifs et puisé parmi les informations bibliographiques, les données expérimentales et l'état actuel du modèle STICS ce qui nous a semblé utile.

I. PRELIMINAIRES NECESSAIRES A L'ADAPTATION DE STICS A LA CANNE A SUCRE

I.A. Compréhension et confrontation des fonctionnements d'un couvert de canne à sucre et du modèle de simulation STICS

L'analyse bibliographique, dont l'essentiel a été présenté précédemment, nous a permis de faire le bilan des particularités de la culture et de la physiologie de la canne à sucre d'une part, et des originalités du modèle STICS et contraintes imposées par sa structure d'autre part. Nous avons à présent une vision d'ensemble de la canne à sucre dans son environnement de modélisation. Il s'agit maintenant pour nous d'intégrer STICS à cet environnement et réciproquement la canne à sucre à l'ensemble des cultures dont le fonctionnement est modélisé dans STICS car on s'attend à ce que l'un et l'autre s'enrichissent mutuellement. On peut considérer que le modèle et la plante sont nouveaux l'un pour l'autre et que, suite au travail qui a consisté à faire le point des connaissances sur le peuplement de canne à sucre et à comprendre les principes de modélisation dans STICS, une étape de confrontation des deux s'avère nécessaire. C'est donc à l'interface entre la réalité complexe de la canne à sucre et la modélisation simplificatrice de ses mécanismes que nous allons travailler.

Ce sont les correspondances que nous établirons entre les objets réels et leur représentation dans STICS (cf. 3^{ème} partie, II.A.), les valeurs que nous déciderons d'attribuer aux paramètres (cf. 3^{ème} partie, II.A. et III.A.) et l'ensemble des hypothèses et moyens à disposition guidant ces choix qui feront l'objet de la suite du présent mémoire.

I.B. Besoins de STICS pour son exécution optimale

L'objet de cette partie est de présenter concrètement mais rapidement le protocole à suivre par un utilisateur pour pouvoir faire tourner le modèle STICS avec le logiciel WINSTICS 5.0 (version juillet-août 2001, provisoire), son système de gestion informatique fonctionnant sous environnement WINDOWS. Nous distinguerons les fichiers qui doivent être renseignés par tout utilisateur du modèle (climat, sol, techniques et observations) de ceux auxquels ne touchent théoriquement que le modélisateur et le « paramétriseur » (plante et généraux). En effet, les fichiers de paramètres, de variables d'entrée et de variables observées sont renseignés directement à partir des données expérimentales et ces grandeurs ne font pas l'objet d'un calage. Dans notre cas, ils seront renseignés à partir des données CIRAD-Réunion. Pour plus de précisions et de détails techniques de manipulation de l'interface, se reporter aux notices « Entrées-Sorties » et « Utilisateur » (Brisson *et al.*, 1999).

1.B.1. Renseignement des fichiers d'entrée

1.B.1.a. Les variables climatiques

Le modèle fonctionnant au pas de temps journalier, il requiert des données météorologiques journalières, et ce au minimum pendant la période de simulation définie. Attention, STICS fonctionne en jours juliens (nombre de jours depuis le premier janvier de l'année courante ou précédente, si la simulation a lieu sur 2 années successives) et non en date, donc il faut formater les fichiers climatiques pour que STICS puisse les utiliser. Le nom de la station météo et sa latitude sont aussi nécessaires. Les fichiers se présentent sous la forme NomStation(8 caractères)j.année (exemples Tirano0j.97 et Barau00j.99).

Les variables climatiques à fournir sont :

- La température minimale (°C)
- La température maximale (°C)
- Le rayonnement global (MJ/m²)
- Les précipitations (mm)
- L'ETP Penman (mm)

1.B.1.b. Les paramètres sol

L'utilisateur doit renseigner les paramètres suivants pour caractériser un sol :

- Pour la **couche de surface** : Teneur en argile (paramètre ARG1 (%)), teneur en calcaire (paramètre CALC (%)), teneur en azote organique (paramètre NOR1 (%)) dans l'horizon d'humification (dont la profondeur est comprise entre la profondeur de labour et 60 cm)
- Pour le **sol dans son ensemble** : Albedo du sol nu sec, profondeur maximale de minéralisation de l'azote (paramètre PROFHUM (cm)), profondeur d'un éventuel obstacle racinaire (paramètre OBSTARAC (cm))
- Pour **chaque horizon** (en définir au moins 1 et au plus 5) : épaisseur (paramètres EPC (cm)), humidité pondérale à la capacité au champ pour la terre fine (paramètres HCCF (g/g)), humidité pondérale au point de flétrissement pour la terre fine (paramètres HMINF (g/g)), densité apparente de la terre fine (paramètres DAF).

Différentes options, selon qu'elles sont sélectionnées ou non par l'utilisateur, activent ou désactivent certains paramètres qui seront ou non utilisés par le modèle. Parmi les 5 qui sont proposées (Ammonium, Volatilisation, Cailloux, Macroporosité et Sol gonflant), nous n'en avons dans le cadre de ce travail sélectionné qu'une, les autres ne correspondant pas à des effets connus et importants dans les sols dont nous disposons des données (Comm. Pers. Martiné, 2001). Il s'agit de l'option « Ammonium ». Elle permet de rendre une partie de l'azote, sous forme ammoniacale (NH₄⁺) et présent en grande quantité dans les sols tropicaux, non accessible au lessivage. CONCSEUIL est la concentration à partir de laquelle l'azote sous forme ammoniacale est lessivable.

Un sol est identifié par un nom attribué par l'utilisateur (exemple Tirbrunandik pour un sol brun andique du site Tirano et BarandikN pour un andosol de la zone nord) et un numéro auquel on fera référence quand on construira une unité de simulation. L'ensemble des caractéristiques des sols ainsi définis est regroupé dans le fichier param.sol présenté en annexe.

1.B.1.c. Les données techniques

Le fichier des paramètres culturaux (de la forme Nom Essai.tec, exemples tii97.tec et bap99.tec) est organisé en différentes rubriques correspondant aux opérations culturales intervenant durant le cycle de la plante. Les informations que l'utilisateur doit saisir sont relatives à :

- la date (JULTRAV (jour julien)) et la profondeur (PROFTRAV (cm)) de **travail du sol** avec ou sans enfouissement de résidus ou d'amendements organiques dont il faut préciser le type (paramètre CODERES), la quantité (QRES (t MF/ha)) et la qualité (rapport C/N, teneur en eau et en azote)

- la date (IPLT) et la profondeur (PROFSEM (cm)) de **semis** ou **plantation** en indiquant la densité de plantes à la levée (DENSITE (/m²)) et la variété semée (GPRECO).

- les stades. La possibilité de « forçage » des stades à partir de dates d'apparition observées sur le terrain s'offre à l'utilisateur. Cette option n'est pas utile dans un objectif de prévision tel que le nôtre. Nous avons laissé STICS calculer la date de réalisation des différents stades à l'aide des sommes des températures paramétrées dans la rubrique variétale du fichier Plante. Nous avons affecté au paramètre IRECBUTOIR (**date butoir de récolte** qui tronque le cycle si les critères de décision de récolte ne sont pas atteints) la date réelle (imposée par des considérations socio-économiques) de récolte, et si elle n'est pas connue, la date des dernières observations faites sur le couvert. Si ces observations ne sont pas disponibles, nous avons fixé IRECBUTOIR à une date qui suit de peu les dernières interventions culturales (irrigation par exemple).

- l'**irrigation** : date et dose d'apport (mm), coefficient d'efficacité (paramètre EFFIRR à valeur comprise entre 0 et 1) et localisation sur frondaison, à la surface du sol ou en profondeur dans le sol (paramètre LOCIRRIG(cm))

- la **fertilisation** azotée : date et dose d'apport (kgN/ha), coefficient d'efficacité (paramètre EFFN à valeur comprise entre 0 et 1) et localisation à la surface du sol ou en profondeur (paramètre LOCFERTI (cm)). S'il s'agit de ferti-irrigation (mais ça n'a pas été le cas dans les essais dont nous avons les données), il faut préciser la concentration en azote de l'eau d'irrigation (paramètre CONCIRR). Les options de calcul automatique des apports d'eau et d'engrais peuvent être activées, ce que nous n'avons pas fait, possédant les informations nécessaires au renseignement de ces rubriques.

- la suite après la récolte. Cette rubrique permet de préciser le type de résidus restitués au sol : paille, racines, culture, rien.

I.B.1.d. Les fichiers observations

Ces fichiers (de la forme NomEssai.obs, exemple tii97.obs et bap99.obs) permettent de saisir de nombreuses données observées qui pourront par la suite être comparées aux valeurs des variables calculées par le modèle, et ce, dans le but, pour nous, de caler les paramètres de façon à obtenir l'écart minimum entre les variables observées et simulées. Nous précisons dans une partie suivante lesquelles nous avons choisi de saisir et d'utiliser pour notre calage (cf. II.D.2.a.). La comparaison des variables simulées aux variables observées permet surtout d'évaluer la performance du modèle sur un large jeu de données, étape qui ne fait pas l'objet du présent mémoire mais de la suite qu'il est prévu de lui donner.

Les données observées sont de 2 natures :

- Soit ce sont des **bilans à la récolte** : biomasse aérienne totale (MS), rendement en fruit (MS et MF), nombre de fruits, poids d'un fruit (MF), quantité d'azote dans la plante et dans les fruits et récapitulatif des dates des stades

- Soit ce sont des **valeurs dynamiques** : LAI, biomasse aérienne totale (MS), biomasse de fruit (MS), teneurs en eau et en azote dans le sol (dans chaque horizon et cumulées sur une profondeur donnée), azote dans la plante et profondeur atteinte par le front racinaire. Pour les besoins de STICS en cours d'adaptation à la canne, nous avons introduit dans les variables que STICS peut comparer à des données observées les suivantes : la biomasse fraîche de fruit (qui

Gestion des Unités de Simulation

USM disponibles :

Identificateur de la nouvelle USM :

Pour ajouter une USM :

- 1) partir d'une usm existante,
- 2) faire les modifications,
- 3) saisir le nouvel identificateur,
- 4) cliquez sur Ajouter une usm.

Fichiers sélectionnés :

Technique

Climatique 1

Climatique 2

Plante

Sol

LAI

Période de simulation

Début

Fin

Culture sur 2 années

initialisation pour démarrage en cours de culture

Démarrage à un stade

snu

plt

lev

amf

lax

drp

sen

Etat de la plante au démarrage

LAI0

masec0

Zrac0

magrain0

QNplante0

Initialisations sol

	Hinit	Ninit	densinitial
1	<input type="text" value="39.4"/>	<input type="text" value="50.0"/>	<input type="text" value="0.00"/>
2	<input type="text" value="40.2"/>	<input type="text" value="50.0"/>	<input type="text" value="0.00"/>
3	<input type="text" value="39.6"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.00"/>
4	<input type="text" value="37.4"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.00"/>
5	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.00"/>

* la valeur 0.0 est un code signifiant
Hinit=HCCF

Figure 2.1 : Fenêtre de WINSTICS permettant de constituer une unité de simulation et de l'initialiser (version provisoire 5.0)

représente le rendement et donc la base de rémunération), la teneur en sucre de la matière fraîche des fruits et la teneur en eau des fruits.

1.B.2. Exécution des simulations

Pour faire fonctionner le modèle, il faut au préalable constituer une unité de simulation (USM). Elle fait appel aux 4 types de fichiers (entrées climatiques, sols, techniques et observations) décrits précédemment et à 2 autres fichiers contenant les valeurs des paramètres calés ou à caler : le fichier plante (pour nous canne.plt) et le fichier des paramètres généraux (param.par). A terme (une fois que la version 5.0 sera figée) les paramètres généraux seront peu nombreux et les seuls à ne pas être modifiés selon les espèces. Pour l'instant la répartition des paramètres entre les fichiers plante et généraux n'est pas définie et dépend des introductions de nouveaux paramètres et des modifications de l'exécutable Stics5.exe. Nous ne distinguerons donc pas ici ces 2 fichiers. Chaque USM est unique et réunit les conditions de la simulation réalisée pour un type de sol, un contexte climatique, un itinéraire technique et un jeu de données observées sur une plante. Pour un utilisateur de STICS-canne, les fichiers « plante » et « paramètre généraux » sont identiques d'une simulation à une. Dans la pratique, pour les besoins de la calibration, nous avons créé de nombreuses unités de simulation. Pour chaque association climat-sol-techniques-observations correspondant à un site expérimental, nous avons fait varier certains paramètres des fichiers plante et généraux jusqu'à obtention de valeurs jugées satisfaisantes selon des critères statistiques. Nous précisons dans la suite de cette partie (pt II.) quels essais nous avons conservés pour effectuer les simulations, quels paramètres nous avons fait varier et quels critères ont permis leur acceptation.

1.B.2.a. Les paramètres plante et généraux

Sous l'interface WINDOWS, ils sont classés en différentes rubriques correspondant en général aux sous-programmes des modules décrits dans notre 1^{ère} partie (cf. III.C.2, 3, 4, 5). Ces rubriques sont donc les suivantes :

- **Paramètres variétaux** : somme des températures nécessaires à l'accomplissement des différents stades, paramètre de l'effet densité, poids maximal d'un fruit, vitesse maximale de croissance racinaire
- **Développement** : seuils de température, seuils de photopériode
- **Levée** : seuils de température, somme de température nécessaire
- **LAI croissance** : seuils de température, taux maximum d'accroissement de l'indice foliaire, paramètres de la courbe d'accroissement foliaire, seuil de densité et de LAI pour la compétition
- **sénescence** : durée de vie d'une feuille, coefficient d'abscission (proportion de feuilles mortes qui se détachent), part d'azote dans les feuilles mortes
- **Interception du rayonnement** : coefficient d'extinction
- **Croissance en biomasse** : seuils de température, efficacités de conversion, seuils de compétition entre compartiments, proportion maximale d'assimilats prélevable dans les réserves
- **Répartition entre organes** : surface massique des feuilles, rapport structures de tige/feuilles
- **Composantes du rendement** : paramètres de mise en place, de croissance et de remplissage des fruits
- **Rendement et récolte** : vitesse d'accumulation de sucre, seuil de teneur en sucre déclenchant la récolte
- **Eau dans la plante** : humidités des organes, paramètres de la déshydratation, somme des températures avant le début de déshydratation
- **Azote dans la plante** : paramètres de la courbe de dilution critique
- **Sénescence de la plante entière et en cas de stress hydrique** : seuils de stress
- **Minéralisation** : température de référence, seuils de température pour la nitrification, paramètres de la minéralisation des engrais et résidus
- **Racines** : paramètre du profil optimal

- **Eau dans le sol** : coefficient cultural maximal, seuils de stress

I.B.2.b. Initialisations et période de simulation

Une fois les fichiers d'entrée, d'observation (si besoin) et le fichier plante appelés par l'USM (le fichier param.par est appelé automatiquement), il faut définir une période de simulation pour pouvoir l'exécuter. Si celle-ci s'étale sur 2 années alors il faut appeler les 2 fichiers climatiques correspondants. Nous avons choisi de faire commencer la simulation le jour de la coupe précédente et terminer un jour après la récolte.

Il s'agit enfin d'initialiser :

- **l'état du sol au démarrage** (quantité d'azote minéral NINITF (kg/ha) et humidité HINITF (% pondéral) des 5 horizons pour la terre fine, densité racinaire dans les 5 horizons DENSINITIAL (cm/cm³) si l'option densité racinaire vraie est sélectionnée, mais ce n'est pas notre cas)

- **l'état de la plante au démarrage** (LAI₀, MASEC₀ (t/ha), MAFRUIT₀ (g/m²), la profondeur initiale du front racinaire ZRAC₀ (cm) et la quantité d'azote initiale dans la plante QNPLANTE₀ (kg/ha))

- **le stade de démarrage** STADE₀ : SNU (sol nu), IPLT, LEV, AMF, SEN, LAN ou DRP

Compte tenu de notre période de simulation nous avons initialisé le stade de démarrage à IPLT. Nous reviendrons sur la correspondance entre la date de coupe chez la canne (ou date de plantation) et la date de semis dans STICS (cf. 3^{ème} partie, II.A.1.a.). Attention, comme il s'agit dans notre cas de repousses de canne et pas de canne plantée, même s'il n'y a pas d'indice foliaire ni de biomasse aérienne, la profondeur du front racinaire est non nulle. Quant aux initialisations sol, elles proviennent des données CIRAD-Réunion.

La figure 2.1 présente les fenêtre de WINSTICS permettant de constituer une USM et de l'initialiser. Nous avons attribué aux USM le nom des sites expérimentaux d'où proviennent les données d'entrée.

I.B.2.c. les sorties

L'exécution du modèle génère systématiquement 4 types de fichiers de sortie :

- le fichier sNomUSM.sti (exemple : sbap99.sti), rassemble pour un pas de temps journalier, les valeurs des variables calculées par le modèle qu'il est possible de comparer aux valeurs des fichiers «.obs». Ces variables peuvent aussi être visualisées graphiquement.

- le fichier sNomUSM.st2 (exemple : sbap99.st2), rassemble pour un pas de temps journalier, les valeurs des variables calculées par le modèle et choisies par l'utilisateur parmi celles qui ne sont pas à des données observées.

- le fichier rapport.sti, résume en une ligne les valeurs à retenir de la simulation

- le fichier bNomUSM.sti (exemple : bbap99.sti) donne un bilan récapitulatif de la simulation. On y trouve notamment un rappel des interventions culturales et initialisations, les valeurs des indices de stress hydrique et azoté, les dates des différents stades, les valeurs des variables de sorties à la date de récolte calculées par le modèle, les bilans azotés et hydriques et quelques messages relatifs au déroulement de la simulation.

- le fichier history.sti rappelle les valeurs de l'ensemble des paramètres utilisés pour la simulation

A l'issue de l'édition de ces fichiers, on peut lancer des calculs statistiques, pour comparer simulations et observations (en plus des visualisations graphiques). L'objectif d'un utilisateur ou d'un évaluateur serait de comparer la prédiction (des valeurs de rendement par exemple) par le modèle à la réalité dans un ou plusieurs contextes pédo-climatiques et techniques. Notre objectif sera de vérifier l'ajustement des paramètres aux données observées, selon une démarche que la partie suivante se charge de présenter.

Tableau 2.1 : Notre choix d'options parmi celles proposées par STICS dans les différentes rubriques

Rubrique de STICS	Option	Autres possibilités		Notre choix
Option de simulation	CODEFRMUR	Récolte des fruits mûrs seulement		Récolte de tous les fruits
Variété (fichier technique)	Type de culture	B 69566	B 8008	R 570
		Besoins en froid	perenne	annuelle
Développement	Sensibilité à la photopériode	pour la vernalisation	pour la dormance	Pas de besoins en froid
			germination	Plante photopériodique de jour court
Levée	Fonction foliaire			Délai plantation-démarrage
		Calcul du LAI	Taux de recouvrement LAInet direct	LAI
Interception du rayonnement	Type de croissance		Transferts radiatifs	Loi de Beer
		Seuils de température	Différents de ceux définis pour le LAI	Id à ceux du LAI
Croissance en biomasse	Efficience de conversion		déterminée	différente pour la phase juvénile
		Type de croissance	Cueillette	indéterminée
Composantes du rendement	Mode de récolte			Moisson
		Décision de récolte	Maturité physiologique	Teneur en azote
Surface du sol	Type de mulch		maïs	Canne à sucre
		Type de résidus	Divers...	Résidus de culture
Minéralisation				Nitrification
				pas de dénitrification
Racines	Densité racinaire		Densité vraie	Profil optimal type
		Besoins en eau	Modèle résistif	Coefficient cultural

II. DEMARCHE ADOPTEE POUR LA CALIBRATION DES MODULES DE PHYSIOLOGIE DES PARTIES AERIENNES

Nous avons souhaité ici rappeler brièvement quel était notre matériel de départ et préciser l'ensemble des choix qui ont résulté des différentes étapes de notre démarche.

II.A. Point sur l'état initial de « STICS-canne »

Nous avons déjà évoqué le fait que STICS évolue, et ce, rapidement. Une première ébauche de paramétrage de STICS (version 4.0) pour la canne a été effectuée en 1998 par Brisson et Gay à partir d'un essai Guadeloupe (cf. annexe 1). Mais depuis, des nouveautés sont apparues, comme principalement les options « plante à croissance indéterminée » et « calcul du LAI net par différence entre l'accroissement de LAI brut et la perte de LAI par sénescence ». Suite à la modification ou l'introduction de formalismes au changement d'unité, à la suppression ou à l'introduction de nouveaux paramètres, un nouveau paramétrage s'avérait nécessaire. Un nouveau module « qualité », important pour la canne car il permet le calcul de la teneur en sucre, a récemment été introduit dans STICS et fera partie de la version 5. Le paramétrage proposé en fin de ce mémoire se base sur la version STICS 5 provisoire qui comprend des fonctions nécessaires pour approcher au mieux la croissance et l'élaboration du rendement de la canne à sucre même si celles-ci n'ont pas été établies spécifiquement pour la canne mais toujours dans l'esprit de généralité. Concrètement, nous avons décidé de reprendre le travail de calibration au départ et de ne conserver les valeurs initiales des paramètres que lorsque ni la bibliographie, ni les observations de terrain ne nous permettaient de les renseigner autrement.

II.B. Choix des options de simulation et donc des formalismes actifs

Au sein des rubriques des fichiers de paramètres plante et généraux, fichiers sur lesquels joue notre travail, il est nécessaire dans certains cas de choisir des options donnant accès aux paramètres. Les options de simulation que nous avons choisies figurent dans le tableau 2.1. Celles qui interviennent dans les modules sur lesquels nous allons travailler ont implicitement été prises en compte dans la présentation des formalismes utiles pour modéliser la canne. La canne a été classée dans les cultures annuelles car la plante est récoltée à la base et aucune partie aérienne vivante ne reste après la coupe. De plus les formalismes activés par l'option « pérenne » (sélectionnée pour la vigne et les arbres fruitiers par exemple) sont trop éloignés du fonctionnement réel de la canne à sucre. Le mode de récolte est considéré comme similaire à une moisson par opposition à la cueillette qui s'applique pour la tomate. Il existe des options ne concernant pas la canne, celles-ci ne seront pas présentées ici (gel, climat en altitude, climat sous abri, interception pluie, drainage, techniques particulières, frein hydrique à la progression des racines, contrainte thermique de remplissage). Les quelques options dont le choix peut être discuté seront abordées dans la 3^{ème} partie.

Nous n'avons pas présenté les formalismes, variables et paramètres des modules que nous n'avons pas paramétrés, cependant la vérification des valeurs par défaut, et, si elles ne sont pas satisfaisantes, l'attribution de valeurs plausibles et d'un ordre de grandeur réaliste aux paramètres sensibles de ces modules est nécessaire pour ne pas biaiser les résultats des simulations. Ainsi nous nous sommes basés sur les travaux d'Ozier-Lafontaine pour le bilan hydrique et ceux de Siband pour le bilan azoté. Ces travaux sont ceux qui ont été pris en compte dans le premier paramétrage de STICS pour la canne. Il aurait fallu vérifier que la courbe de dilution critique actuellement disponible dans STICS (celle du maïs), matérialisée par les seuils de stress, est correcte pour la canne à sucre, mais nous ne disposons pas des données

Tableau 2.2 : *Valeurs pour quelques paramètres des modules que nous n'avons pas calés*

Rubrique ou option	Paramètre	Valeur et unité	Source
Minéralisation	TREF	30 °C	Sierra
Nitrification	TNITMIN	17°C	Sierra
	TNITOPT	40°C	Sierra
	TNITMAX	50°C	Sierra
Profil racinaire	ZLABOUR	20 cm	Fauconnier
	ZPENTE	25 cm	Fauconnier
	ZPRLIM	70 cm	Fauconnier
Coefficient cultural	KMAX	1	Ozier-Lafontaine

expérimentales nécessaires à l'établissement de cette courbe de dilution critique précise. Ce travail deviendra cependant nécessaire pour des simulations en conditions non potentielles impliquant le diagnostic de nutrition azotée et sa répercussion sous forme d'indice de stress. Les valeurs par défaut viennent en général du paramétrage maïs. En ce qui concerne le sol et l'enracinement, les valeurs initiales des paramètres ont été légèrement modifiées d'après la bibliographie et les informations de Sierra (cité par Comm. Pers. Brisson, 2001) qui a particulièrement travaillé sur les sols tropicaux et l'influence de la température sur la minéralisation. Le tableau 2.2 présente les valeurs attribuées aux paramètres et leur source.

II.C. Choix de l'ordre de renseignement des paramètres des modules étudiés

La logique inspire un classement dans l'ordre d'étude des modules. Nous avons donc travaillé prioritairement sur les modules de développement, de croissance aérienne et d'élaboration du rendement (les modules d'effet des stress ne pouvant être étudiés qu'après). Or parmi les paramètres plante auxquels les équations de ces modules font appel, certains peuvent être qualifiés de « génériques » et d'autres de « spécifiques ». Ces notions ont été définies dans les travaux de Ghiloufi et Brisson (1999). Les paramètres dits spécifiques font l'objet d'une étude par espèce (voire même parfois par variété) tandis que les paramètres génériques doivent pouvoir avoir une valeur unique au sein d'un groupe d'espèces comme les C3 ou C4, ou les plantes à croissance déterminée ou indéterminée (les paramètres généraux étant intouchables et identiques pour tous les végétaux). Ces derniers paramètres génériques sont très peu nombreux et pas encore clairement distingués des spécifiques. Nous avons donc beaucoup de paramètres spécifiques à renseigner. Parmi eux, notre attention portera plus particulièrement sur ceux qui ont été déterminés comme étant les plus sensibles d'après l'analyse de sensibilité effectuée sur la version 3.0 par Ruget *et al.* (soumis pour publication) et qui le sont toujours dans la version 5.0. L'analyse de sensibilité de la version 5.0 de STICS n'a naturellement pas encore été réalisée et c'est notre intuition et les simulations successives qui guideront la détermination des paramètres importants parmi les nouveaux introduits.

Le principe de l'analyse de sensibilité consiste à essayer de savoir si certains paramètres conditionnent à eux seuls les sorties du modèle. En effet, la calibration du modèle permettant d'estimer un jeu de paramètres avec une certaine incertitude, il est important de savoir si les sorties du modèle dépendent fortement de faibles variations du paramètre autour de sa valeur optimale. Si la sensibilité du modèle à ses paramètres est très forte, alors la qualité du modèle dépend directement de la qualité de l'estimation du jeu de paramètres (Delécolle et al., 1996). Ce sont ces paramètres sensibles qui ont intérêt à être estimés très précisément et leur analyse s'avère utile pour réactualiser un modèle et cibler le travail sur sa paramétrisation sensible (Husson, 2000). La méthode utilisée par Ruget et al. est la régression quadratique sur plans factoriels et l'objectif de l'étude la recherche des zones de sensibilité ou d'insensibilité extrêmes. Attention, la sensibilité d'un modèle à ses paramètres est différente de sa sensibilité aux conditions de simulation (contexte pédoclimatique et technique). Ce dernier type de sensibilité est en général recherché si l'on s'intéresse à des prédictions précises à petite échelle et dans des conditions variables.

L'ordre de priorité dans lequel nous avons choisi d'étudier les paramètres des 3 modules choisis est le suivant (Comm. pers. Martiné et Ruget, 2001). Il correspond à l'ordre d'intervention des modules eux-mêmes dans l'élaboration de la production dans STICS. Il s'agit d'abord de caler les paramètres relatifs aux « stades » de développement conditionnant l'évolution du couvert au cours du cycle. Ensuite on cale les paramètres d'interception du rayonnement, puis ceux de sa conversion en biomasse aérienne et enfin les paramètres de la partition de cette biomasse entre les organes et ceux déterminant leur qualité biochimique.

II.D. Choix des valeurs à attribuer aux paramètres et évolution de ces valeurs

Nous avons procédé de différentes façons et en plusieurs étapes pour choisir la valeur à donner à un paramètre.

II.D.1. Première attribution de valeurs d'après différentes sources

✓ Pour ceux dont la valeur peut-être obtenue à partir de la bibliographie (exemple : températures de référence TDMIN, TCMAX, TEOPT, coefficient EXTIN, efficience EFCROIVEG...), c'est cette valeur que nous avons retenue. Si elle n'était pas communément acceptée par différents auteurs, notre synthèse bibliographique nous a amenés à faire des choix.

✓ Pour d'autres paramètres (exemple : humidité H₂OFEUILVERTE, SLAVERT, vitesses VITPROPSUCRE, DESHYDBASE ...) ce sont les observations de terrain et les discussions avec les experts qui nous ont permis de leur affecter une première valeur (cf. 3^{ème} partie I.A. et I.B.). Parfois elles ne concordent pas exactement avec les informations tirées de la bibliographie, auquel cas nous avons été obligés de choisir en tenant compte du mode d'obtention de ces valeurs.

✓ Pour plusieurs paramètres intervenant dans des formalismes dont l'adéquation avec le fonctionnement de la canne n'était pas nette, nous avons utilisé les résultats de notre confrontation plante/modèle pour leur donner une valeur à partir des correspondances établies. (cf. 3^{ème} partie, point II.) (exemple : BDENS, NBINFLO, AFRUITPOT, DUREEFRUIT, STLEVDRP, STDRPNOU, STLAXSEN...).

✓ Pour les paramètres qui ne représentent a priori rien de concret et facilement mesurable et qui sont en général des paramètres de fonctions logistiques internes à STICS (VLAIMAX, PENTLAIMAX, ADENS, AFPP, BFPP...), on laisse dans un premier temps les valeurs par défaut à moins que l'établissement des correspondances permette de donner une valeur provisoire meilleure a priori que celles par défaut.

Il est possible que nous revenions sur certaines de ces valeurs. Les paramètres concernés par des modifications de valeurs sont en général les plus abstraits dont les valeurs sont les moins fiables et que STICS peut améliorer.

II.D.2. Amélioration par ajustement aux données observées : principe d'optimisation

II.D.2.a. Comparaison simulations/observations et nécessité d'une amélioration

Pour comparer les valeurs prises par les différentes variables calculées aux valeurs observées, il faut choisir des critères statistiques et fixer des valeurs seuils d'une part et choisir sur quelles variables les faire porter. C'est ici qu'interviennent une deuxième fois les données de terrain observées après avoir donné un premier ordre de grandeur au cours de la première étape de la démarche.

✓ Un critère est défini par une expression mathématique qui permet de quantifier un écart entre des variables : il s'agit donc d'une distance (Delécolle, 1996). Lors de la comparaison des valeurs simulées aux observées pour différentes variables, nous considérerons qu'il faut lancer une optimisation de paramètres sur une variable (avec STICS ou par « tâtonnement ») si la distance, que nous avons choisi de matérialiser par la RMSE pour cette variable dépasse une valeur seuil. La **RMSE** est l'**écart quadratique moyen** ou racine carrée de la moyenne du carré

Tableau 2.3 : Valeurs seuils que nous nous sommes fixées pour estimer la qualité de notre jeu de paramètres

Variable/Critère	RMSE	commentaire
LAI	<1	
MASEC	<10% de MASEC (à la récolte)	De l'ordre de 4 t/ha
PDSFRUITFRAIS	<20% de PDSFRUITFRAIS (à la récolte)	De l'ordre de 16 t/ha (peu sévère)
SUCRE	<25% de SUCRE (à la récolte)	De l'ordre de 3-4 % (peu sévère)

des écarts. Il s'exprime dans la même unité que la variable. Le **coefficient de corrélation r**, lui, permet de traduire à quel point les points de coordonnées valeur observée/valeur calculée sont alignés sur une droite de régression qui doit correspondre dans notre cas à la 1^{ère} bissectrice. Sa valeur est comprise entre -1 et 1. Ces critères s'expriment de la façon suivante (Dagnélie, 1973) :

$$\text{RMSE} = \text{rac}((\sum_1^n (X_{\text{obs}} - X_{\text{calc}})^2)/n)$$

$$r = \text{cov}(X_{\text{obs}}, X_{\text{calc}}) / \sigma X_{\text{obs}} \times \sigma X_{\text{calc}}$$

X est la variable dont on compare les valeurs observées et les valeurs calculées, n le nombre d'observations et σ l'écart-type. D'autres critères sont proposés par STICS pour caler et évaluer le modèle, ils figurent en annexe 2).

✓ Le choix des variables sur lesquelles faire porter le critère dépend majoritairement des objectifs que nous nous fixons quant à l'utilisation du modèle. Mais il dépend aussi de la complexité du modèle, du nombre de variables d'état qui rentrent en jeu et du type de processus modélisés (Delécolle, 1996). Il faut naturellement que nous possédions les données observées nécessaires pour la comparaison afin de ne pas être limités dans la démarche de calibration (cf. point III.). Dans notre cas, les variables que nous avons retenues sont LAI et MASEC qui sont les sorties principales du module de croissance aérienne et PDSFRUITFRAIS et SUCRE (que nous avons introduites dans les fichiers observations car elles n'en faisaient pas partie) calculées par le module d'élaboration du rendement. Nous avons choisi ces variables car elles sont dynamiques (calculées journalièrement), expérimentalement mesurables et représentatives de la qualité du modèle.

Le tableau 2.3 présente les valeurs seuils de chaque critère que nous nous sommes fixées pour chaque variable choisie. Nous avons été moins exigeants sur la précision de prédiction des variables PDSFRUITFRAIS et SUCRE, dont les modes de calcul ont évolué jusqu'à très récemment et sur lesquels nous n'avons pas pu prendre de recul. De plus, ces variables dépendent indirectement des autres (LAI, MASEC...) dont l'erreur de prédiction peut se répercuter. Il serait bon cependant qu'à terme ces variables soient le mieux prédites possibles, car ce sont celles qui intéressent les décideurs sucriers.

Comme il serait étonnant que notre première attribution de valeur conduise directement à une qualité de simulation satisfaisante malgré nos efforts, il est très probable que nous ayons recours à l'optimisation : outil d'amélioration proposé par STICS.

II.D.2.b. Repérage de la cause des écarts et choix de la procédure d'optimisation

Le repérage des paramètres à l'origine des écarts entre valeurs simulées et indique sur quels paramètres il faut retravailler. Ce repérage est dans notre cas intuitif et aidé par les graphiques proposés par STICS où l'on peut visualiser les points correspondants aux observations et l'ajustement des courbes simulées au cours du temps (jours juliens).

Il s'agit ensuite de choisir :

- **quels paramètres** on veut optimiser (choix en fonction des causes supposées des écarts et des résultats de l'analyse de sensibilité qui précisent si l'amélioration sera efficace)
- **combien à la fois** (s'ils sont très dépendants les uns des autres)
- **dans quel ordre** (pour ne pas avoir à revenir sur un paramètre dont la valeur a déjà été optimisée)
- **sur quelle variable** (choisie parmi celles qui figurent dans le fichier observations)
- **sur quelle période du cycle**
- **à partir de quels essais**

Tableau 2.4 : Caractéristiques des essais CIRAD-Réunion

Nom de l'essai	Année climatique	Site expérimental	Altitude (m)	Type de sol	Irrigation	Date de coupe précédente	N° de repousse	Stress
Tipi97	1997-1998	Tirano	150	Brun andique	Pluvial et irrigué	15 avril 97	3 ^{ème}	
Tii97	1997-1998	Tirano	150	Brun andique	Irrigué	15 avril 97	3 ^{ème}	Aucun
Tii99	1998-1999	Tirano	150	Brun andique	Irrigué	26 nov. 98	5 ^{ème}	
Bap99	1998-1999	Barau	550	Andique désaturé non perhydraté	Pluvial	13 oct. 98	2 ^{ème}	Aucun
Cop99	1998-1999	Colimaçons	800	Andique désaturé non perhydraté	Pluvial	5 Août 98	3 ^{ème}	
Copi96	1994-1995	Colimaçons	800	Andique désaturé non perhydraté	Pluvial et irrigué	3 Août 94	2 ^{ème}	

(En gris foncé, les essais que nous avons retenus pour définir le jeu de données de calage)

Tableau 2.5 : Gamme de variabilité des conditions climatiques et techniques expérimentales des essais sélectionnés

Fourchettes de valeurs	Températures (°C)		Rayonnement (MJ/m ²)		Précipitations (mm)		Apports d'eau (mm)	
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	(total)	(total)	(total)	(total)
Tii97	14	35	4	34	1306	1117	1117	1117
Bap99	11	28	2	32	2856	0	0	0

L'algorithme de calcul utilisé dans STICS est la méthode du simplex et le critère utilisé celui des moindres carrés (représentant la même chose que la RMSE). Cette fonction permet d'optimiser 1 à 5 paramètres simultanément sur une variable de façon à ce que l'écart entre les valeurs simulées et observées soit minimisé. C'est dans la 3^{ème} partie (cf. III.B.1.) que nous préciserons quels choix nous avons effectués car ils dépendent des résultats que nous aurons obtenus suite à la première étape de renseignement des paramètres et de test de la qualité de ce premier jeu de paramètres. Nous discuterons aussi les résultats de ces optimisations pour savoir si nous acceptons la valeur proposée par STICS ou non.

En résumé, notre démarche de calibration des modules caractérisant l'écophysiologie des parties aériennes a consisté à :

- proposer un premier jeu de paramètres à partir de correspondances établies entre le fonctionnement de la canne et celui du modèle
- tester ce jeu,
- et affiner la paramétrisation par aller-retour entre les valeurs de paramètres et les valeurs des critères calculés sur les variables-clé

le tout jusqu'à obtention d'un jeu de paramètres satisfaisant vis à vis des objectifs fixés.

Nous nous sommes basés tout du long sur un jeu de données que nous allons définir dans le point suivant en fonction des besoins de la démarche précédemment cités et des moyens à disposition.

III. DEFINITION DU JEU DE DONNEES DE CALAGE UTILISE

III.A. A partir des données CIRAD-Réunion 94-99

III.A.1. Caractéristiques des essais de suivi du cycle de la variété R570

Les données dont nous disposons pour comprendre le fonctionnement de la canne et calibrer les modules de physiologie des parties aériennes de STICS proviennent d'expérimentations menées sur 3 sites expérimentaux Réunionnais et au cours d'1, 2 ou 3 années (pas pour chaque site mais dans l'ensemble) soit donc pour 6 essais. Le but de ces essais était l'étude du cycle de la variété R570, la plus cultivée sur l'île. Ils rendent compte de situations pédo-climatiques très variées et de conditions différentes d'irrigation. Ces essais représentent bien ce qui se fait à la Réunion en terme de durée des cycles (1 an en général, cf. 1^{ère} partie, I.A.3.). Le débouché des cannes des essais est exclusivement la sucrerie (avec comme contrainte principale l'optimisation du taux de sucre) si elles sont coupées pendant la campagne, comme la plupart des parcelles de l'île. Toutes les parcelles présentent un écartement entre les rangs de 1,5 m et le cycle étudié est un cycle de repousse. Toutes ont été traitées de façon supposée optimale pour la lutte contre les ennemis de la culture.

Le tableau 2.4 récapitule les caractéristiques de ces essais. Ceux-ci ont été renommés par rapport aux noms initiaux donnés par le CIRAD, afin de respecter le nombre de caractères limité dans STICS. Les 2 premières lettres sont les 2 premières du nom du site expérimental, ensuite « i » pour un essai irrigué, « p » pour un essai pluvial et « pi » pour un essai pluvial et irrigué, enfin les 2 derniers chiffres de l'année qui a vu la plus grande partie du cycle se dérouler. L'essai cop96 est particulier et le 96 rappelle juste que la parcelle n'a pas été coupée avant 1996, cependant les observations ne concernent que la période 94-95.

Une partie des données fournies par ces essais est relative au peuplement végétal de canne suivi une fois tous les 2 mois en général (données servant à renseigner le fichier observations de STICS et à nous aider par leur analyse et par ajustement à renseigner les paramètres des fichiers

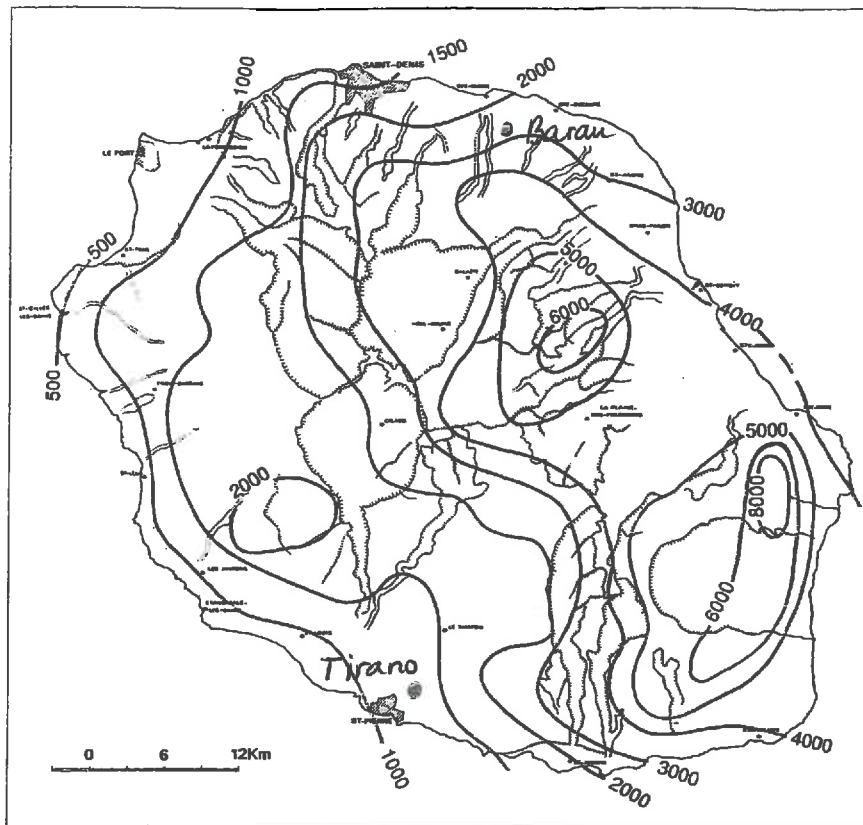


Figure 2.2 : Localisation des 2 essais et répartition de la pluviométrie moyenne annuelle (mm) période 1958-1980 (Raunet, 1991)

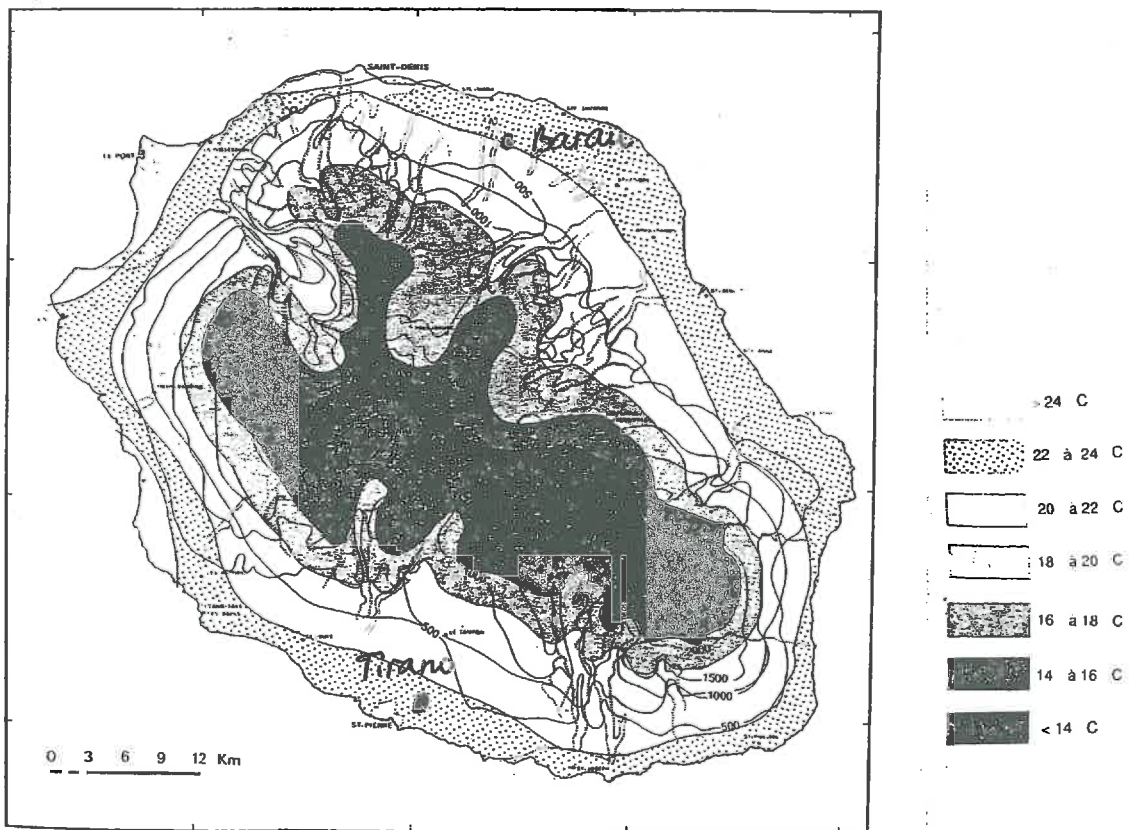


Figure 2.3 : Localisation des 2 essais et températures moyennes annuelles (Raunet, 1991)

plante et généraux). Les informations recueillies en parallèle sont d'ordre météorologique (données journalières pour renseigner le fichier climatique de STICS), pédologique (pour renseigner le fichier sol) et technique (pour renseigner le fichier technique). Le suivi n'est pas effectué plus fréquemment qu'une fois tous les 2 mois car il demande beaucoup de travail. De plus, si les mesures sont effectuées trop souvent, l'incertitude (de l'ordre de 5-10% dans notre cas) deviendrait trop importante par rapport à la variation de la variable entre 2 dates de suivi. Un suivi plus espacé fournirait moins de 6 données par an pour chaque variable mesurée ce qui serait trop peu. En hiver les suivis peuvent être espacés jusqu'à 3 mois et en été 1 mois et ½ car la croissance est plus rapide. Les essais sont idéalement toujours situés à proximité d'une station météo dépendant d'une station CIRAD.

III.A.2. Sélection des situations à conserver pour le calage

III.A.2.a. Critères de sélection

Rappelons que notre calibration des modules de STICS choisis doit reposer dans un premier temps sur des données provenant de cultures n'ayant subi aucun stress hydrique ni azoté. Notre objectif est d'arriver à proposer un jeu de paramètres permettant une modélisation correcte de la croissance et du rendement potentiels de la R570 à la Réunion. La calibration des modules de diagnostic des stress et des paramètres déterminant l'effet de ces stress, n'ayant pas été faite sur la nouvelle version de STICS avec les données Réunion, les simulations en conditions non potentielles ne seront pas faites ici mais font partie de la suite à donner au travail qui fait l'objet de ce mémoire. Précisons que nous avons décidé de ne pas désactiver l'action des stress dans STICS. De cette façon si un stress hydrique ou azoté est détecté par STICS, ce qui ne devrait pas être le cas car les essais sélectionnés sont supposés ne pas avoir été stressés, il agira. Nous supposons que les modules de bilan hydrique et azoté sont à peu près calés mais nous reviendrons sur cette hypothèse si elle s'avère fausse.

Les seuls essais non stressés (ou très peu, diagnostic effectué par Martiné, Comm. Pers., 2001) sont tii97 et bap99. Ils représentent 2 sites expérimentaux à sols, altitude et climats différents, 2 années climatiques différentes. L'un est irrigué l'autre pluvial, l'un démarre pendant l'hiver austral et l'autre pendant l'été (cf. Tab. 2.4). La grande gamme de variabilité des conditions expérimentales est ainsi conservée (cf. Tab. 2.5). Les cartes présentées ci-contre (cf. Fig. 2.2, 2.3 et 2.4) permettent de situer les sites expérimentaux dans le milieu qui a été décrit en 1^{ère} partie. On voit que Tirano est situé dans les sols bruns andiques des Bas de la côte sud-ouest sèche et Barau dans andosols des Hauts de la côte Nord-est humide.

Il serait bon que notre calibration de STICS rende le modèle robuste donc applicable dans diverses situations pédo-climatiques, et sensible à la fois. La combinaison de ces 2 qualités est souvent délicate et dans notre cas l'INRA et les créateurs de STICS auraient tendance à privilégier sa robustesse au détriment de la précision locale tandis que les utilisateurs au CIRAD de la Réunion préfèrent le contraire pour une bonne prédiction de l'évolution du rendement et de la teneur en sucre à l'échelle de la parcelle...

III.A.2.b. Caractéristiques météo, pédologiques et techniques des situations gardées

Une fois les données sélectionnées, il s'agit de les saisir dans les fichiers « climatique », « sol » et « technique » de STICS selon la procédure décrite en début de 2^{ème} partie.

**Données et fichier sol (rubriques Tirbrunandik et BarandikN) (cf. Annexe 3)*

Nous avons converti les données CIRAD fournies pour que les unités correspondent à celles des paramètres et variables de STICS : ainsi les teneurs en matière organique (% pondéral) ont été transformées en teneur en azote organique (%) en divisant par 17,5 les valeurs mesurées (Comm. pers. Sévenier, 2001). Ces valeurs, qu'on doit fournir sur l'épaisseur de l'horizon d'humification, de 40 cm, est obtenue par moyenne des valeurs des 2 premiers horizons de 20 cm. La teneur en

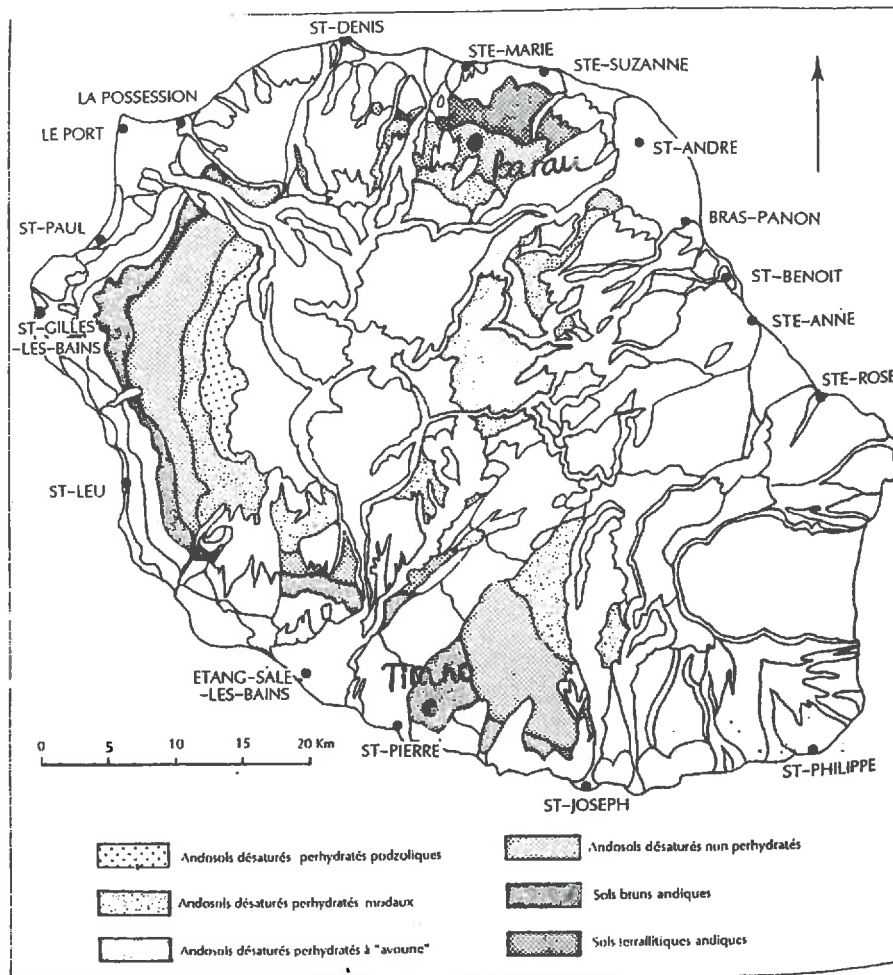


Figure 2.4 : Localisation des 2 essais dans les grandes catégories des sols à caractère andique sur cendre issues du Piton des neiges (Raunet, 1991)

Tableau 2.6 : Lien entre les données observées et les variables de sortie de STICS

Variable étudiée		Nom (hors STICS)	Mode d'obtention des valeurs	Variable correspondante dans STICS (unité quand différente des observations)
Signification				
LAI		LAI	Mesure sur le terrain ou calcul	LAI
MS limbes (g/m ²)	Verts	MSlv	Pesée après séchage	
	Sénescents	MSlm	Pesée après séchage	
	Total	MSltot	Calcul	
Nombres de tiges (/m ²)	Vivantes	nbtigv	Mesure sur le terrain	NBFRUIT à discuter
	Mortes	nbtigm	Mesure sur le terrain	
	Total	nbtigtot	Calcul	
MS aériennes (g/m ²)	Totale	MSAtot	Calcul	MASEC (t/ha)
	Canne usinable	MScutot	Pesée après séchage	MAFRUIT (t/ha)
	Poids de sucre	PS	Analyse après broyage et pressage	
	Partie structurale de la tige usinable (fibres + non-sucre)	MScustruc	Calcul	
MF aériennes (g/m ²)	Totale	MFAtot	Calcul	
	Canne usinable	MFcu	Pesée après coupe	PDSFRUITFRAIS (t/ha)
Humidité (%)	Canne usinable	humidité	Calcul	H ₂ OREC (g/gMF)
Richesses en sucre (%)	Dans la MS de canne usinable	sucreMS	Calcul	
	Dans la MF de canne usinable	sucreMF	Calcul	SUCRE (g/g MF)

calcaire est nulle, pour les 2 sites, ces sols tropicaux étant acides, on l'a vu en 1^{ère} partie, et les formations géologiques aucunement calcaires. Dans le document présenté en annexe 3 les valeurs en grisé ne sont pas actives car elles dépendent d'options que nous n'avons pas sélectionnées.

**Données et fichier techniques*

✓ Nous avons eu des difficultés à renseigner le paramètre DENSITE qui doit représenter dans STICS la densité de semis, correspondant, on l'a vu, à une densité de plantes à la levée. La notion de densité n'existe pas dans ce sens là pour la canne à sucre (on parle à la rigueur d'une densité de tiges /m², mais celle-ci évolue au cours du cycle). Pour les cycles de repousses, les touffes de « talles » ne sont pas facilement individualisables, mais on garde l'idée simple qu'il y a 1 plante/m², 10 tiges/plante soit 10 tiges/m² (10 tiges/m² correspondant en fait à 10 tiges sur une longueur de rang de 67cm (l'inter-rang étant de 1,5m) donc 15/m). Nous affecterons donc au paramètre DENSITE la valeur 1 pour les 2 sites expérimentaux. C'est aussi la valeur que nous recommandons d'entrer systématiquement, à moins de revenir sur les valeurs des paramètres qui en dépendent.

✓ La fertilisation minérale azotée pour les 2 sites été réalisée à la volée (granulés) sur la ligne de canne (donc à la surface du sol). Pour Barau la dose a été de 225 kg N/ha en début de cycle (de repousse) et pour Tirano 242 kg N/ha fractionnés. Ces valeurs ont été obtenues après conversion en kilos d'azote (unité exigée par STICS) des quantités d'engrais apportées par hectare, connaissant la teneur en azote des différents engrais.

✓ L'irrigation n'a eu lieu que pour Tirano et à une profondeur de 15 cm.

✓ Les 2 essais ont fait l'objet d'un paillage végétal (14 t MS/ha pour Tirano et 13 t MS/ha pour Barau), comme c'est le cas en général après chaque coupe.

III.A.2.c. Les données observées : suivi de l'état du couvert

Les valeurs des variables dites observées relatives aux caractéristiques du peuplement de canne sont en partie directement issues de mesures effectuées sur le terrain ou après échantillonnage. De ces mesures nous avons tiré d'autres informations en effectuant des calculs. Les données comportent des valeurs de LAI, de masse de limbes foliaires, des nombres de tiges/m², des valeurs de biomasses aériennes sèches et fraîches, des humidités et des poids et teneurs en sucre. Le tableau 2.6 présente ces différentes variables et fait le lien (pour les variables qui peuvent figurer dans le fichier observations de STICS) entre observations et sorties correspondantes calculées par STICS. Nous avons renseigné le fichier observations à partir des valeurs prises par les 4 variables principales choisies (qui apparaissent en grisé dans le tableau) et les valeurs correspondant aux variables MAFRUIT et H₂OREC à partir desquelles est calculée PDSFRUITFRAIS dans STICS. Précisons toutefois que les variables qui ne seront pas directement comparées aux sorties de STICS nous ont quand même servi à comprendre comment évolue le peuplement au cours du cycle. Elles nous ont enfin aidé à attribuer des valeurs aux paramètres (cf. 3^{ème} partie, point I.). L'ensemble des données observées pour les essais tii97 et bap99 figurent en annexe 4.

La partie suivante explique comment ce type de données a été obtenues puis traitées, méthodologie que nous avons appliquée pour un site, à 1 date, mais qui est celle utilisée pour tous les sites à toutes les dates de suivi.



Photo 2.1 : Mesure de la hauteur TVD d'une tige vivante de canne (ici 201cm) à Cesaria (R570, juin 2001)

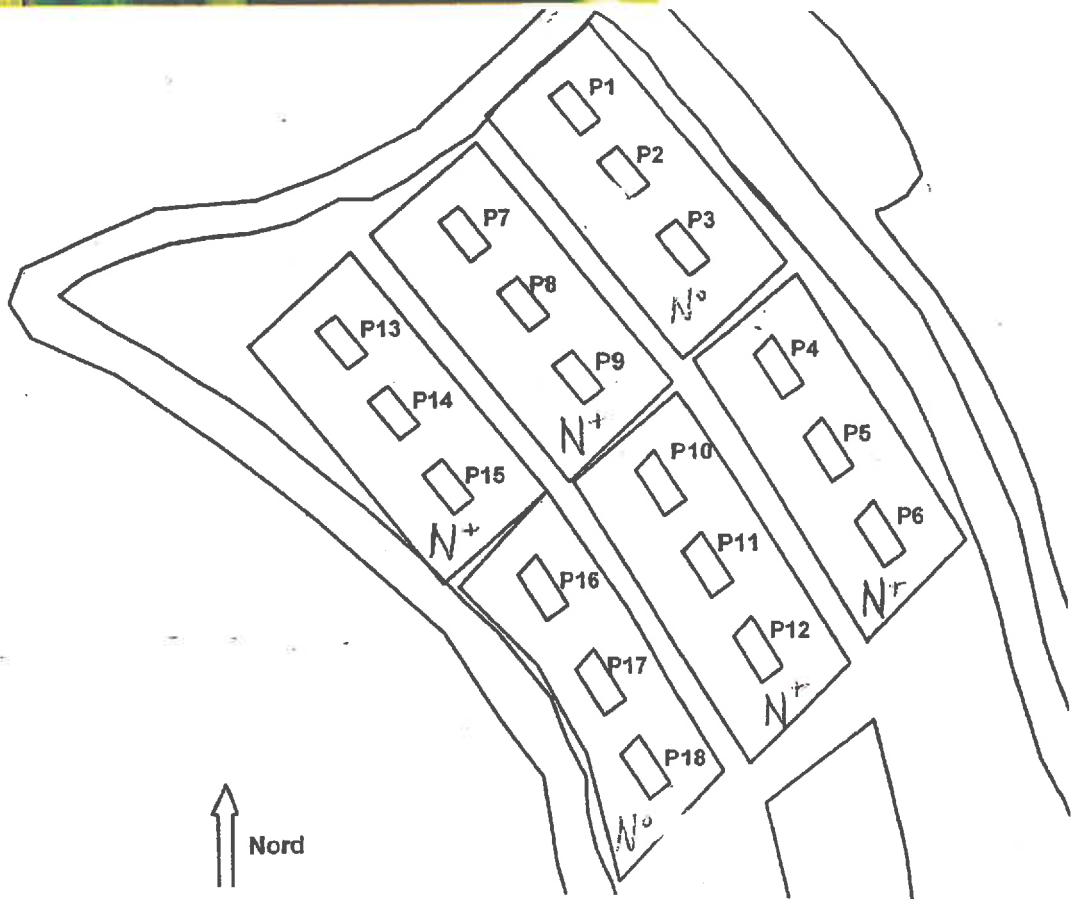


Figure 2.5 : Plan de l'essai azote et suivi cycle à Cesaria (décembre 2000-juin 2002)

III.B. Méthodologie d'acquisition de ces données : exemple du suivi de biomasse aérienne (juin 2001)

III.B.1. Caractéristiques du site et positionnement dans le suivi

L'essai se trouve être un essai de suivi du cycle de la variété R570 en même temps qu'un essai azote du type présence/absence. Les micro-parcelles fertilisées ont reçu un apport d'engrais à la plantation et un autre 3 mois après. Cependant nous ne nous intéresserons pas à l'effet de la présence de fertilisation ou non car ce qui nous importe ici est la méthode utilisée pour obtenir les données relatives à la biomasse aérienne et ses composantes. Les données obtenues sont identiques en nature à celles que nous avons utilisées dans la démarche de calibration mais pas en valeur. Le suivi de cet essai n'étant pas terminé (la récolte aura lieu dans un an, en juin 2002), les données ne sont pas disponibles et les données brutes issues des dates de suivi antérieures à ma participation en juin 2001 non encore saisies et traitées. Seul le LAI n'a pas été mesuré pendant cette campagne de mesure car c'est un travail qui demande beaucoup de temps. Il peut être mesuré selon différentes méthodes présentées et comparées dans les travaux de Martiné (1995a). A défaut d'être mesuré, il peut être calculé à partir de la biomasse des limbes verts. La mesure des surfaces de limbes sur quelques tiges et la pesée de ces limbes permet d'obtenir la surface massique, qui, multipliée à la biomasse de feuilles par unité de surface, donne le LAI. Elle dépend de l'âge de la feuille. Ne sont comprises dans la mesure de la biomasse des feuilles que les feuilles déroulées *i.e.* celles situées en dessous de la hauteur TVD plus les 2 suivantes (le fouet n'est pas inclus). La surface d'un limbe est quant à elle calculée comme suit : $0,7 \times L \times l$. En répétant ce type de calculs sur des cannes de différentes hauteurs, Martiné a obtenu une relation entre la surface massique moyenne des limbes verts des tiges et l'âge des cannes (Comm. pers. Martiné, 2001).

Le site concerné par notre suivi de biomasse est Cesaria et nous avons nommé l'essai cep01. Il se situe dans les Hauts (550m d'altitude) de l'est (côte humide). La culture est pluviale et le cycle un cycle de canne vierge (18 mois) plantée début décembre 2001 (pendant l'été austral). Elle sera récoltée en début de la prochaine campagne. Le sol y est caillouteux et un peu en pente. Les mesures réalisées sur ce site en juin 2001 faisaient partie de la 4^{ème} série de mesure depuis la plantation.

III.B.2. Choix de la méthode et principe de suivi indirect et non destructif

Un premier type de méthode utilisée pour estimer directement le poids des cannes usinables présent à une date consiste à prélever des cannes (travail long et fastidieux) sur des placettes dont la surface est connue puis ramener le poids obtenu à une surface d'1 ha (Gay *et al.*, 1997). Les décideurs sucriers ont besoin de ces estimations pour organiser correctement les récoltes et simuler les perspectives d'évolution du marché (Gay *et al.*, 1997). Si l'on applique une telle méthode complètement destructive en expérimentation, les suivis nécessitent de grandes parcelles et une main d'œuvre dont l'ensemble constitue un dispositif lourd et coûteux (Inman-Bamber, 1991b ; Muchow *et al.*, 1994). De plus ce ne sont pas les mêmes cannes qui sont suivies d'une date à l'autre et un effet « terrain » pourrait biaiser les résultats (Gay *et al.*, 1997, Comm. Pers. Martiné, 2001). Le second type de méthode, qui a été choisi ici, consiste à trouver une corrélation mathématique entre la productivité d'une parcelle de canne et un « estimateur », c'est à dire une variable plus facile à mesurer ou calculer que le poids (exemple nombre de cannes, longueur ou volume...). L'avantage est que la mesure ou le calcul de l'estimateur est non destructif.

Le suivi de biomasse par l'intermédiaire des hauteurs TVD (notre estimateur) des tiges d'une parcelle que l'on ne détruit jamais permet de contourner les difficultés précédemment citées.



Photo 2.2 : Mesure de la hauteur TVD d'une tige vivante de canne dépaillée à Césaria (R570, juin2001)



Photo 2.3 : Mesure de la hauteur TVD d'une tige morte coupée (R570, juin 2001)

(Rappelons que la hauteur TVD d'une tige est la hauteur (cm) de la base de la dernière articulation visible entre gaine et limbe (cf. photo 2.1).

Le principe de suivi indirect non destructif consiste à :

- **mesurer** sur le terrain les **hauteurs TVD** des cannes (sans les couper) **dans des placettes** dont la taille, le nombre et la répartition ont été choisis en fonction du niveau de précision attendu des résultats (cf. III.B.3.a.)

- **appliquer à ces hauteurs des relations** (dans leur domaine de validité) **établies entre hauteur TVD et biomasse** mesurée **hors placettes** pour obtenir la biomasse aérienne et ses composantes pour les cannes des placettes (cf. pt III.B.3.d.)

Cependant, l'établissement de ces relations nécessite de :

- prélever des cannes en dehors de ces placettes selon un **plan d'échantillonnage** défini (cf. pt III.B.3.b.)

- mesurer les hauteurs TVD de ces cannes et déterminer leur biomasse aérienne et ses composantes (cf. pt III.B.3.c.)

C'est l'extrapolation des chiffres obtenus, à l'ensemble de la parcelle qui donnera une estimation du poids de cannes usinables, nécessaire en expérimentation et dans la réalité économique. Le poids de cannes usinables/ha étant, on l'a vu la base de rémunération des producteurs.

Les 2 raisons principales ayant déterminé le choix d'utiliser les hauteurs TVD plutôt que l'indice volumique (produit Hauteur TVD x carré du diamètre moyen de la tige) sont les suivantes (Martiné, 1995a) :

- les relations entre hauteur et biomasse sont meilleures

- pendant une bonne partie du cycle (6 premiers mois) on ne peut mesurer le diamètre à la base de toutes les tiges car celles-ci sont entourées de gaines foliaires vivantes qu'on ne peut enlever.

Le problème d'un suivi indirect est le risque d'introduire un biais. L'ensemble de la démarche de suivi indirect non destructif que nous avons appliquée a été validé la première fois en 1998 (mais l'évaluation continue depuis 2 ans) sur 5 à 10 placettes pour chacune de 4 dates de récolte, soit une trentaine de placettes (Comm. Pers. Martiné, 2001). L'évaluation a été effectuée par comparaison entre les valeurs estimées pour la biomasse totale des placettes et chacune de ses composantes avec l'application des relations déterminées hors placettes, et les valeurs observées (les placettes ont donc été détruites pour les besoins de la démarche). Le coefficient de détermination R^2 (carré du coefficient de corrélation r) de la relation entre estimations et observations a été observé et sa valeur toujours obtenue voisine de 0,995. Le test des hypothèses « la droite de régression passe par l'origine » et « la pente de la droite de régression est égale à 1 (pas significativement différente de 1) » a conduit à leur validation. On a vérifié en fait que la droite de régression est confondue avec la 1^{ère} bissectrice. Un très léger biais systématique de 3-4 % a cependant été observé. La légère sur-estimation de la biomasse des placette peut-être due à un effet « manipulateur ». En effet Gay et al. (1997) montrent qu'il est difficile de dire, chez la canne à sucre où l'enchevêtrement des tiges amène obligatoirement l'expérimentateur à faire un choix, que des plantes ont été prélevées de façon aléatoire.

III.B.3. Application de la méthode définie

III.B.2.a Mesure non destructive des Hauteurs TVD

Nous mesurons sur le terrain les hauteurs TVD (cm) de toutes les tiges (mortes et vivantes, que nous comptons par la même occasion) de plusieurs placettes dans lesquelles ces mêmes tiges ont été mesurées aux dates précédentes et seront mesurées aux dates suivantes. Les placettes de l'essai à Cesaria sont au nombre de 18, à raison de 3 dans chaque micro-parcelle, (2 de ces micro-parcelles n'ayant pas reçu d'azote, notées N⁰ et 4 en ayant reçu, notées N⁺). Les placettes et mesurent chacune 3 m de longueur. Elles sont réparties sur différentes lignes de canne (parmi

Tableau 2.7 : Plan d'échantillonnage des cannes hors placettes de suivi

Classe d'âge	Fourchette de hauteurs	Nombre de cannes prélevées par traitement (N ⁰ et N ⁺)
I	Médiane +/- 25 cm	10
II	Médiane +/- 5 cm	10
III	Médiane +/- 5 cm	6
IV	Médiane +/-10 cm	6



Photo 2.4 : Exemple d'échantillon prélevé ici, les 10 cannes de la classe II (R570, juin 2001)

les 7 lignes de 23,5m de long par micro-parcelle) et comprennent chacune la moitié d'un inter-rang de chaque côté du rang. Chaque placette représente donc une surface de 4,5 m², chaque micro-parcelle 247m² et l'ensemble de l'essai 1480m². Chaque placette constitue une répétition et chaque micro-parcelle un bloc, nous avons donc ici 3 répétitions par bloc et 6 blocs. La localisation de cet essai a été choisie en raison de son bon sol et son absence d'obstacles. Les attaques éventuelles de "borers" (foreur = térébrant) de la tige ont été surveillées afin que les conditions de cultures soient optimales (en dehors de l'azote dont l'effet est testé). Chabalier a montré que 3-4 répétitions suffisent en général compte tenu de l'hétérogénéité du terrain concerné. Le coefficient de variation a été obtenu inférieur à 10% pour des placettes de 3m de long, ce qui est satisfaisant. Ce coefficient de variation est d'autant plus petit que le terrain est homogène et que le matériel de mesure est précis (Gay *et al.*, 1997). Le niveau de précision attendu des résultats est à la 2^{ème} décimale près pour les humidités (en %) par exemple et à l'unité lorsqu'on traite de biomasse aérienne de l'ordre de 5000g/m². La figure 2.5 présente le plan de cet essai.

Les pratiques suivantes évitent les erreurs et facilitent le suivi :

- au fur et à mesure que des tiges meurent (on considère une tige morte quand son fouet est entièrement desséché), celles ci sont mesurées puis coupées à la base de façon à ne pas avoir à les mesurer la fois suivante,
- les feuilles sèches (on considère une feuille morte quand plus de la moitié de sa surface est jaune et sénescence) des tiges vivantes sont enlevées. Nous pensons que cette pratique a un léger effet sur le microclimat local des placettes, mais cet effet a été négligé (comm. Pers. Martiné, 2001)

Les photos 2.2 et 2.3 illustrent la mesure de la hauteur TVD des tiges vivantes et mortes.

On regroupe ensuite les valeurs des hauteurs TVD des tiges vivantes de l'ensemble des placettes (traitement N⁰ d'une part et N⁺ d'autre part), on les classe par ordre croissant et on définit 4 groupes d'effectif égal. Pour chaque groupe on repère la hauteur TVD médiane, c'est à partir de cette médiane et des hauteurs TVD définissant les limites des groupes que nous choisissons les cannes qui seront prélevées pour l'échantillonnage destructif.

III.B.2.b Echantillonnage destructif

Nous prélevons ensuite hors placettes de suivi les cannes dont les hauteurs TVD sont situées autour de la médiane de chaque groupe de la façon suivante décrite dans le tableau 2.7. Le même principe d'échantillonnage est appliqué pour les 2 traitements N⁰ et N⁺.

Ceci nous permet de prélever des cannes appartenant à des classes de hauteur (donc d'âge) très différentes. La classe I (canne les plus petites) représente une fourchette de hauteurs plus importante car leur effectif par hauteur est réduit. Les cannes mesurant une hauteur TVD comprise dans la fourchette définie sont prélevées pour chaque classe et par traitement (le nombre prélevé est plus important pour les petites cannes car elles sont moins lourdes) « aléatoirement » sur l'ensemble des micro-parcelles du traitement. La photo 2.4 montre l'échantillon prélevé pour une classe.

III.B.2.c. Détermination de la biomasse aérienne et de ses composantes pour l'échantillon

On mesure pour chaque canne prélevée :

- la **hauteur TVD**,
- la **hauteur de canne usinable** une fois chaque canne coupée et les composantes de la biomasse séparées

On détermine pour chaque classe :



Photo 2.5 : Séparation des composantes de la biomasse de l'échantillon représentatif de la classe II et constitution de sous-échantillons (R570, juin 2001)



Photo 2.6 : Gateau de pulpe et jus de canne usinable broyée et pressée (R570, juin 2001)

- le **poids total sec (g) des feuilles mortes, limbes verts, restes et cannes usinables** à partir de la pesée (frais puis sec) de sous-échantillons pour chaque composante de la biomasse aérienne, du calcul de l'**humidité (%)**, de cette composante et de l'application de cette humidité au **total frais pesé**. Les restes sont constitués de l'ensemble gaines vertes + bouts blancs + fouet foliaire. Il faut donc faire attention à ce que le sous-échantillon soit bien représentatif de la classe. La constitution de sous-échantillons permet de pas mettre tout à sécher.
- la **biomasse aérienne totale (g) fraîche et sèche** à partir du cumul des valeurs obtenues pour chaque composante
- la **hauteur TVD moyenne**
- la **hauteur moyenne de canne usinable par tige**
- le **poids moyen sec et frais (g/tige)** de chaque composante (rapport du poids total sur le nombre de cannes prélevées par classe)
- la **biomasse aérienne totale moyenne (g/tige) sèche et fraîche** (cumul des valeurs moyennes obtenues pour chaque composante)
- le **poids de sucre moyen (g/tige)**

Les photos ci-contre (2.5 et 2.6) et en annexe 6 illustrent l'échantillonnage destructif et l'ensemble des opérations à réaliser (à chaque date de suivi) sur chaque classe pour obtenir les données présentées ci-dessus: séparation des organes, constitution de sous-échantillons représentatifs de chaque classe et composante de la biomasse à peser avant et après passage à l'étuve à 85°C pendant 48h, coupe et broyage des cannes usinables, pressage de la pulpe (à une pression de 100kg/cm²), envoi du jus au laboratoire d'analyses. Les mêmes mesures et opérations sont effectuées pour les 2 traitements. Une température supérieure à 85°C serait inutilement destructive. La durée a été limitée à 48h car la masse se stabilise et l'humidité nulle est atteinte. Ce sont ces mêmes limites qui sont utilisées partout dans le monde pour sécher des plantes y compris à grosses tiges. Quant à la pression, c'est celle qu'il faut utiliser systématiquement car la méthode a été étalonnée en fonction de cette valeur.

III.B.3.d. Protocole de traitement des données et obtention indirecte de la biomasse et de ses composantes pour la parcelle

On obtient alors pour chaque traitement 4 types de relations principales dont on veut que le coefficient de détermination R² soit le plus proche possible de 1 (>0,98) :

- A partir de 4 points (chaque moyenne par classe) (unités g/tige) :

(1) **MSA_{tot} = f(hauteur TVD)**

(type puissance car les plus grandes tiges captent la plus grande partie du rayonnement)

(2) **MS de chaque composante = f(MSA_{tot})**

(2a) **M_{scu} = f(MSA_{tot})** (type linéaire)

(2b) **M_{slv} = f(MSA_{tot})** (type puissance)

(3) **MF_{cu} = f(M_{scu}) et PS = f(M_{scu})**

(type puissance car l'humidité et la richesse en sucre évoluent non linéairement en fonction de la MS de canne usinable)

- A partir des 32 cannes prélevées (par traitement) individualisées (unités cm) :

(4) **Hauteur de canne usinable = f(hauteur TVD)** (type linéaire)

La relation (1) entre biomasse aérienne totale/tige et hauteur TVD n'est pas stable dans le temps et selon les sites. Elle doit être réactualisée à chaque date de suivi et c'est pourquoi l'échantillonnage destructif doit être répété à chaque suivi pour que la relation soit valable lorsqu'on l'applique aux hauteurs TVD mesurées dans les placettes non détruites (Martiné, 1995a). Il a été constaté cependant que les relations type (2) entre biomasse aérienne et ses composantes sont stables dans le temps et indépendantes des sites, en conditions de croissance optimales.

Les relations ont été établies à partir de cannes prélevées en fonction d'un plan d'échantillonnage par classes de hauteurs elles-mêmes définies en fonction des hauteurs mesurées de toutes les tiges de la placette. Leur application telle que nous l'avons faite reste donc dans leur domaine de validité. Notons qu'il est plus difficile d'obtenir une bonne représentativité de la parcelle à partir des hauteurs de placettes pour la canne à sucre que pour le maïs. En effet, la variabilité des hauteurs des tiges de maïs (en conditions optimales) est plus limitée car la croissance des tiges apparaît en même temps. La population est par conséquent plus homogène que pour la canne à sucre où l'apparition des tiges s'étale sur une plus longue durée (Comm. Pers. Martiné, 2001). On applique donc les relations (1) puis (2) puis (3) (obtenues pour le traitement N^0 d'une part et N^+ d'autre part) aux hauteurs TVD mesurées dans chaque placette N^0 ou N^+ et on ramène les valeurs obtenues par tige à l'unité de surface (m^2) en faisant le total par placette divisé par la surface de la placette. En considérant que les placettes représentent bien l'ensemble des micro-parcelles du traitement et leur éventuelle hétérogénéité (terrain, densité de peuplement et répartition des âges des cannes), on obtient donc en faisant la moyenne, les valeurs de la biomasse aérienne et de ses composants pour l'ensemble du traitement. Les données « biomasse » fournies par le CIRAD de la Réunion (une valeur de biomasse aérienne totale et une pour chaque composante, pour chaque essai et pour chaque date) ont toutes été obtenues suivant cette méthode.

La notation de l'état des tiges (mortes et vivantes) et la mesure de leurs hauteurs permet du même coup d'apprécier :

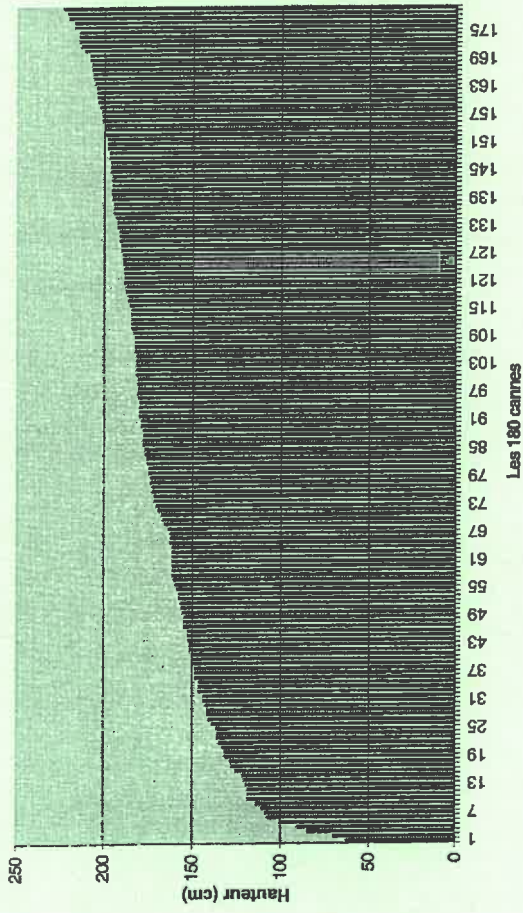
- les dynamiques d'apparition et de mortalité des tiges en liaison avec leur position dans le couvert
- la distribution des types de tiges à chaque date et leur évolution.

La partie suivante présente et discute nos résultats obtenus avec les moyens précédemment décrits, les compare à nos attentes et fait le point de ce que nous pouvons en tirer pour atteindre les objectifs fixés.

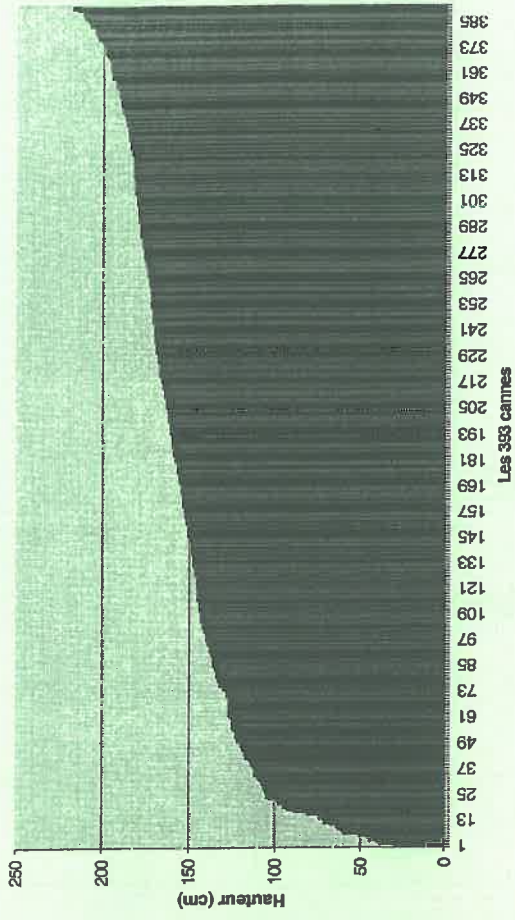
3ème PARTIE

RESULTATS-DISCUSSION

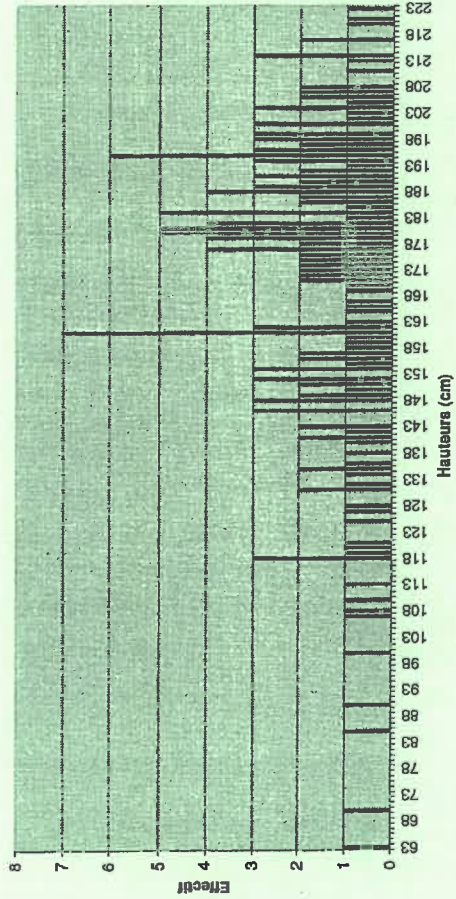
Hauteurs (au 11/06/01) classées par ordre croissant des cannes mesurées dans les 6 placettes N° suivies



Hauteurs (au 11/06/01) classées par ordre croissant des cannes mesurées dans les 12 placettes N+ suivies



Répartition des hauteurs de la population de cannes des 6 placettes N° suivies (le 11/06/01)



Répartition des hauteurs de la population de cannes des 12 placettes N+ suivies (le 11/16/01)

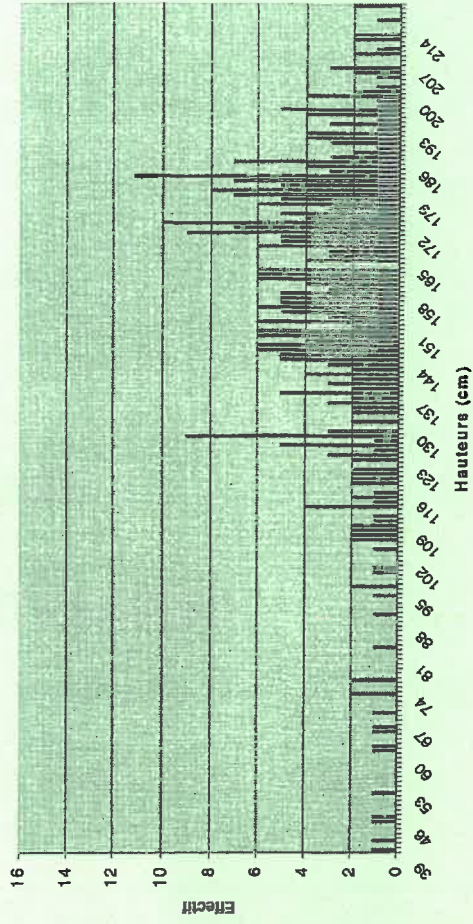


Figure 3.1 : Hauteurs TVD mesurées dans les placettes des traitements N0 et N+

I. RESULTATS DU TRAITEMENT DES DONNEES DE TERRAIN ET DE L'ANALYSE DES OBSERVATIONS CIRAD-REUNION

I.A. Estimation de la biomasse aérienne et de ses composantes pour l'essai à Cesaria

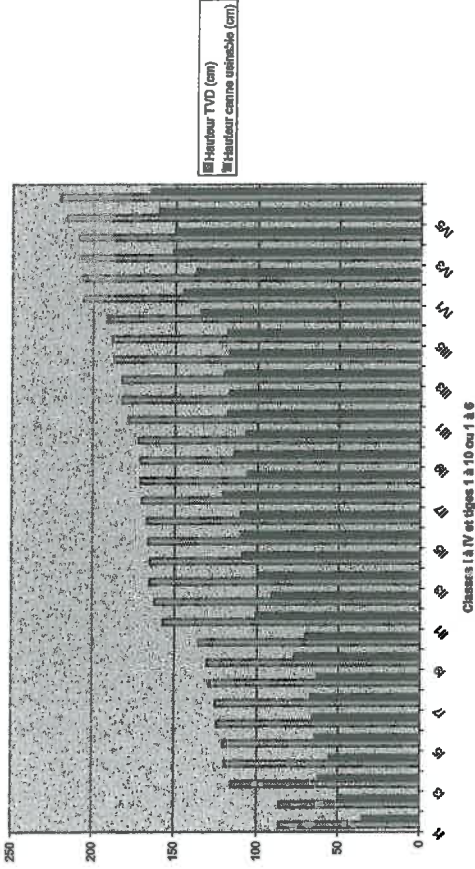
I.A.1. Présentation des différents résultats

L'ensemble des 6 placettes N° comporte 180 cannes vivantes que nous avons toutes mesurées et l'ensemble des 12 placettes N+, 393. Les hauteurs TVD s'échelonnent de 50 à 220 cm environ dans les 2 traitements, ce qui rappelle que l'âge des tiges d'une culture de canne à émission de tiges prolongée est très hétérogène (cf. Fig. 3.1). Nous nous attendions à cette observation, qui est à l'origine de la distinction de classes d'âge. Cette répartition des effectifs de cannes par hauteur est spécifique à la date à laquelle nous avons effectué le suivi. A partir de ces mesures de hauteurs nous avons planifié l'échantillonnage par classe (comme indiqué dans la 2^{ème} partie, cf. III.B.2.b.) et prélevé 32 cannes par traitement, dont les hauteurs TVD et de canne usinable figurent dans le tableau présenté en annexe 7 et sont illustrées par la figure 3.2. Les mesures et calculs de biomasse moyenne et de ses composantes, par classe, dont l'enchaînement a été présenté dans la partie précédente ont conduit à l'établissement des relations présentées par les figures 3.3a et 3.3b. La répartition des composantes de la biomasse figure en annexe 8. L'application des relations (1) et (4) aux hauteurs TVD de chaque placette, puis des relations (2a), (2b) à la biomasse totale calculée par tige et enfin de la relation (3) à la biomasse de canne usinable, donne les résultats illustrés par les figures 3.4 et 3.5.

I.A.2. Des relations conformes à nos attentes

Nos constatons que les relations obtenues sont conformes à ce que nous attendions : les relations type (2a) et (4) sont linéaires et les relations type (1) (2b) et (3) sont de type puissance. Dans les 2 traitements, le coefficient de détermination est voisin de 0.96 pour les relations (4) entre hauteur de canne usinable et hauteur TVD et supérieur à 0.99 pour les relations (1) et (2) et (3). Seule la relation (1) entre biomasse totale et hauteur TVD du traitement N° n'est pas aussi satisfaisante que nous l'aurions souhaité, avec un R^2 de 0.973. Des erreurs de mesure en sont peut-être à l'origine. Par ailleurs, il faut être vigilant lorsqu'on applique la relation (2). En effet, la droite coupe l'axe des abscisses en 58 (g de MSAtot/tige) pour le traitement N° et 66 pour le traitement N+. Si nous appliquons cette relation à une valeur de biomasse totale inférieure à ces valeurs, nous obtiendrons une valeur négative pour la biomasse de canne usinable, c'est pourquoi si c'est le cas, nous affectons la valeur 0 à cette dernière. Nous appliquons cette même règle pour le calcul de la hauteur de canne usinable avec la relation (4) : pour des hauteurs TVD inférieures à 51 cm pour le traitement N° et à 57 cm pour N+, nous considérerons la hauteur de canne usinable nulle. Remarquons que parfois, quand l'application de la relation (2a) nous donne une valeur de matière sèche de canne usinable nulle, la relation (4) nous donne de son côté, une hauteur de canne usinable non nulle et parfois même de l'ordre de 10cm. Nous pourrions décider d'établir hors placettes une relation (5) entre la matière sèche de canne usinable et la hauteur de canne usinable puis l'appliquer aux hauteurs de canne usinable calculées avec la relation (4) et déterminer ainsi la matière sèche de canne usinable. Nous pourrions aussi appliquer cette relation (5) à la matière sèche de canne usinable calculée avec la relation (2) et déterminer la hauteur de canne usinable, mais ce serait moins direct que de l'obtenir à partir de la hauteur TVD. Dans tous les cas, des contradictions pourront apparaître entre les données calculées pour les placettes, elles

Echantillon N° prélevé et répartition des cannes dans les différentes classes de hauteur



Echantillon N° prélevé et répartition des cannes dans les différentes classes de hauteurs

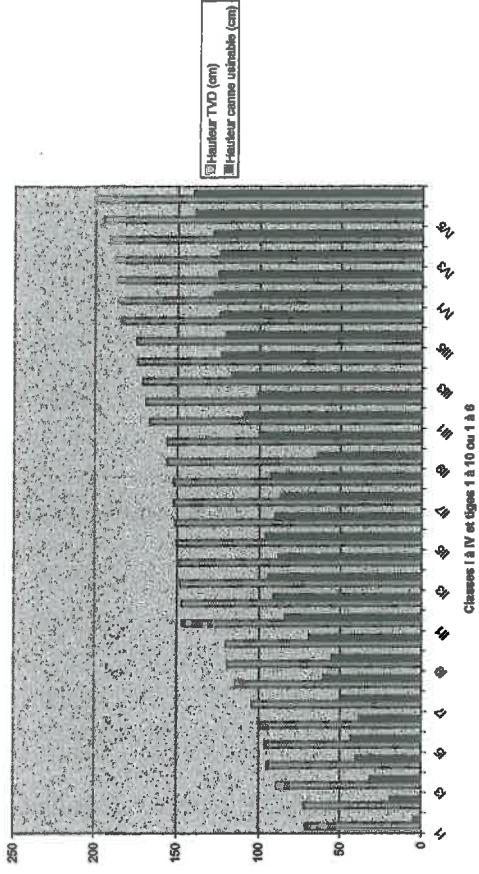
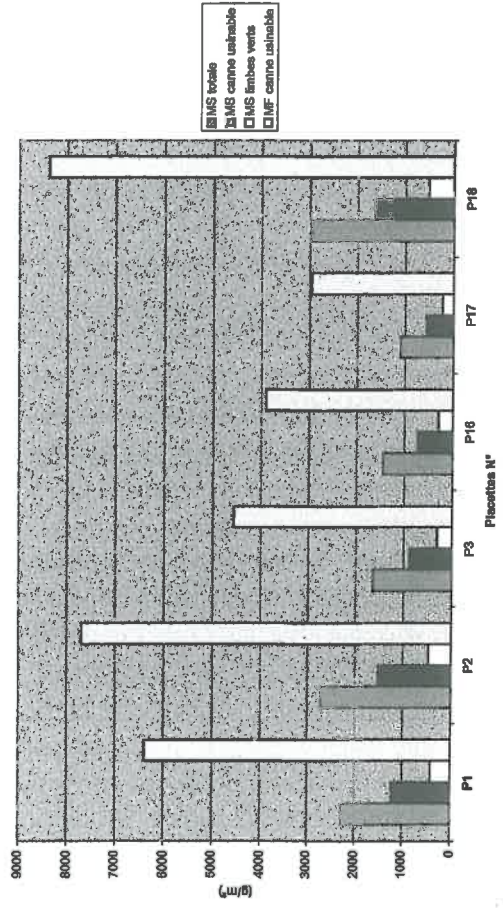


Figure 3.2 : Hauteurs mesurées des échantillons N° et N+ prélevés par classe

Biomasse aérienne totale et composantes calculées pour chaque placette N° de suivi



Biomasse aérienne totale et composantes calculées pour chaque placette N° de suivi

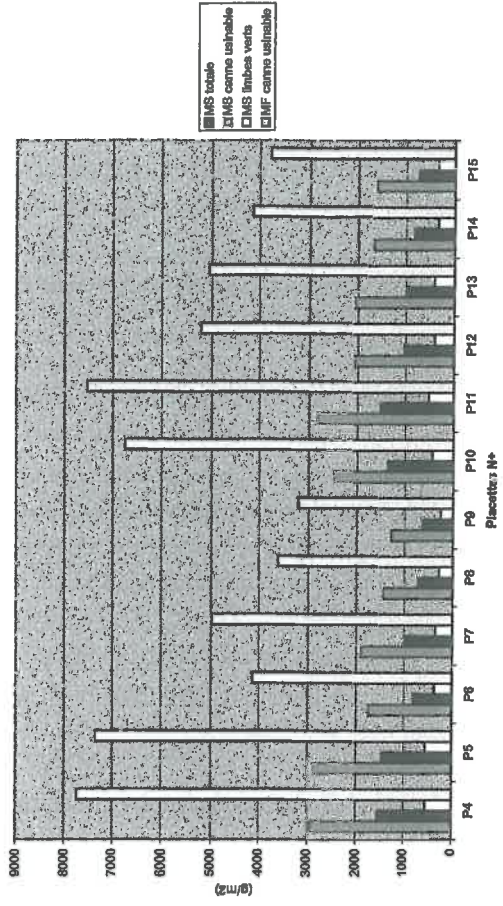
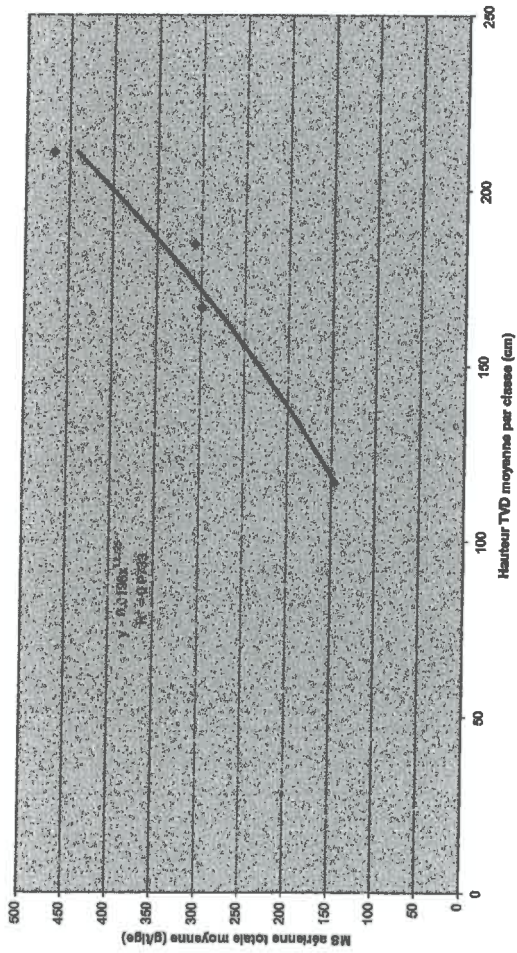
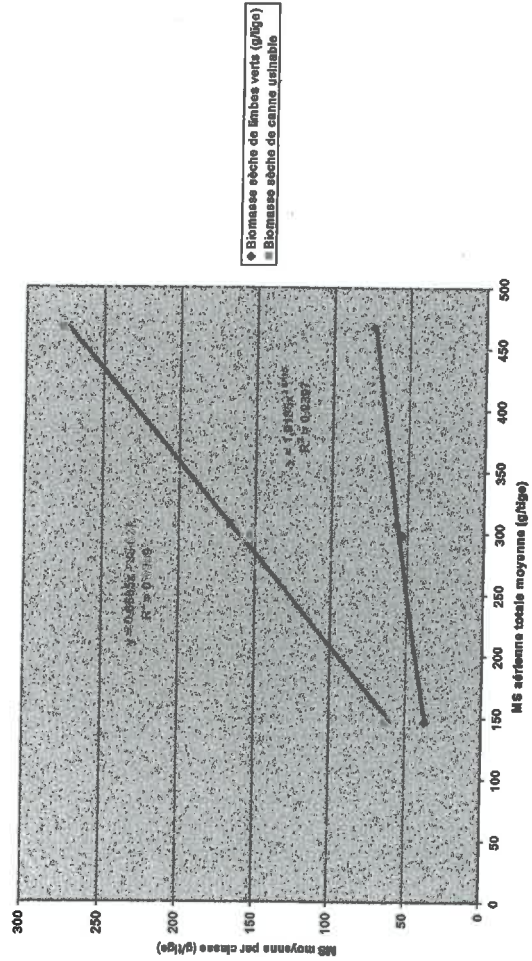


Figure 3.4 : Biomasse aérienne totale et composantes calculées pour les placettes des traitements N° et N+

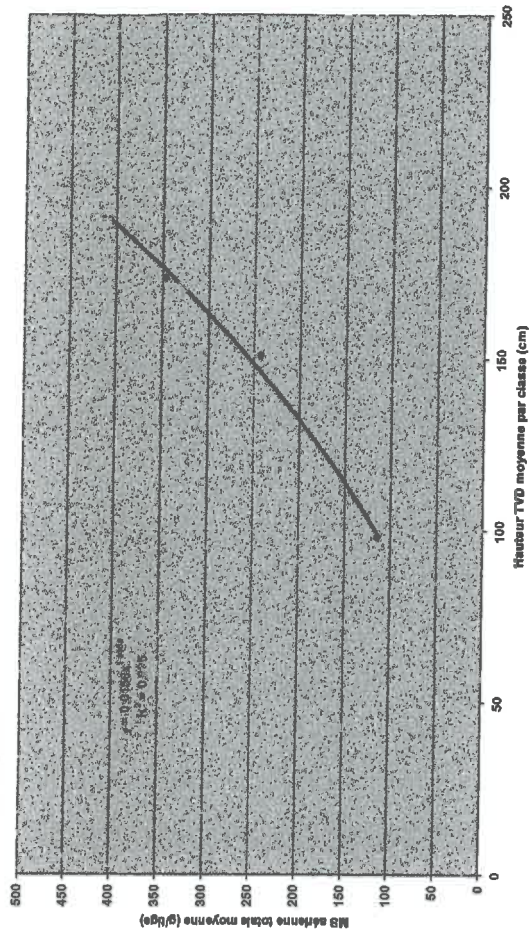
Relation de type (1) entre la biomasse sèche aérienne totale d'une tige et sa hauteur TVD (Traitement N°)



Relation type (2) entre la MS des composantes de la biomasse d'une tige et sa biomasse aérienne totale (Traitement N°)



Relation de type (1) entre la biomasse sèche aérienne totale d'une tige et sa hauteur TVD (Traitement N+)



Relation de type (2) entre la MS des composantes de la biomasse d'une tige et sa biomasse aérienne totale (Traitement N+)

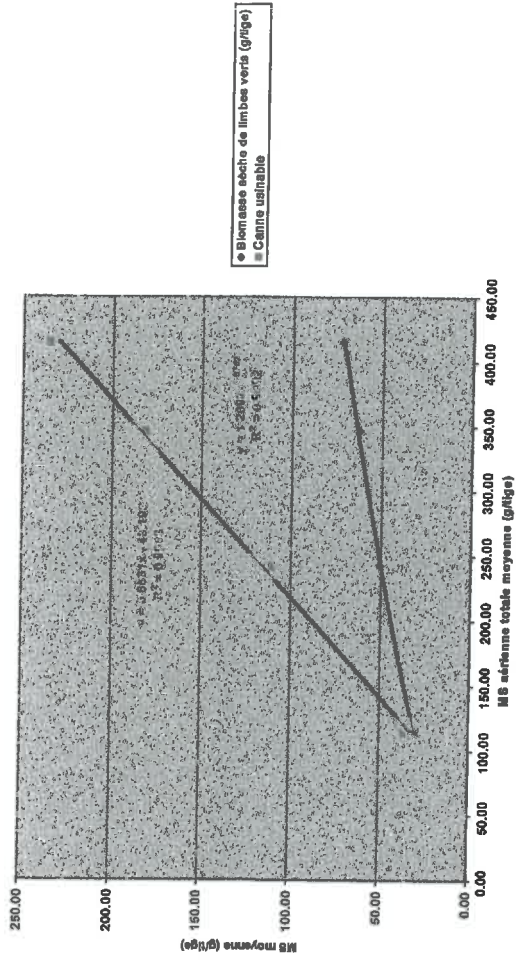
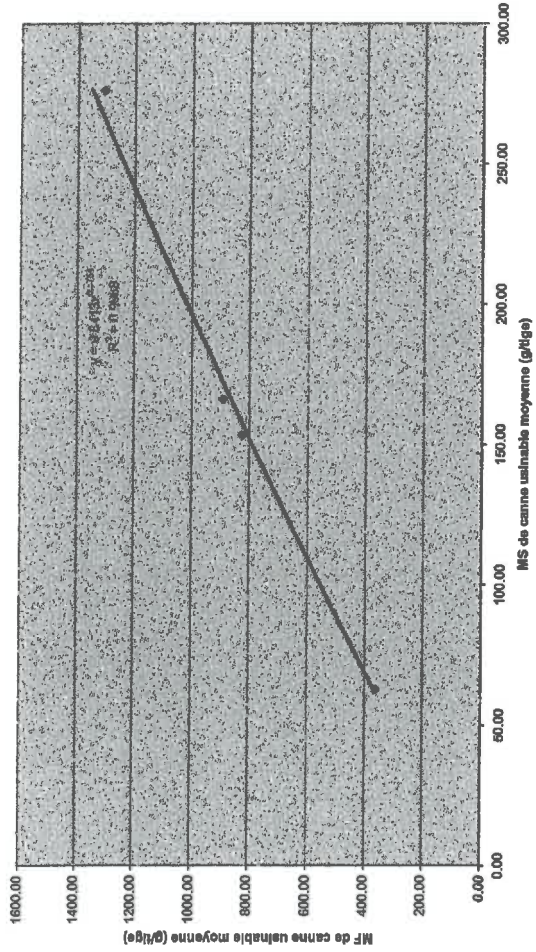
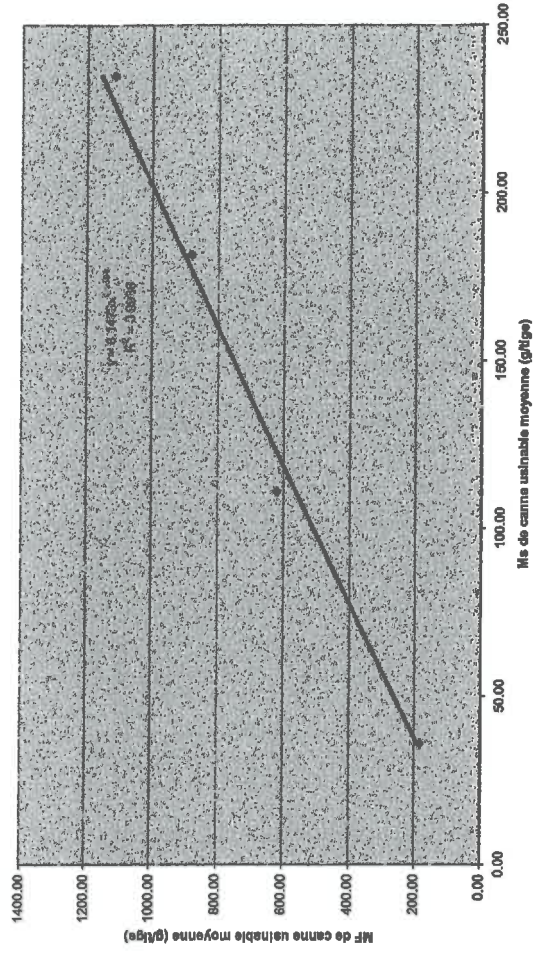


Figure 3.3a : Relations de type (1) et (2) établies pour les traitements N° et N+

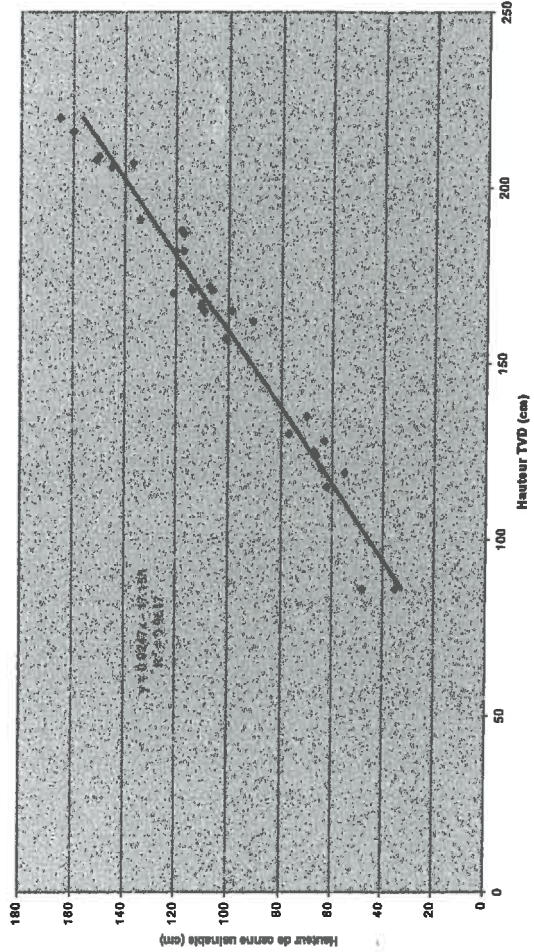
Relation type (3) entre la MF de canne usinable et sa MS



Relation type (3) entre la MF de canne usinable d'une tige et sa MS



Relation type (4) entre la hauteur de canne usinable d'une tige et sa hauteur TVD (Traitement N°1)



Relation type (4) entre la hauteur de canne usinable d'une tige et sa hauteur TVD (Traitement N°+)

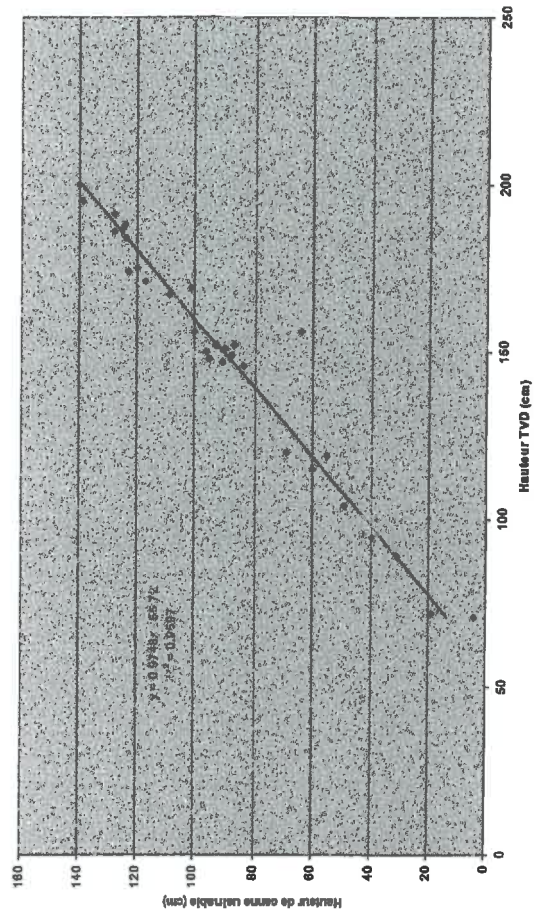


Figure 3.3b : Relations de type (3) et (4) pour les traitements N° et N°+

Comparaison des traitements N° et N+ : biomasse totale moyenne et composantes

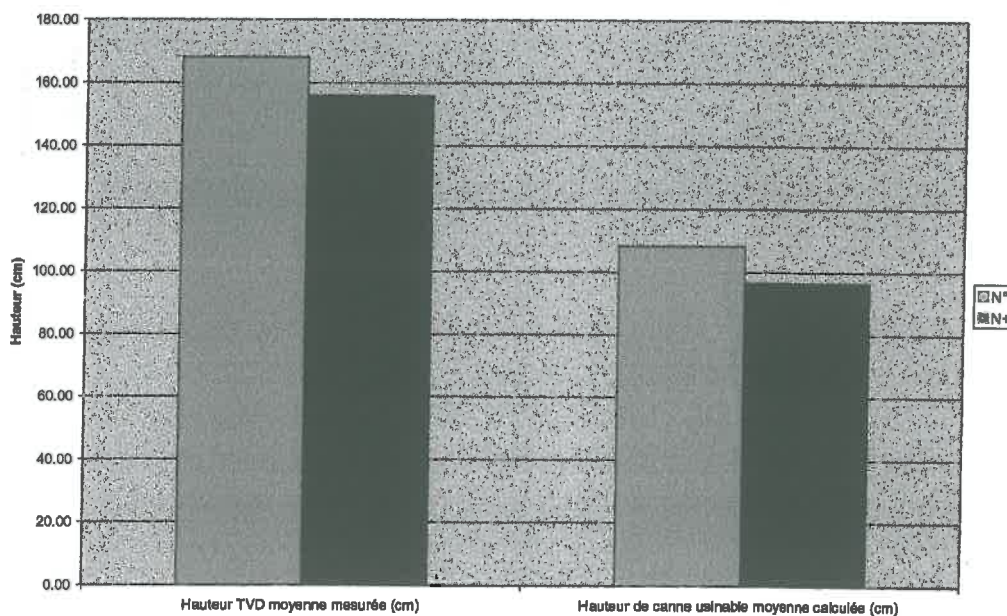
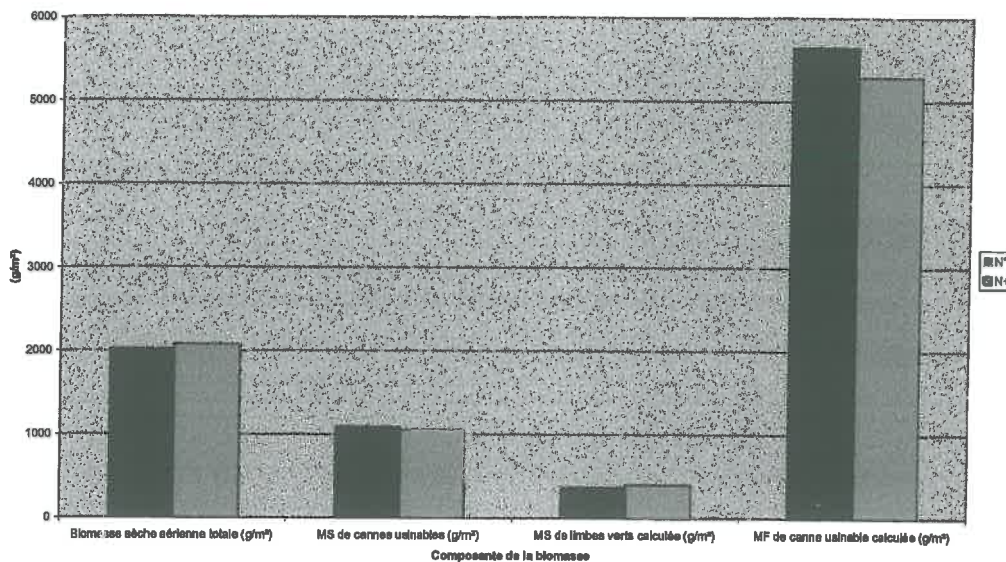


Figure 3.6 : Résultats : hauteurs, biomasse et composantes calculées pour les traitements N° et N+

Nombre de tiges / m² pour l'ensemble de placettes

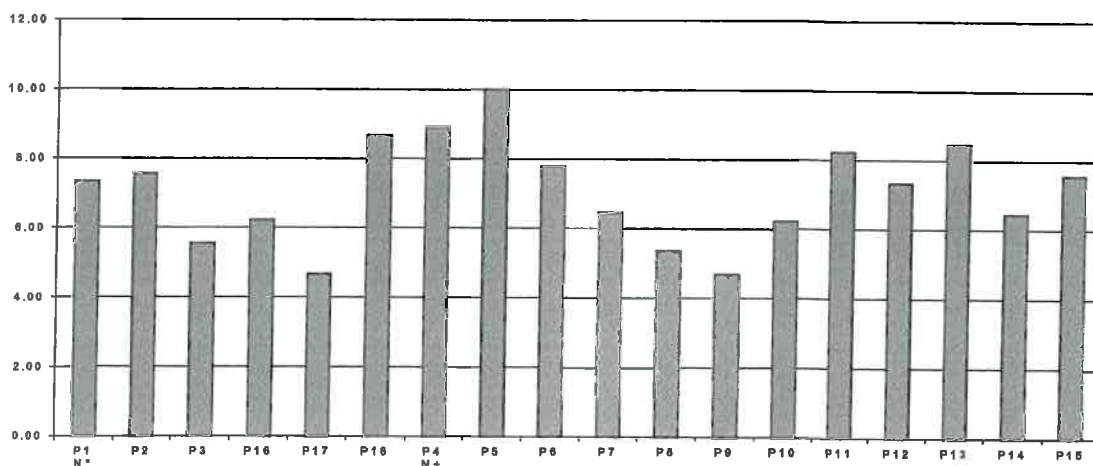
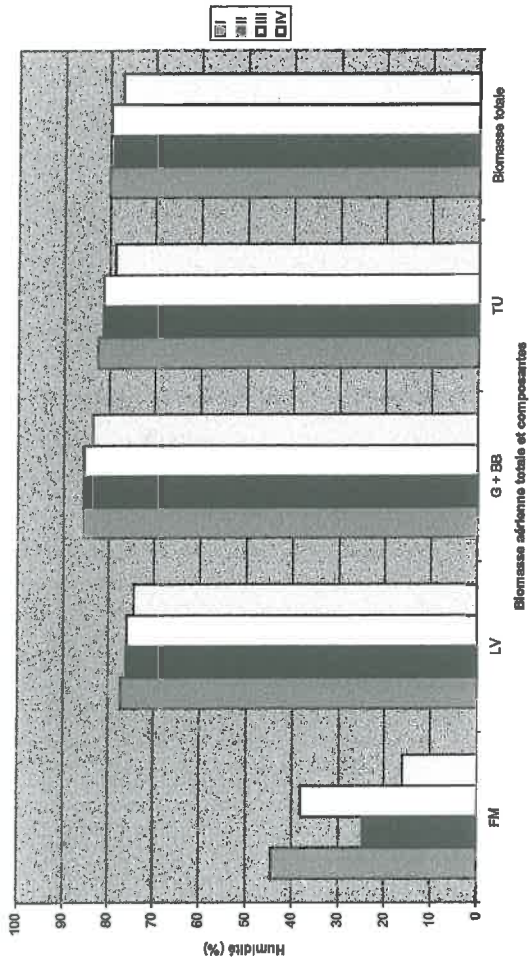


Figure 3.7 : Hétérogénéité des nombres de tiges/m² selon les placettes

Evolution de l'humidité des composantes de la biomasse aérienne totale selon les classes



Evolution de l'humidité des composantes de la biomasse aérienne totale selon les classes

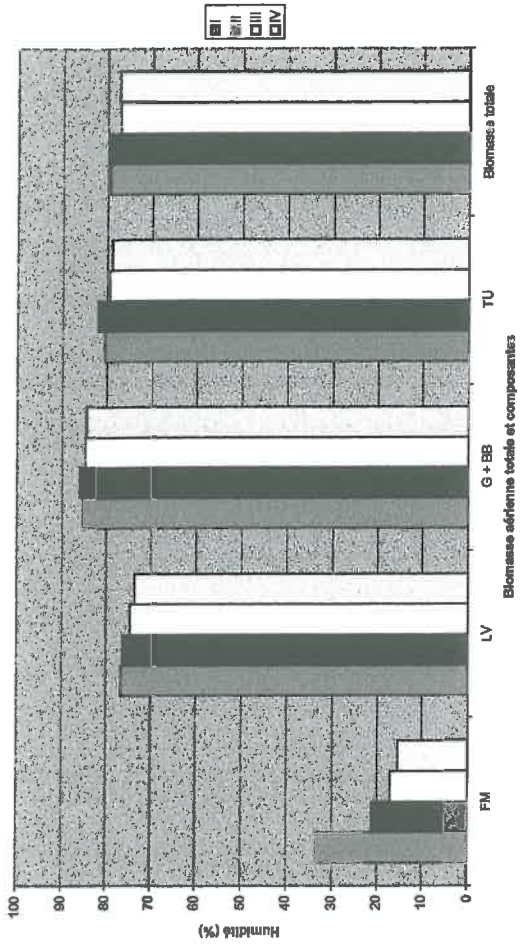


Figure 3.8 : Humidité des composantes de la biomasse pour les traitements N° et N+

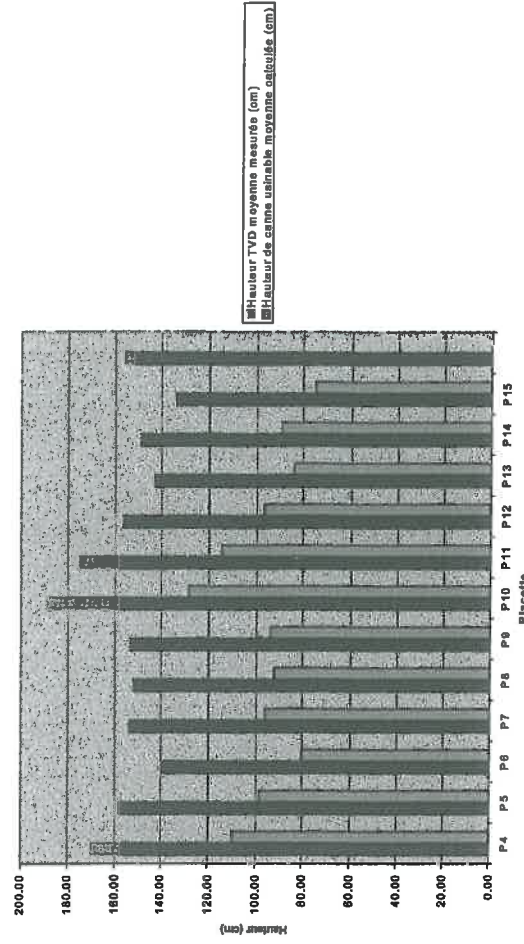
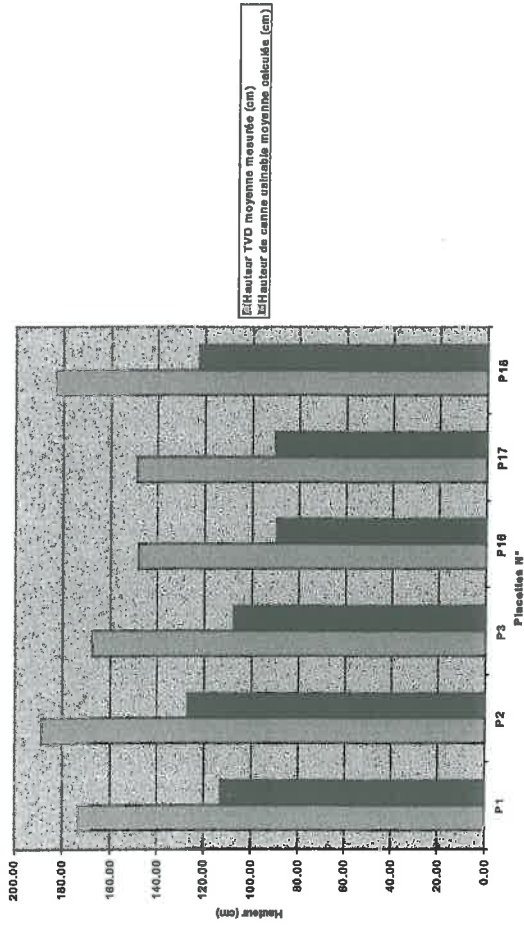


Figure 3.5 : Hauteurs TVD mesurées et hauteurs de canne utilisable calculées pour les parcelles des traitements N° et N+

ne sont pas trop gênantes car elles s'effacent lorsqu'on effectue la moyenne sur l'ensemble des tiges de la placette puis des placettes de chaque traitement.

1.A.3. Interprétations

Les relations type (2) et (4) étant d'après Martiné indépendantes du site et de la date, nous pouvons en déduire d'après les figures 3.3a et 3.3b, que la fraction usinable de la matière sèche aérienne commence à s'accumuler sur une tige approximativement à partir du moment où sa hauteur dépasse 50 cm et sa biomasse totale 60 g. Un effet azote semble se traduire par un retard de l'accumulation de biomasse de canne usinable sur des tiges fertilisées. De plus, les micro-parcelles fertilisées présentent un plus grand nombre de tiges/m² mais de moindre hauteur. L'humidité des tiges des placettes non fertilisées semble plus importante, mais nous n'irons pas plus loin dans ces interprétations qui ne font pas l'objet de notre étude (cf. figures 3.6 et 3.7).

Nous constatons que la matière sèche de limbes verts est relativement constante d'une placette à une autre et d'un traitement à un autre. L'hétérogénéité entre les placettes réside surtout dans la biomasse totale et les autres composantes de cette biomasse (MS et MF de canne usinable) qui peuvent varier du simple au double et même du simple au triple selon les placettes. Elle est du même ordre de grandeur pour les deux traitements. La variabilité des hauteurs de canne usinable et TVD est un peu moins importante mais nette quand même. Elle suit celle des composantes de la biomasse de même que la variabilité du nombre de tiges vivantes par placette. Cette variabilité peut être due au terrain et à l'âge variable des cannes avec des placettes composées d'une proportion de cannes jeunes plus importante que d'autres placettes. Si l'on se réfère au plan de l'essai, on constate que les placettes les plus productives sont situées à l'est de la diagonale Nord-Sud joignant la placette P1 à la placette P18. Nous comprenons que le nombre de répétitions choisi convient pour prendre en compte cette hétérogénéité.

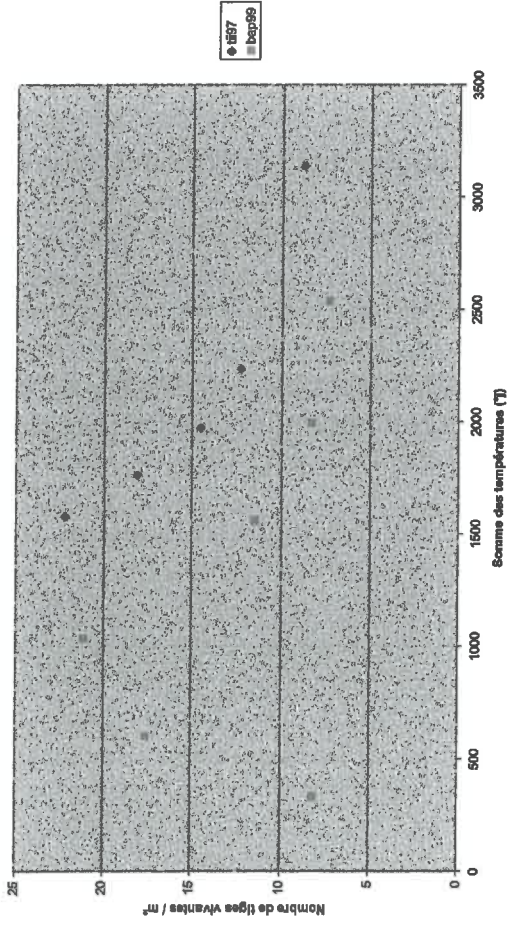
1.A.4. Limites

Parmi les composantes de la biomasse aérienne nous savons que la matière sèche des limbes verts est intéressante car elle permet habituellement de calculer le LAI. Toutefois, n'ayant pas procédé à l'établissement d'une relation entre matière sèche de limbes verts et surface de ces limbes verts (notion de surface massique), que nous aurions pu appliquer à nos calculs de matière sèche de limbes verts des placettes pour en déduire le LAI, nous n'avons pas estimé le LAI. De même, les résultats des analyses du jus de canne envoyé au laboratoire n'étant pas encore parvenus, nous n'avons pas établi de relation type (3) entre le poids de sucre moyen par tige et la matière sèche de canne usinable moyenne par tige. Cependant rappelons que l'objectif de cette partie du travail était de comprendre la méthodologie d'acquisition des données observées que le CIRAD de la Réunion nous a fournies, parmi les quelles nous avons sélectionné celles à utiliser pour la calibration du modèle.

1.A.5. Informations utiles pour le calage

Outre notre contact avec la plante et le milieu, nécessaire pour rappeler au « modélisateur » que la plante existe derrière le modèle, cet essai nous a permis de tirer quelques informations intéressantes : comme des valeurs à attribuer aux paramètres de la rubrique « eau dans la plante ». D'après la figure 3.8, nous décidons d'attribuer à **H₂OFEUILJAUNE** la valeur **0.25** (g eau/g MF) et à **H₂OFEUILVERTE** la valeur **0.75**. Ces valeurs sont les moyennes sur les 4 classes des humidités calculées respectivement pour les feuilles mortes et pour les limbes verts. Nous sommes conscients que ces valeurs ont été obtenues à une date de suivi et sur un site, mais

Evolution du nombre de tiges vivantes avec la somme des températures



Evolution du nombre de tiges mortes avec la somme des températures

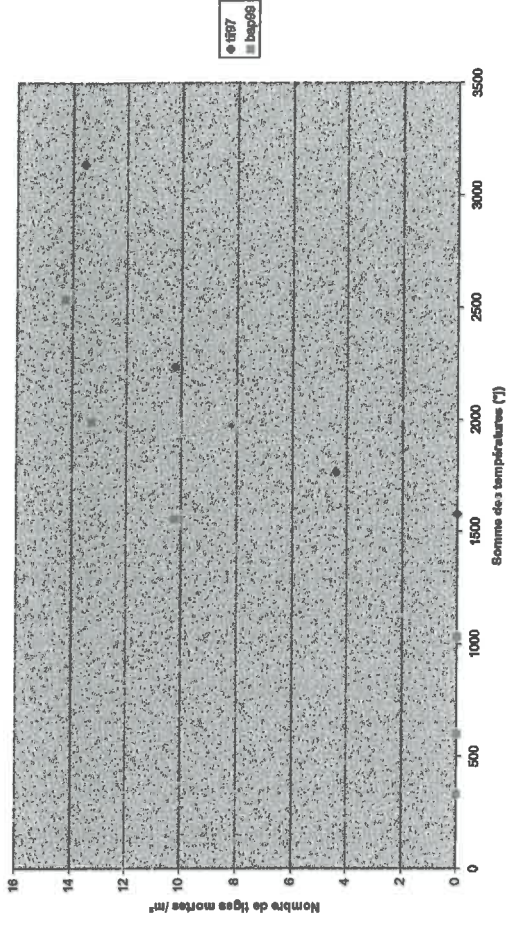
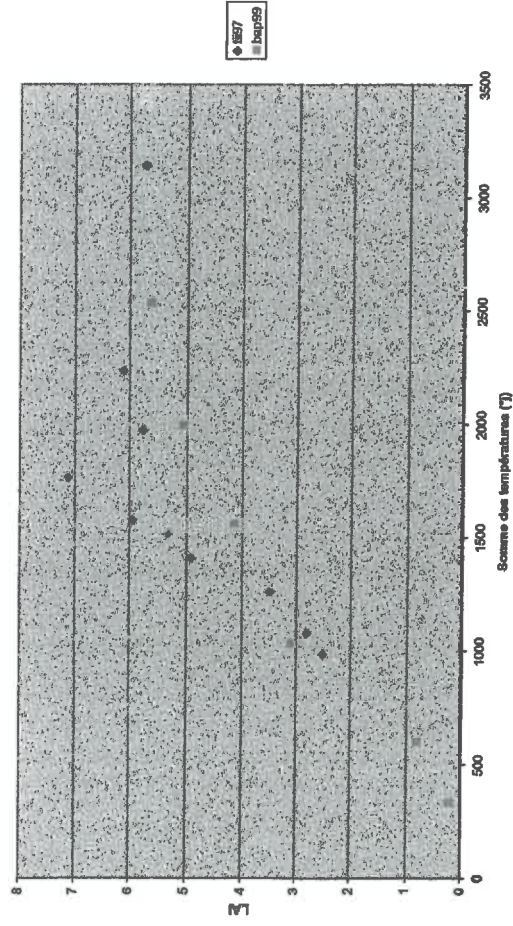


Figure 3.9 : Evolution du nombre de tiges vivantes et mortes avec la somme des températures

Evolution du LAI avec la somme des températures



Evolution de la MIS de limbes sénescents avec la somme des températures

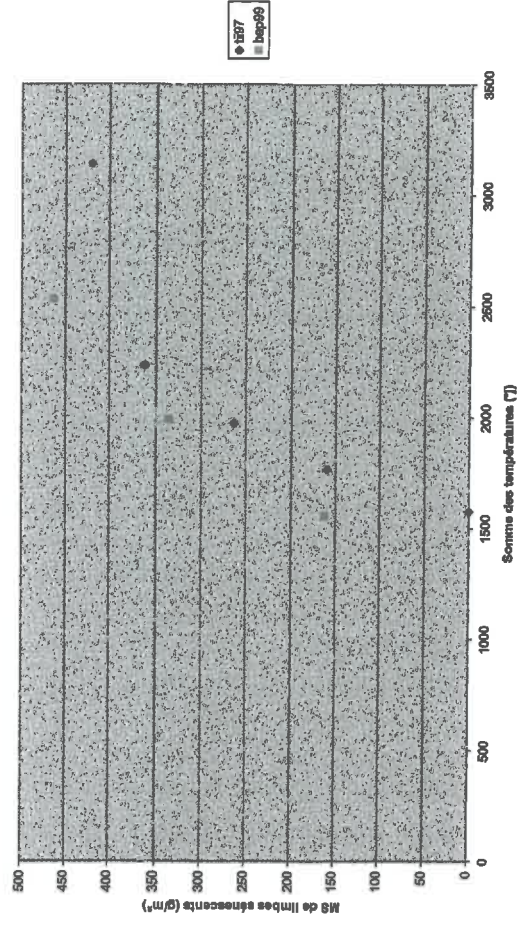


Figure 3.10 : Evolution du LAI et de la matière sèche de limbes sénescents avec la somme des températures

comme nous ne disposons pas de ce type d'information dans les données provenant des essais des années antérieures, ce sont celles que nous garderons. Nous observons que les valeurs d'humidité des différents organes sont décroissantes avec la classe à laquelle appartient la tige et donc à son âge. Nous pouvons supposer par exemple que l'humidité maximale des cannes usinables est celle des cannes les plus jeunes et que sa valeur dépasse 82 % qui est la valeur obtenue dans nos calculs pour les classes I et II. Nous pouvons supposer aussi que l'humidité des tiges usinables à la récolte est inférieure à 78 % C'est la valeur obtenue pour la classe IV composée de cannes qui ne seront pas récoltées avant 1 an. Nous avons choisi pour le paramètre $H_2OFRVERT$ la valeur **0.85**, en supposant que nous pouvons faire correspondre un « fruit vert » de STICS à la plus jeune canne usinable, hypothèse que nous discuterons dans le point II.A.3.a).

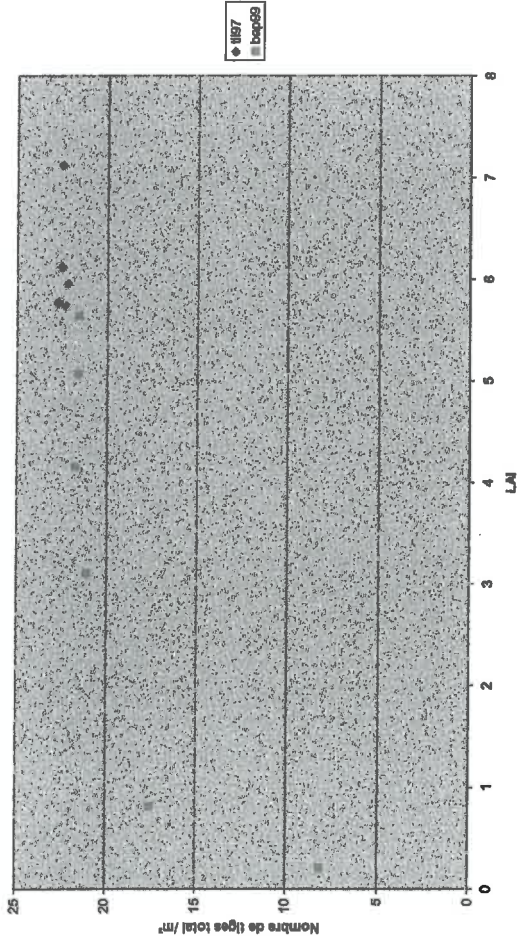
I.B. Ce qu'on peut tirer des données observées antérieures pour faciliter le calage

I.B.1. Dynamique d'évolution des tiges et des masse et surface foliaires

Nous comprenons d'après la figure 3.9 que le nombre maximum (ici 22) de cannes vivantes est atteint entre 1000 et 1500 °j et que c'est pendant cette même période que les cannes les plus jeunes commencent à mourir. Le nombre de cannes à la récolte est de l'ordre de 8-9 et correspond aux cannes qui sont apparues avant 400 °j pour l'essai bap99. Ces informations sont conformes à celles tirées de la bibliographie mais nous n'irons pas plus loin dans l'interprétation de la dynamique des tiges car le modèle STICS, qui n'individualise pas les tiges mais fonctionne en biomasse totale ne pourra pas intégrer ce type d'informations. Nous pouvons cependant observer, en faisant le lien entre le nombre de tiges total et la biomasse aérienne totale, que peu de biomasse s'accumule dans les tiges avant que le nombre de tiges atteigne son maximum. En reliant le nombre de tiges total avec le LAI nous observons que ce dernier vaut environ 3 quand le nombre de tiges atteint son maximum ; c'est le début de la fermeture du couvert (cf. Fig. 3.11a). Nous voyons aussi que l'évolution ultérieure du LAI n'est pas affectée par la chute rapide du nombre de tiges vivantes, ce qui confirme l'idée d'une compensation feuilles/tiges et les résultats obtenus par Nickell (1977). La figure 3.10 montre que l'évolution du LAI de l'essai tii97 est assez différente de celle de l'essai bap99. Dans les 2 cas l'indice foliaire se stabilise autour de la valeur 6 mais il passe par de très fortes valeurs peu après 1500 °j pour l'essai tii97. Ce phénomène peut être dû au fait que la sénescence des tiges pour cet essai débute près de 500°j après celle de l'essai bap99, l'augmentation du nombre de feuilles par tige n'ayant pas été contrebalancée pendant cette période par la perte de tiges.

La sénescence de limbes foliaires semble débiter aux alentours de 1400-1500°j pour l'essai bap99 et de 1500°j pour tii97 (attention, il s'agit bien des limbes sénescents des tiges vivantes, les tiges mortes étant supprimées une fois comptées). Or les premières feuilles apparaissent d'après la bibliographie, au moment de l'émergence des premières tiges autour de 90°j. Nous pouvons en déduire que la durée de vie d'une feuille est proche de 1300-1400°j, ce qui ne correspond pas tout à fait au résultat du calcul fait à partir des informations de Védie (1993, cité par Martiné, 2001) : phyllochrone (83°j/feuille) x nombre de feuilles apparues avant que la plus âgée commence à mourir (12-14) qui nous donne approximativement 1100°j. Compte-tenu de l'incertitude régnant sur le choix de considérer un limbe comme vert ou sénescant lorsqu'il l'est partiellement et sur le moment d'apparition d'une nouvelle feuille car elle est complètement enroulée dans le fouet, nous prendrons arbitrairement **300** comme valeur pour **DURVIEF** (elle correspond à la somme des températures 1400°j transformée en Q10 de 2 en divisant

Relation entre le nombre de tiges total et le LAI



Relation entre la MS de limbes verts et le LAI

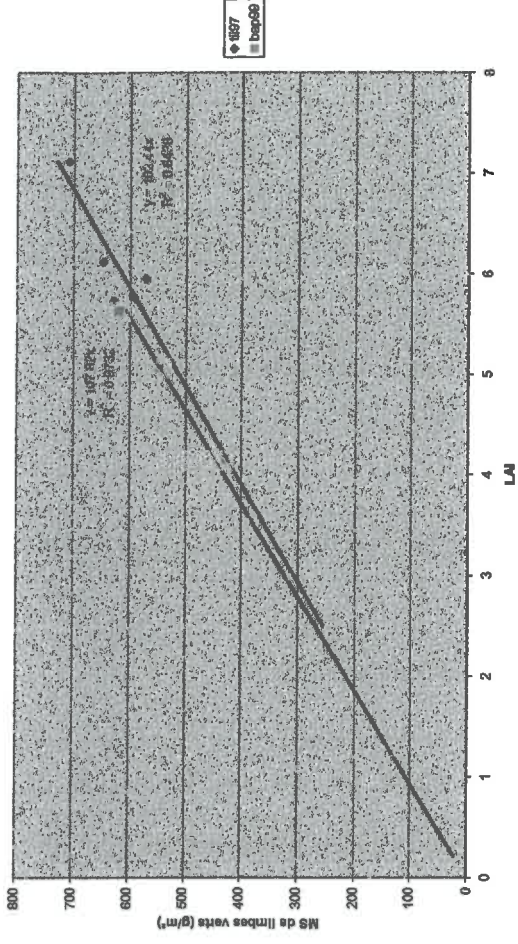


Figure 3.11 : Relation entre l'indice foliaire et le nombre total de tiges et entre l'indice foliaire et la matière sèche de limbes verts

Evolution de la biomasse sèche aérienne totale avec la somme des températures

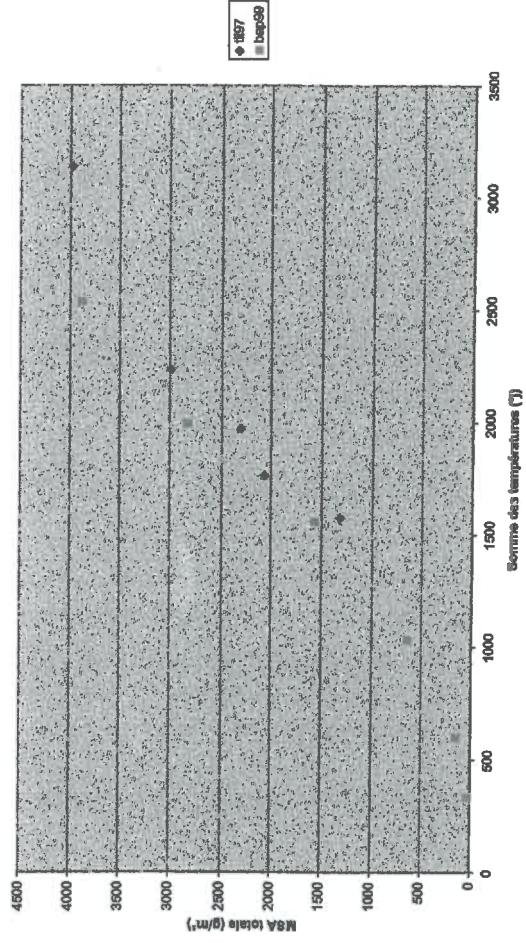


Figure 3.12 : Evolution de la matière sèche aérienne totale avec la somme des températures

Evolution de la MS et de la MF de canne usinable avec la somme des températures

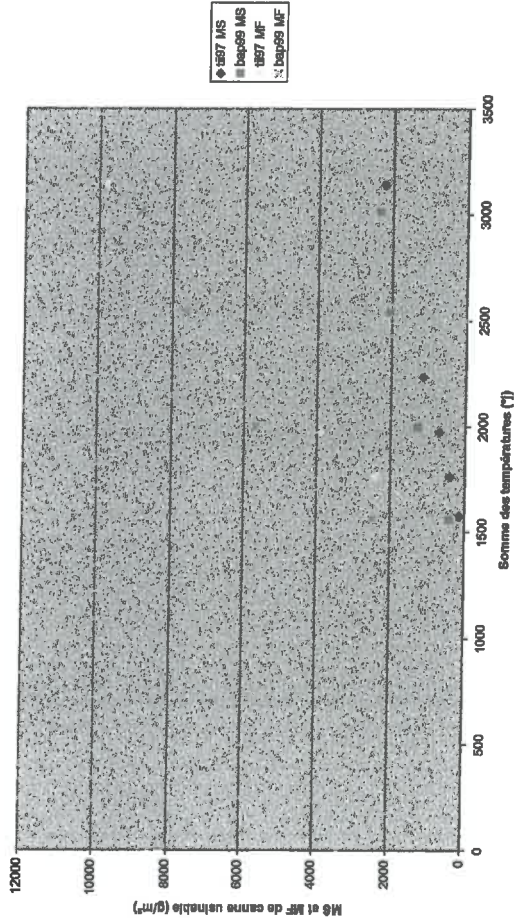
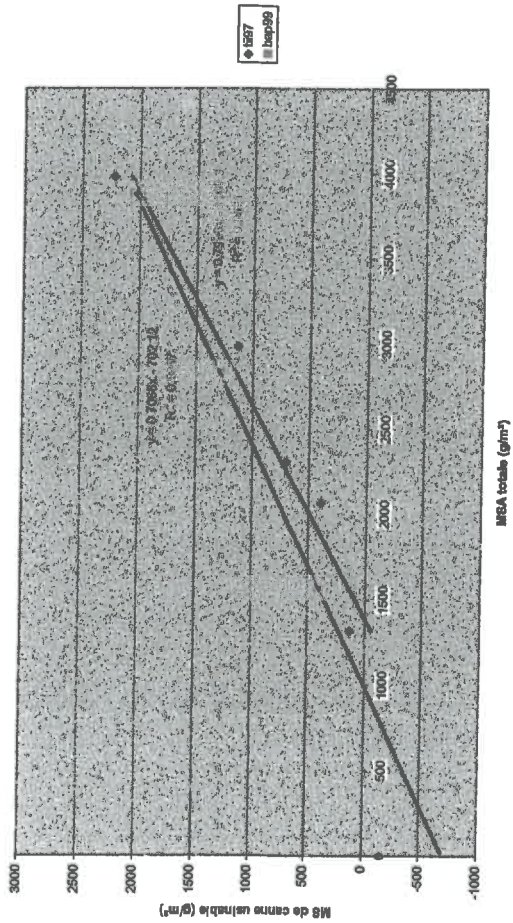
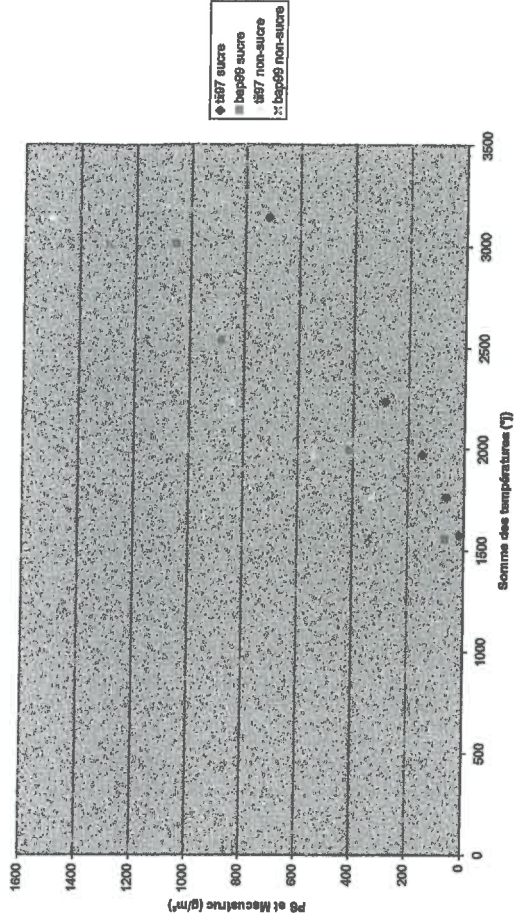


Figure 3.13 : Evolution de la matière fraîche et sèche de canne usinable et de ses composantes avec la somme des températures

Relation entre la MS de canne usinable et la MS aérienne totale



Evolution du poids de sucre et de non-sucre (MS) avec la somme des températures



Relation entre le poids de sucre (MS) et le MS de canne usinable

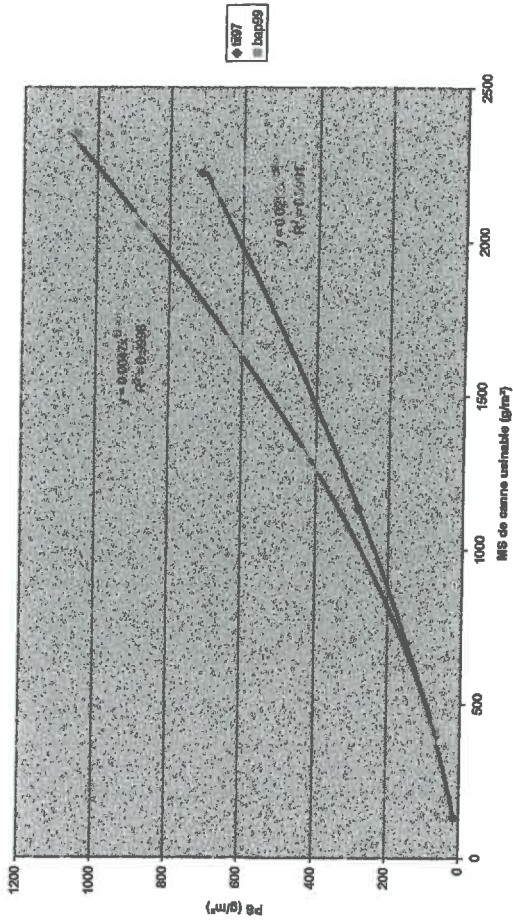
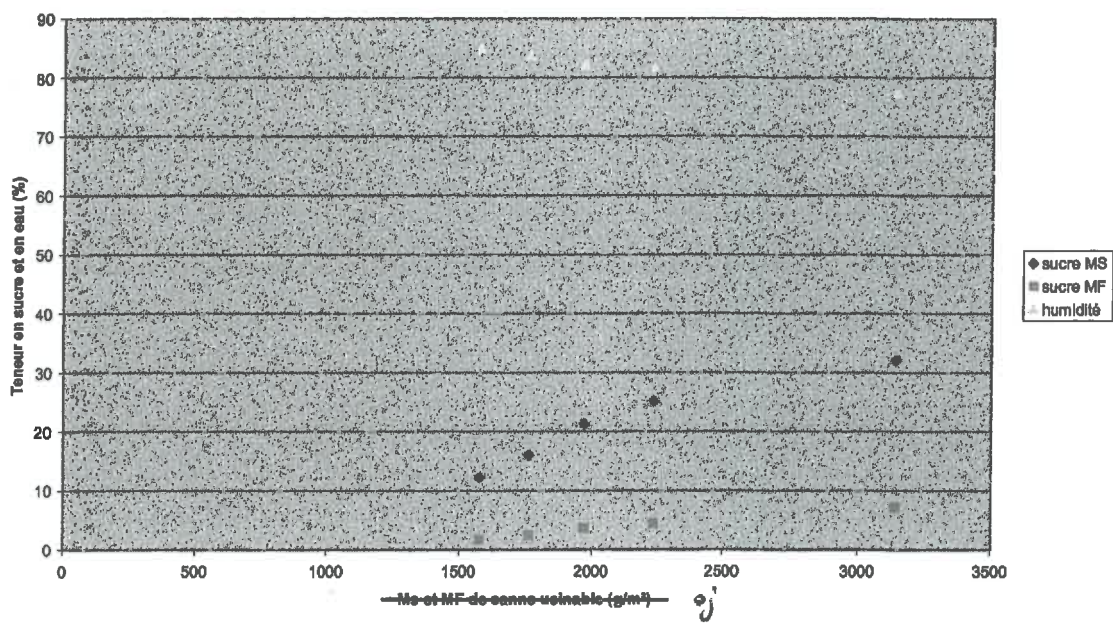


Figure 3.14 : Relations entre le poids de sucre, la matière sèche de canne usinable et la matière sèche aérienne totale

Richesse en sucre dans la MS et la MF et humidité des cannes usinables de l'essai ti97



Richesse en sucre de la MS et MF et humidité des cannes usinables

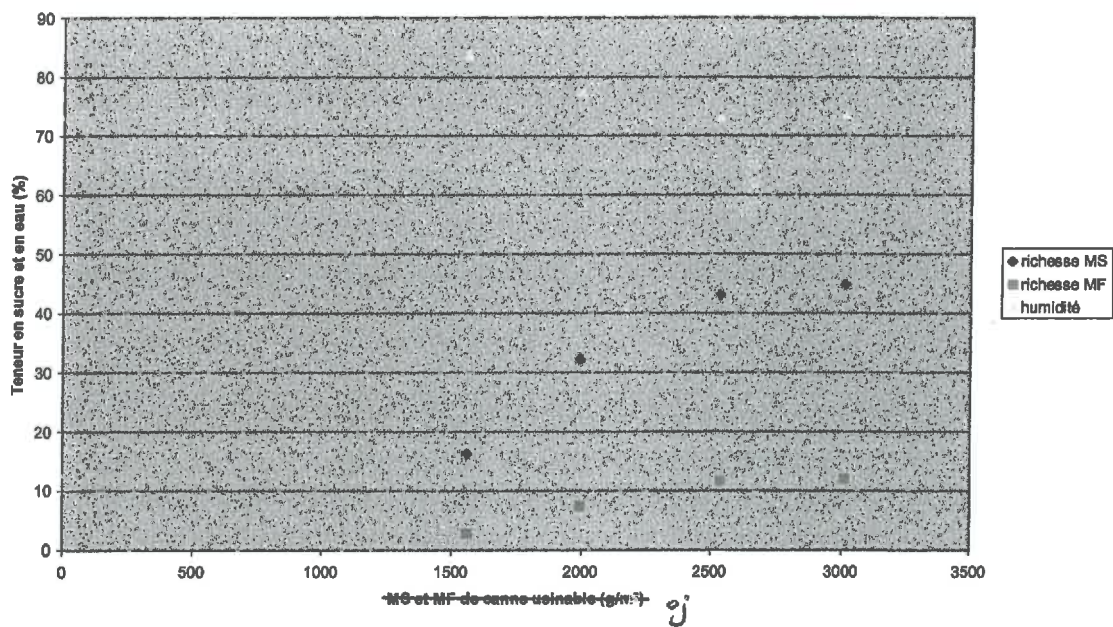


Figure 3.15 : Evolution de la richesse en sucre et de l'humidité des cannes usinables des essais ti97 et bap99

approximativement sa valeur par 5). N'ayant pas d'informations sur l'évolution de cette durée de vie au cours du cycle, nous la considérons comme constante en donnant à **DURVIEI** la valeur 1..

1.B.2. Phases du cycle et évolution biochimique

La figure 3.13 montre que la biomasse de canne usinable commence à s'accumuler autour de 1400°j, ce qui correspond à une biomasse aérienne sèche totale d'environ 1000g/m². Le sucre, lui, commence à s'accumuler autour de 1500°j, où la biomasse sèche de canne usinable est de l'ordre de 150g/m² et par conséquent la biomasse totale voisine de 1150g/m². A partir du moment où une partie de canne devient usinable, celle-ci semble se déshydrater à une vitesse que nous pouvons estimer graphiquement à **0.08 %/j**. C'est donc la valeur que nous affectons au paramètre **DESHYDBASE** bien que le graphe montre que l'évolution de l'humidité n'est pas linéaire en fonction du temps ou du temps thermique et diffère entre les 2 essais. La teneur en eau initiale dans la matière fraîche de tige usinable est de 85%, ce qui est cohérent avec les observations réalisées à Cesaria. L'effet d'un stress hydrique sur l'évolution de l'humidité d'une canne usinable et de sa richesse en sucre n'ayant pas été étudié ici, nous attribuons provisoirement la valeur **0** à **TEMPDESHYD**, qui deviendra certainement un paramètre à estimer précisément lors de l'étude de l'effet de sevrage (augmentation de l'accumulation de sucre suite à un arrêt d'irrigation). L'évolution de la richesse en sucre de la matière sèche de tige usinable n'est pas non plus linéaire mais **STICS** exige une valeur unique. Nous avons choisi d'affecter à **VITPROPSUCRE** la valeur **0.025 %/°j**.

1.B.3. Ordres de grandeur de rendement en cannes usinables et sucre à la récolte

Les différents graphes tirés des observations réalisées par le CIRAD de la Réunion montrent que la biomasse sèche aérienne totale des essais bap99 et tii97 est de l'ordre de 4000g/m² soit 40t/ha à la récolte (cf. Fig. 3.12). La proportion de matière sèche de canne usinable dans la biomasse sèche aérienne totale est pour les deux essais légèrement supérieure à 50% même si elle semble avoir été accumulée moins vite à Tirano. Ces valeurs correspondent aux moyennes présentées dans la 1^{ère} partie (cf. I.A.3.e.). Attention, les mesures fournissent des rendements en cannes propres donc débarrassées de leurs feuilles et bouts blancs, alors que les rendements estimés par la sucrerie comprennent environ 10% de non-canne. Quant au poids de sucre à la récolte à Tirano (7t/ha), il est inférieur à la moyenne tandis que Barau produit une quantité proche de la moyenne (10t/ha). Ce que Tirano produit en moins en sucre, il l'a produit en fibres et non-sucre, et ce surtout en fin de cycle (cf. figure 3.13b) (le sucre s'accumule habituellement plus vite que la structure). Tirano a cependant produit un rendement en cannes usinables fraîches supérieur à celui de Barau, l'humidité des cannes de cet essai étant encore très élevée à la récolte (proche de 78% contre 73% à Barau) (cf. figure 3.15). La richesse en sucre de ses cannes est donc loin des 12% dans la matière fraîche et 45 % dans la matière sèche, valeurs moyennes qui sont aussi celles atteintes par les cannes de Barau. Les causes de ces écarts ne peuvent venir de différences de niveau de stress, ces essais ayant été sélectionnés pour leurs conditions de culture optimales. Nous arrêterons ici la comparaison des essais, qui, on l'a vu, ont été menés dans des conditions pédo-climatiques très différentes et dont les données seront utilisées pour la calibration.

II. BILAN DE LA CONFRONTATION DU FONCTIONNEMENT REEL DE LA CANNE A SUCRE A SA MODELISATION DANS STICS

II.A. Etablissement de correspondances entre les processus écophysologiques chez la canne et les concepts et formalismes de Stics

II.A.1. Démarrage de la culture

II.A.1.a. Comment simuler le départ d'une repousse ?

Nous avons travaillé sur des cycles de repousses, ce qui pose problème pour initialiser le démarrage de la culture juste après une coupe, comme nous l'avions pressenti. Le problème est similaire chez les graminées fourragères auxquelles STICS a déjà été adapté et c'est pourquoi le modèle offre la possibilité d'initialiser l'état de la plante (et de ses racines si l'option densité vraie est sélectionnée) au démarrage.

En effet, le système racinaire étant déjà en place, nous le considérerons comme figé (nous avons vu en première partie qu'il n'évolue presque pas et qu'il s'agit uniquement d'un renouvellement progressivement ralenti). Sa vitesse de croissance en longueur nulle et la profondeur d'enracinement fixée, ce que nous représentons en initialisant $ZRAC_0$ à la valeur de OBSTARAC, la profondeur maximale exploitable par les racines, soit arbitrairement **200cm**.

Ce qui est particulier pour la canne à sucre est que le sol est complètement nu après coupe où les tiges sont prélevées à la base. La matière sèche aérienne et le LAI sont nuls donc nous attribuons à LAI_0 et $MASEC_0$ la valeur 0. Quant au stade de démarrage, nous n'avons pas choisi SNU car STICS considère dans ce cas que la plantation n'a pas encore eu lieu. Nous ne choisissons pas non plus LEV car le LAI se met en place avec STICS directement après la levée alors que dans la réalité il y a un délai entre la coupe et l'apparition des nouvelles tiges, de la même nature qu'une durée de « germination ». Nous avons donc décidé de considérer que le cycle commence au **stade₀ IPLT**, comme si la canne venait d'être plantée. De cette façon, la durée thermique STPLTGER s'applique et c'est ce qui permet que le LAI ne se mette pas en place tout de suite.

II.A.1.b. La notion de « densité de plantes » appliquée à la canne à sucre

Les spécialistes de la canne à sucre ne parlent jamais de densité de plantes ni de tiges mais d'écartement entre les rangs et c'est seulement sur ce dernier que jouent les planteurs. Si l'écartement est de 1,5m comme c'est le cas à la Réunion en général, 1m² correspond à 67 cm de longueur sur la ligne de canne. La répartition des boutures sur le rang se fait toujours de la même manière à la Réunion avec des boutures placées bout à bout quelle que soit leur taille, donc il y a ainsi toujours à peu près 8 yeux/m² susceptibles de générer des tiges primaires, les premières à « lever », elles-mêmes donnant par la suite des tiges secondaires. Rappelons que le nombre de tiges vivantes évolue au cours du cycle selon une dynamique particulière et se stabilise autour d'une petite dizaine/m² (à la Réunion) (cf. 1^{ère} partie). Après une coupe il y a donc environ 10 restes de tige/m² d'où partira une nouvelle série de tiges primaires de la génération de repousse. C'est cette non-constance du nombre de tiges au cours du cycle (dépendant réversiblement des conditions environnementales dont principalement le rayonnement traversant le couvert en conditions optimales) qui nous conduit à ne pas attribuer au paramètre DENSITE de STICS (qui est constant) une valeur de nombre de tiges/m². Toutefois, en faisant abstraction de l'évolution du nombre de tiges entre la coupe et la suivante (où le nombre est toujours voisin de 10) il serait peut-être possible de s'en sortir. Nous verrons par ailleurs qu'il est gênant de fixer un nombre de tiges/m² (qui ne correspond donc pas à un nombre de plantes/m² à la levée) car ce nombre de tiges est en réalité calculé par STICS à travers la

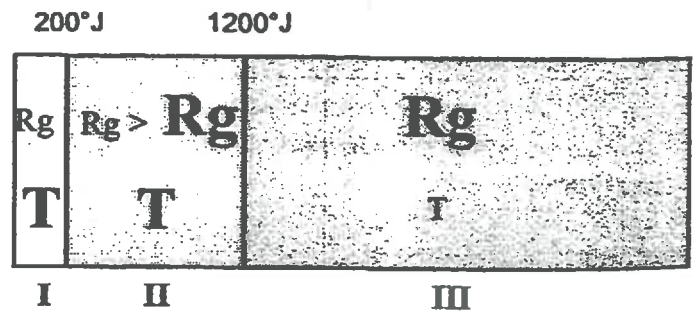
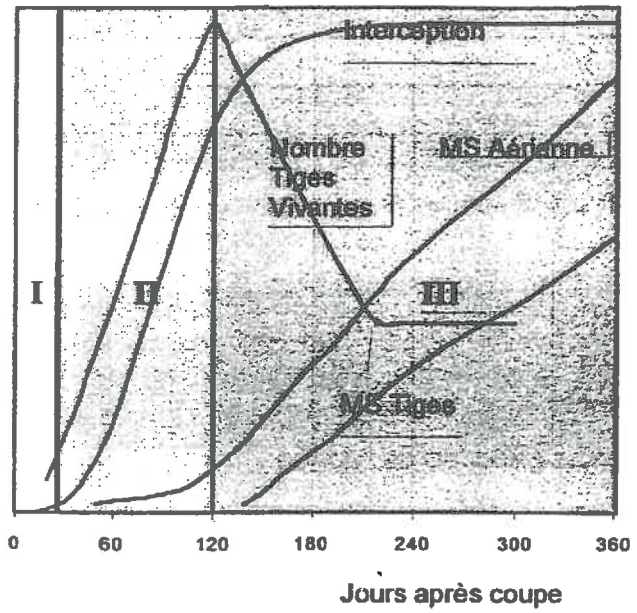


Figure 3.16 : Evolution relative des différents états du couvert et phases du cycle (Martiné, 1997a)

variable de sortie NBFRTT et sa valeur finale à la récolte ne sera peut-être pas la même, même si c'est le but de notre calibration. Mis à part ce calcul du nombre de fruits (donc cannes) effectué par STICS à partir du stade DRP, il n'y a aucune possibilité ni intérêt à individualiser des tiges (le LAI est calculé à partir de la somme des températures et non de ses composantes en termes de nombre de tiges par unité de surface, de feuilles par tige et de leur surface).

Si nous ne considérons pas un nombre de tiges /m² mais que nous choisissons de raisonner avec une densité de plantes/m², il faut définir ce que représente une « plante » pour nous. Cette notion ne parle a priori pas plus aux spécialistes qu'une densité (constante dans STICS) de tiges/m². Ce qui oriente notre choix dans l'établissement de la correspondance est surtout le rôle que joue la densité dans STICS comparé à celui même moindre de la largeur de l'inter-rang dans la réalité et l'impact que ce choix aura sur la calibration des paramètres qui lui sont liés (nombre potentiel de « fruits », étalement du début de remplissage de ces fruits...).

La modélisation de l'effet densité dans STICS a pour but de limiter l'accumulation de LAI à partir du seuil LAICOMP si la compétition inter-plantes s'exerce (si le nombre de plantes/m² dépasse le seuil BDENS) avec une intensité dépendant de ADENS. N'ayant pas d'information sur la façon dont joue la largeur de l'inter-rang sur la limitation de l'évolution de l'indice foliaire, nous considérerons cet effet ici nul, quitte à surestimer un peu le LAI dans nos simulations. 1 plante représente pour nous une touffe d'une dizaine de canne, or c'est à peu près le nombre de tiges/m² à la récolte, donc nous considérons qu'on a 1 plante/m². Ces choix nous font affecter à DENSITE et BDENS, la même valeur 1pl/m². En effet, d'après la formule définissant l'effet densité (présentée en 1^{ère} partie), celui-ci ne joue pas si DENSITE et BDENS sont identiques. ADENS n'intervient par conséquent pas dans notre configuration. Attention, ces choix n'ont pas qu'une influence sur la compétition des tiges pour le LAI mais aussi sur le paramétrage de la mise en place des fruits comme nous le verrons dans la suite.

II.A.2. Stades de développement, croissance « indéterminée » et sénescence

II.A.2.a. Comment relier les stades définis dans STICS avec les étapes d'évolution du couvert de canne à sucre ?

On ne peut pas vraiment parler pour la canne à sucre de stades aussi définis que pour le blé ou le maïs. Cependant différentes phases caractérisant l'évolution du couvert peuvent être distinguées. Nous allons voir dans quelle mesure STICS peut représenter ces phases en conservant ses propres stades. Dans la notre synthèse bibliographique nous évoquons la succession d'étapes comme l'émergence des premières tiges, le tallage, l'émission et la croissance des feuilles, la fermeture du couvert, l'allongement des tiges et la sénescence des plus jeunes, le durcissement des entre-noeuds et leur remplissage en sucre... Le tout peut être regroupé en 3 phases principales (perceptibles dans nos données), où les facteurs climatiques rayonnement et température n'ont pas la même importance relative d'après Martiné (1997a) (cf. figure 3.16) :

- Une première phase (I) où l'**interception est nulle puis très faible** jusqu'à au moins 200°j (base 12°C) et l'accumulation de biomasse quasiment nulle. Attention, le terme de levée chez la canne est parfois employé mais ne signifie pas la même chose. Il ne correspond pas à la vision habituelle de levée au sens « sortie de terre des tiges » suivie du tallage mais à l'allongement de celles-ci. Le sens dans lequel nous utilisons le terme levée est le même que dans STICS soit l'émergence des tiges primaires. Nous avons donc choisi d'affecter à la durée du délai plantation-démarrage (ou semis-levée) STPLTGR la valeur 90°j. Nous avons paramétré la durée de la phase juvénile qui suit la levée en donnant à STLEVAMF la valeur 110°j. Pendant cette première phase correspondant donc à la durée entre les stades IPLT et AMF de STICS, c'est la température qui joue le rôle le plus important sur la mise en place des premières tiges.

- Une deuxième phase (II), jusqu'à environ 1200°j, d'**accroissement rapide de l'interception** où l'allongement et le tallage des tiges est important. C'est une période de mise en place et d'accroissement des capteurs que sont les limbes foliaires. L'accumulation de biomasse aérienne, faible, ne concerne que les feuilles. Nous pouvons considérer que cette phase correspond à la période AMF-LAX (nous choisissons donc **STAMFLAX = 1000°j**), sauf que l'indice foliaire n'est pas maximal à LAX pour la canne. En réalité le couvert se ferme et le LAI continue d'augmenter légèrement. Dans STICS, l'option « plante à croissance indéterminée » permet que l'indice foliaire continue de croître après LAX ; le rôle de LAX dans ce cas consiste à maintenir la croissance journalière à son maximum au lieu de la faire chuter à 0 ce qui conduirait à un plateau de LAI comme dans le cas des plantes à croissance déterminée. Durant cette phase, la température est toujours déterminante pour réguler l'émission de feuilles et l'allongement des tiges mais le rayonnement prend de l'importance car la surface foliaire n'est plus limitante.

- une troisième phase (III) dite d'**interception quasi maximum** où on assiste dans un premier temps à la sénescence des jeunes tiges (compensée par un accroissement de la surface foliaire par tige) puis à l'accumulation de biomasse aérienne et surtout de biomasse de tiges usinables, au remplissage de celles-ci en sucre, à la sénescence de feuilles les plus âgées et à la stabilisation du nombre de tiges. Le rayonnement est prédominant pendant cette phase où il est converti en biomasse. La croissance de la canne à sucre étant infinie tant que les conditions déclenchant la floraison ne sont pas réunies, on ne peut pas définir de stade SEN (début de sénescence nette de la plante entière) fixe. La croissance et la sénescence des feuilles et des tiges ont lieu parallèlement (et non l'une après l'autre) et sont régulées indépendamment l'une de l'autre et de la floraison.

II.A.2.b. Comment caractériser l'absence de sénescence de la plante entière ?

En conditions optimales, il n'y a pas de sénescence nette de la plante, les tiges continuent de s'allonger. En cas de floraison, la croissance est ralentie (mais pas la sénescence) et en cas de stress il est possible que la sénescence soit plus importante. Le LAI peut donc diminuer puis réaugmenter au cours du cycle. Il ne s'agit pas de la mort de la plante au sens de STICS. Nous comprenons qu'il est plus judicieux de donner à **STLAXSEN** une grande valeur qui recule l'apparition du stade SEN à une date postérieure à la récolte (12 mois pour un cycle de repousse, 18 pour un cycle de vierges). Nous choisissons pour ce paramètre la valeur **3800°j**, ce qui place artificiellement le stade à 5000°j. Quant au stade LAN, nous le faisons apparaître le plus tard possible en donnant arbitrairement la valeur **5000°j** au paramètre **STSENLAN**.

II.A.3. mise en place et maturation des organes récoltés chez la canne, phase délicate à modéliser avec STICS

Rappelons que contrairement au maïs, la canne à sucre remplit des organes de soutien que sont les tiges. Il faut donc être vigilant et considérer dans la tige de canne 2 compartiments distincts : l'un jouant le rôle du fruit qui se remplit de sucre et l'autre structural qui croît en longueur en haut de la tige et en épaisseur en bas (Martiné, 1998a). Ces 2 compartiments peuvent en outre réagir différemment aux stress, point qu'il serait utile d'approfondir par la suite (mais qui ne fera pas l'objet de ce mémoire) dans le cadre de l'étude de l'effet de sevrage.

II.A.3.a. Discussion sur la nature, la dynamique de croissance et le nombre des organes récoltés

Nous avons choisi dans un premier temps de faire correspondre une tige usinable de canne à un fruit de STICS, car c'est ce qui semble le plus logique et nous disposons de données sur des nombres de cannes. Une autre possibilité serait de comparer un fruit de STICS à un entre-nœud. Ceci permettrait peut-être de lever quelques unes des difficultés que notre premier choix a

soulevées, mais nous en reparlerons. On fait donc totalement abstraction des véritables fruits de la canne, qui, de toutes façons n'ont que très peu de chances d'apparaître avant la fin de notre période de simulation.

**La « nouaison » des fruits ou le passage des cannes à l'état usinable*

STICS exige malgré l'absence d'intervention de la floraison dans notre cas, de définir un nombre « d'inflorescences » par plante. Or pour la canne, si elle fleurit, il y en a une par tige fleurie, le pourcentage de tiges fleuries étant très variable. Mais ici, ce n'est pas par rapport à la véritable inflorescence de la canne qu'il faut raisonner, mais toujours par rapport au rôle de ce concept dans STICS. Il faut bien garder en mémoire les correspondances que nous établissons au fur et à mesure entre la réalité et ce que représentent les paramètres et variables de STICS, car ces paramètres et variables ne sont pas toujours indépendants et nos choix par conséquent souvent liés les uns aux autres. L'inflorescence dans STICS est ce qui nous permettra de simuler l'étalement dans le temps de la mise en place des tiges usinables. En effet rappelons que NFRUITNOU ($j^{-1}.m^{-2}$) est calculé à partir d'un potentiel $^{\circ}j$ /inflorescence, du nombre d'inflorescences par plantes, de la densité de plantes/ m^2 , de l'unité de développement thermique, de l'effet réducteur du rapport source-puits et de l'effet réducteur optionnel du stress azoté. Nos choix pour les valeurs des paramètres AFRUITPOT et NBINFLO sont ici liés à celui de la valeur 1 pour le paramètre DENSITE. Nous décidons de ramener la définition du nombre potentiel de fruits noués (ici cannes usinables et aptes au remplissage) à l'échelle du m^2 pour simplifier. NBINFLO est donc fixé égal à **1/plante**.

On a vu que DRP est le stade à partir duquel les fruits se mettent en place (étalement sur une durée STDRPNOU) et se remplissent (chacun pendant une durée DUREEFRUIT). D'après notre analyse des données observées, DRP se situerait autour de $1500^{\circ}j$ ce qui nous conduit à attribuer à STLEVDRP la valeur de **1410 $^{\circ}j$** . Normalement STICS calcule de façon indicative à partir de DRP, la date de floraison, paramétrée par STFLODRP. Nous choisissons de mettre la valeur de ce paramètre à **0 $^{\circ}j$** car nous ne nous occupons pas de la floraison qui de toutes façons si elle avait lieu, apparaîtrait à une date ultérieure (ce qui n'est pas possible avec STICS, la floraison ayant lieu avant le remplissage des grains ou fruits). Afin que la déshydratation des cannes usinables commence dès leur mise en place comme cela semble être le cas d'après les observations de nos données, nous avons fixé le paramètre STDRPDES à **0 $^{\circ}j$** .

La durée thermique s'écoulant entre le début de remplissage du premier fruit et celui du dernier (donc tiges usinables) a été observée approximativement égale à **650 $^{\circ}j$** (Comm. Pers. Martiné, 2001) pour un cycle de repousse mais elle peut-être plus importante pour un cycle de vierges où l'hétérogénéité du peuplement en âge est plus important. C'est donc la valeur que nous attribuons à STDRPNOU. Bien que le début d'accumulation du sucre soit postérieur d'une centaine de $^{\circ}j$, d'après nos observations, au début d'accumulation de biomasse de canne usinable, nous considérerons ces 2 dates comme confondues avec IDRP. Quant à AFRUITPOT, nous lui attribuerons une valeur qui permet d'obtenir à la récolte, un nombre de fruits NBFruit proche de $10/m^2$. Attention, la comparaison entre NBFruit et le nombre de tiges vivantes observées n'est valable qu'à la date de récolte, les tiges de canne étant présentes depuis le début du cycle et pas seulement à partir de DRP. Si le rapport source-puits est égal à 1 (cf. formule présentée en 1^{ère} partie, alors AFRUITPOT doit être égal à $10/STDRPNOU$ soit 0,015. Or SOURCEPUITS ne sera pas égal à 1 durant toute la période DRP-NOU car STICS permet au travers des paramètres SPLAIMIN, SPLAIMAX, SPFRMIN, SPFRMAX de donner la priorité soit aux feuilles, soit aux fruits déjà noués et pas forcément aux fruits en cours de « nouaison », autrement dit, ces paramètres permettent de réguler les composantes du rendement : nombre de cannes usinables et poids d'une canne usinable. Nous reviendrons dans la partie suivante sur les

valeurs à leur attribuer. Compte-tenu du fait que SPFRUIT sera inférieur à 1, nous choisissons de considérer AFRUITPOT comme égal à $0,02 \text{ } ^\circ\text{j}^{-1}$. Mais il est possible que nous soyons amenés à réestimer cette valeur.

**La croissance des cannes usinables par classes d'âge*

Une fois une tige tendre transformée en canne usinable, elle se remplit de sucre tant qu'elle continue à croître au sommet, c'est la phase de maturation (ou ripening), même si elle ne signifie pas que les cannes atteignent une maturité un jour. Il est effectivement difficile de définir un stade de maturité physiologique pour la canne dans le sens du stade MAT de STICS car le poids de sucre au m^2 continue d'augmenter avec l'allongement des tiges et de leur partie usinable. Nous pourrions décider de placer le stade MAT à l'infini (ou en tous cas le faire apparaître plus tard que 18 mois après coupe précédente), comme le stade SEN ou LAN, 18 mois étant la plus longue période entre deux coupes à la Réunion. Cependant comme il apparaît que le poids de sucre rapporté à la matière fraîche de tige usinable peut atteindre un maximum, nous avons pensé faire correspondre MAT à ce moment de plafonnement de la richesse en sucre de la matière fraîche de tige usinable. D'après les observations, nous pourrions aussi choisir arbitrairement de placer MAT à 3500°j (soit à peu près 1 an) après coupe. Ce choix ne serait pas valable pour un cycle de cannes vierges, qui mettraient plus de temps à atteindre ce maximum. Le choix de la « date d'apparition du stade MAT » est délicat car dans STICS, les fruits arrêtent de croître une fois mûrs, ce qui n'est pas le cas pour la canne, à moins de considérer qu'une canne n'est jamais mûre... ce que nous finissons par admettre en plaçant MAT à 5000°j . Ceci revient à donner à DUREEFRUIT la valeur 2850°j .

NBBOITE est le paramètre qui permet de discrétiser la courbe de croissance d'un fruit pour appliquer à chaque fruit selon sa classe d'âge (% de croissance par rapport à sa croissance « maximale ») une certaine vitesse de croissance dépendant des paramètres AFPF et BFPF de la courbe logistique. Plus le nombre de boîtes est élevé plus la modélisation de la croissance des fruits sera précise mais nous n'avons pas besoin d'une extrême précision, la notion de fruit adaptée à la canne à sucre ayant déjà exigé plusieurs approximations sur la durée de remplissage et la place du stade de maturité. Nous avons choisi de faire passer les fruits dans 12 boîtes. En ce qui concerne les paramètres AFPF et BFPF, il est difficile de leur donner une valeur basée sur des observations. Si l'on regarde les graphes d'analyse des données observées, on voudrait que la courbe de croissance proposée par STICS soit relativement linéaire pour correspondre avec la réalité, ce qui nous amène à supposer AFPF égal à 0.5 et BFPF égal à 1, mais nous aurons certainement à revenir sur ces valeurs si la fonction « force des puits fruits » ainsi paramétrée ne donne pas de résultats satisfaisants. Nous n'avons pas modifié la valeur du paramètre PGRAINMAXI, qui a été fixée au cours du paramétrage antérieur à 1200g MS/fruit .

Nous avons émis l'idée de faire correspondre 1 fruit de STICS à 1 entre-nœud usinable. Ceci présente plusieurs avantages mais aussi quelques difficultés. Tout d'abord, le stade DRP serait inchangé. Ensuite, un entre-nœud a une croissance limitée ce qui nous permettrait de donner une valeur plus courte à DUREEFRUIT et d'appliquer à chaque entre-nœud la fonction de croissance plus facilement. Un entre-nœud arrive, lui, effectivement à un stade de maturité (ou remplissage maximum) et au moment de la récolte certains pourraient être considérés comme mûrs car présents dans la dernière boîte. Enfin, leur arrêt de croissance ne compromettrait pas la suite de l'accumulation de biomasse de fruit, d'autres entre-nœuds usinables n'étant eux pas encore mûrs et encore en croissance (en épaisseur). En revanche la durée STDRPNOU serait, elle, infinie, ce qui ne change rien au problème du stade MAT atteint une fois que tous les fruits sont mûrs (STPLTGR + STLEVDRP + STDRPNOU + DUREEFRUIT). Le renseignement difficile de STDRPNOU poserait problème pour le calcul de AFRUITPOT, d'autant plus que nous n'avons

pas moyen pour l'instant d'ajuster ce paramètre sur un nombre de fruits à la récolte, les entre-nœuds ou les feuilles qui leur sont associées n'étant jamais comptés. De plus ce nombre de fruits récoltés serait variable selon la longueur du cycle (récolte à 12 ou 18 mois), et pas leur poids individuel, tandis que c'est le contraire si l'on compare un fruit à 1 canne usinable. Même si la prédiction d'une part du nombre de fruits et d'autre part du poids d'un fruit n'est pas effectuée correctement avec STICS, mais que le produit des deux donne un rendement satisfaisant, nous nous en contenterons, car les sucriers sont intéressés par la prédiction la plus juste possible du rendement en poids de cannes fraîches et de leur richesse en sucre optimale. Les choix que nous avons à faire ont pour but de bien modéliser ce rendement, ce n'est donc pas essentiel que les valeurs des variables nombre de fruits et poids d'un fruit, qui ne sont pas des sorties essentielles du modèle pour nous, soient très précisément estimées. Nous avons choisi de garder la correspondance entre un fruit et une canne usinable car cela correspond plus aux mesures habituelles effectuées par les spécialistes, mais l'idée « 1 fruit = 1 entre-nœud » serait intéressante à tester. Le travail futur de calibration du modèle en conditions de stress hydrique et azoté exigera peut-être de revenir sur ce choix s'il apparaît que la modélisation de l'effet de sevrage passe par une gestion des « fruits » à l'échelle d'un entre-nœud.

Il est certain, qu'avec nos choix de correspondances entre concepts de STICS et réalité et ceux des valeurs attribuées aux paramètres, le fichier bilan de STICS (bnomessai.sti) affichera une date de maturité, de début de sénescence nette et de mort de la plante identiques à celle de la récolte, car elles lui auraient été postérieures. Il ne serait pas étonnant non plus que le nombre de fruits non mûrs soit égal au nombre de fruits total, mais nous avons précisé que la notion de maturité pour la canne à sucre était délicate. Les valeurs du bilan sur lesquelles nous porterons notre attention sont principalement la matière sèche aérienne totale, le rendement en matière fraîche de fruit et la teneur en sucre. Le nombre de fruits total affiché comprend en effet les fruits non mûrs car nous avons choisi l'option qui fait récolter à STICS les fruits présents dans toutes les boîtes et pas seulement dans la dernière comprenant uniquement les fruits mûrs (option « CODEFRMUR »). Dans STICS-Tomate, ce sont au contraire uniquement les fruits de la dernière boîte qui sont récoltés et le paramétrage du nombre de boîtes doit être plus fin. En ce qui concerne la décision de récolte, nous avons fixé le paramètre **SUCREREC** à 1, de sorte qu'il ne soit pas actif dans notre cas et laisse les simulations se dérouler jusqu'à la date butoir. Nous aurions pu choisir de déclencher la récolte à la maturité physiologique, ce qui reviendrait concrètement au même car elle ne serait pas atteinte avant la date butoir. Cependant, la décision de récolte en fonction de la teneur en sucre sera intéressante à terme, une fois que le modèle sera calé en conditions de stress et intégrera l'effet du sevrage, pour simuler différents scénarios

Bien que nous ne nous préoccupions pas pour l'instant des effets de stress, il faut choisir dans STICS de sélectionner ou non l'option « effet de stress azoté sur le nombre de fruits ». Il faut faire attention si on traduit cela par « un effet ou non de l'indice INNS sur le nombre de cannes usinables ». Pour la canne, la phase de mise en place des « fruits » modélisée par STDRPNOU représente la transformation progressive des tiges tendres en cannes usinables. Ce nombre est en réalité déterminé par les conditions ayant régné au début du cycle (rayonnement et la température et éventuellement le stress azoté), pendant la phase II comme nous le comprenons d'après notre graphe d'analyse des données observées 3.9a et la figure 3.16. Si l'on fait jouer le stress azoté sur le nombre de fruits (pendant la phase DRP-NOU) avec STICS, les conséquences ne seront pas celles attendues. Nous avons donc préféré dans tous les cas choisir que l'INNS n'a pas d'effet (même si sa valeur est à 1 en conditions optimales si STICS modélise correctement les bilans hydriques et azotés).

Tableau 3.1 : Récapitulatif des problèmes posés par la modélisation du fonctionnement de la canne à sucre avec STICS : hypothèses, choix et propositions de correspondances

Concept de STICS / réalité physiologique	Dans STICS	Dans la réalité	Commentaire sur la correspondance à discuter
<i>Stade de démarrage</i>	Stade IPLT	Plantation en vierge ou coupe précédente en repousse	Choix de figer le système racinaire
<i>Notion de densité</i>	Effet de la densité de plantes/m ²	Effet de l'écartement entre rangs	Choix de ne pas faire jouer l'effet densité
<i>Notion de plante</i>	Rôle dans l'expression de l'effet densité	inexistante	Choix de considérer 1 plante/m ² . Autre possibilité : 1 plante = 1tige ?
<i>Notion de levée</i>	Stade LEV	Apparition des premières tiges (attention à confusion)	Nécessité de faire des liens entre les phases d'évolution du couvert de canne à sucre et les stades de STICS communs à toutes les cultures
<i>Stade d'accélération maximale de la croissance foliaire</i>	Stade AMF	Fin de la phase juvénile I	
<i>Stade</i>	Stade LAX	Limite entre la phase II et la phases III : plafonnement de l'interception	
<i>Date de floraison</i>	Rôle indicatif	inexistante	
<i>Notion d'inflorescence</i>	Rôle dans le calcul du nombre de fruits noués	inexistante (Attention à confusion)	Choix de considérer 1 inflorescence/plante
<i>Début de remplissage des fruits</i>	Stade DRP	Transformation de la tige en canne usinable puis accumulation de sucre	2 étapes confondues en une seule
<i>Notion d'organe récolté</i>	1 fruit	1 canne usinable	Autre possibilité : 1 fruit = 1 entre-nœud ?
<i>Notion de maturité</i>	MAT	Infinie sauf si surmaturation	Nécessité de repousser ces stades au delà de la date de récolte
<i>Notion de sénescence de la plante</i>	SEN-LAN	inexistante	

II.A.3.b. Compétition entre les compartiments et priorités

Nous avons vu que c'est à nous de paramétrer avec attention AFRUITPOT et la fonction SPFRUIT pour atteindre avec STICS le nombre d'organes récoltés voulu. Encore une fois, si ce nombre ne correspond pas tout à fait à la réalité (une dizaine de tiges usinables/m²), ce n'est pas trop grave si la multiplication par le poids d'un fruit permet de modéliser correctement le rendement en poids frais de fruits. Toutefois, si c'est possible, autant jouer sur les seuils SPFRMIN et SPFRMAX pour ajuster la répartition du rendement entre le nombre de cannes et leur poids et aussi la compétition intense avec les feuilles. Nous avons vu en 1^{ère} partie que le partage des assimilats, exclusivement tourné vers les feuilles pendant la phase II d'augmentation rapide de l'interception, s'oriente de plus en plus vers les tiges au fur et à mesure que celles-ci s'allongent et se remplissent. La fonction SOURCEPUTS étant dans STICS assez complexe ainsi que les fonctions FPV (force des puits végétatifs) et FPFR (force des puits fruits) qui permettent de la calculer et qui en même temps en dépendent indirectement, il est difficile de choisir des valeurs pour les seuils. Nous avons choisi de fixer SPLAIMIN et SPFRMIN à 0 et SPLAIMAX et SPFRMAX à 1 dans un premier temps faute de moyen de les renseigner autrement. Nous sommes conscients qu'une optimisation sera certainement nécessaire. En revanche les paramètres SLAVERT et SLAVERTMIN peuvent être renseignés grâce à l'analyse des données observées où il apparaît que la surface massique est relativement constante et supérieure à 100g/m²(cf. figure 3.11b). Cependant d'après Martiné (Comm. Pers., 2001) nous savons que cette surface massique évolue avec l'âge de la feuille, mais comme STICS exige une valeur fixe, nous attribuerons à SLAVERT la valeur 110g/m² qui est en réalité une moyenne entre les différentes feuilles du couvert. Quant à SLAVERTMIN, dont la valeur n'est pas connue, aucune mesure de la surface massique en conditions de stress n'étant disponible pour le moment, nous l'avons fixé à 90 g/m² qui correspond à la valeur obtenue par Martiné pour les feuilles les plus âgées.

Le bilan des correspondances que nous avons établies et des choix qui en découlent figure dans le tableau 3.1).

II.B. Orientation de l'évolution de Stics

Il a déjà été précisé que STICS est en constante évolution et que la version STICS 5.0 sera fixée en septembre 2001. Les nouveautés par rapport à la version précédente STICS 4.0 (Mai 1999) comprennent principalement (en ce qui nous concerne) :

- **le découplage de la croissance et de la sénescence foliaire** permettant de calculer le LAInet par différence entre le LAI brut accumulé et le LAI perdu par sénescence de feuilles et non plus directement. Ce bilan entre génération et sénescence a été proposé par Justes et Mary (compte-rendu de la Réunion STICS, 2000). La fonction de sénescence foliaire introduite est cohérente avec le module optionnel de la sénescence de biomasse basée sur le concept de durée de vie des organes. Le passage récent du calcul de la sénescence par le Q10 plutôt qu'à partir de la somme des températures a permis d'améliorer la simulation de la sénescence pour les plantes subissant des températures inférieures à la température de base du développement.
- la modification de l'expression du **nombre de fruits « noués »** par jour pour les indéterminées et le calcul de la **force des puits fruits** et de leur **croissance**.
- la gestion de la **compétition entre fruits en croissance, fruits en nouaison et feuilles**, pour les plantes à croissance indéterminée, au moyen des différents seuils appliqués à la fonction SOURCEPUTS pour définir les fonctions SPLAI et SPFRUIT.
- le module qualité avec la simulation dynamique de **l'évolution des teneurs en eau et en sucre** (dans la matière sèche) des organes récoltés et leur **rôle dans la décision de récolte**.

Ces différentes évolutions n'ont pas été forcément spécifiques pour la canne mais ont répondu à des besoins particuliers des utilisateurs de STICS adapté à différentes plantes (tomate, vigne en cours...), ou à des résolutions de problèmes révélés par certaines de nos conditions de simulation. Nous avons intégré toutes les évolutions utiles voire nécessaires pour la canne à sucre quand leur absence empêchait de faire correspondre correctement le modèle à la plante, pour que la paramétrisation proposée en fin de ce mémoire soit la plus fiable possible. Les aménagements indispensables pour la canne (et qui seront intégrés à la version 5.0) ont été :

- le calcul du **nombre de fruits récoltés en comprenant les fruits non mûrs** et l'estimation du **rendement en matière fraîche de canne usinable** à partir de la récolte de l'ensemble de ces fruits (introduction de l'option « CODEFRMUR »). La récolte des parcelles à la Réunion se fait en une fois, malgré le stade de remplissage moins avancé pour certaines cannes que pour d'autres.

- **l'introduction des variables** PDSFRUITFRAIS, SUCRE et H2OREC dans les variables de sorties dynamiques, en plus de LAI, MASEC et MAFRUIT afin que celles-ci puissent éventuellement comparées à des observations.

- **l'introduction des paramètres** des fonctions SPLAI et SPFRUIT et des paramètres VITPROPSUCRE et DESHYDBASE parmi la liste des paramètres qui peuvent être choisis pour les optimisations.

Une fois toutes les modifications du modèle nécessaires réalisées et prises en compte dans la calibration et l'ensemble des choix effectués (options à sélectionner, correspondances à établir et lères valeurs à attribuer aux paramètres), c'est l'analyse statistique des résultats des prédictions faites par le modèle qui nous permettra de déterminer sur quels choix ou hypothèses il est nécessaire de revenir pour améliorer l'ajustement du jeu de paramètres que nous proposerons aux données dont nous disposons. Le jeu de paramètres que nous aurons obtenu, s'il est satisfaisant, témoignera de la capacité du modèle STICS dont l'INRA tient à la genericité, à simuler correctement l'évolution de la biomasse aérienne de la canne à sucre en comparaison avec les observations réalisées en conditions non stressées par le CIRAD de la Réunion. Cependant les étapes de calibration en conditions stressées et d'évaluation du modèle à partir de nombreux jeux de données seront nécessaires avant l'application du modèle à la gestion des effets de scénarios d'irrigation sur la teneur en sucre à la récolte. Si le jeu de paramètres ne peut être optimisé, c'est au niveau des formalismes qu'il faudra intervenir, mais nous ne pourrons qu'émettre des propositions, à discuter pour réussir à concilier dans la mesure du possible genericité de STICS et son réalisme écophysologique. En effet, il faut éviter de recourir à des artifices de paramétrisation (qui font abandonner la signification biologique des paramètres) tout en gardant à l'esprit qu'un modèle reste un modèle et qu'il faut accepter que sa représentation de la réalité ne soit que partiellement exacte.

III. TEST DES CHOIX REALISES ET OBTENTION D'UN JEU DE PARAMETRES PAR CALIBRATION

III.A. Bilan de la 1^{ère} attribution de valeurs aux paramètres

III.A.1. Récapitulatif des valeurs attribuées et des sources

Les paramètres étudiés, dont l'obtention des 1^{ères} valeurs est le fruit à la fois de notre synthèse bibliographique, de nos observations de terrain, de nos analyses du jeu de données mis en forme et de notre confrontation du modèle à la plante, sont récapitulés dans le tableau 3.2 avec leur source. Ce travail servira de base à l'étape d'optimisation et à la suite des opérations prenant le relais de notre calibration en conditions optimales. C'est à partir de ces valeurs de paramètres plante et généraux (non distingués) que nous avons effectué les simulations définies par les USM tii97 et bap99 associant chacune les 4 fichiers d'entrées et d'observations et les initialisations. L'USM tii97 figure en annexe 5. Les fichiers bilans btii97.sti et bbap99.sti sont présentés en annexe 10.

III.A.2. Résultats des simulations effectuées avec ces valeurs

III.A.2.a. Apparition des stades calculée par le module de développement

D'après les bilans de simulation, la levée a lieu une dizaine de jours après la coupe et la phase juvénile se terminée moins d'1 mois après. Les tiges commencent à se remplir, une fois le couvert fermé, environ 6 mois après la coupe et les stades de maturité et de sénescence de la plante ne sont jamais atteints.

III.A.2.b. Module de croissance aérienne

*LAI (cf. figures 3.17, 3.18 et tableau 3.3)

Pour les 2 essais, l'indice foliaire est sous-estimé par le modèle jusqu'à un LAI de 5 environ et sur-estimé après. La RMSE est autour de la valeur 2 pour les 2 essais. La surestimation en fin de cycle ne pose pas trop de problème mais la mauvaise simulation du démarrage entraîne une mauvaise estimation de la matière sèche pour l'essai bap99. Le fait que les indices foliaires atteignent des fortes valeurs est peut-être dû au fait que la durée de vie des feuilles est trop longue.

*MASEC (cf. figures 3.17, 3.18 et tableau 3.3)

Elle est donc sous-estimée pour l'essai bap99 avec une valeur de RMSE de 5,5, ce qui est supérieur aux 10% (soit 4,3 t/ha pour cet essai) que nous nous étions fixés comme limite. Pour l'essai tii97, en revanche, elle est correctement estimée avec une RMSE valant 8.5% de la biomasse aérienne récoltée.

III.A.2.c. Module d'élaboration du rendement et de la qualité

Le modèle sous-estime aussi la matière sèche de tiges usinables produite, ainsi que la matière fraîche, leur teneur en eau étant, elle correctement simulée pour les 2 essais, voire légèrement sur-estimée pour l'essai bap99 avec 78% d'eau dans les tiges à la récolte. Quant à la décomposition du rendement en nombre et poids individuel de tiges, elle n'est pas tout à fait exacte avec un nombre de tiges (13/m²) un peu trop élevé et un poids trop réduit (400-550g MF). Le sucre s'accumule trop vite et atteint pour les 2 simulations une valeur plus de 2 fois plus élevée que la normale (cf. figures 3.17 et 3.18). Les paliers (au nombre de 12) que l'on aperçoit

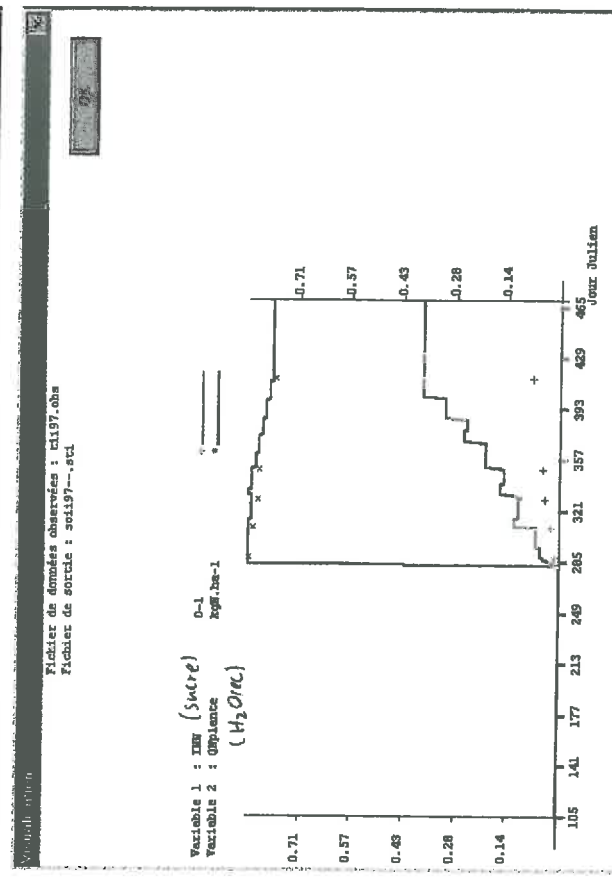
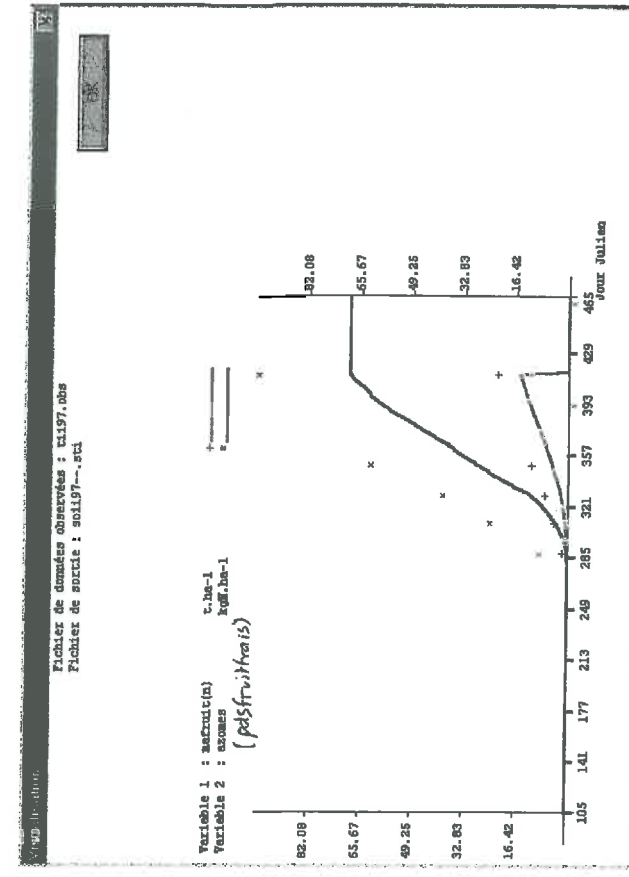
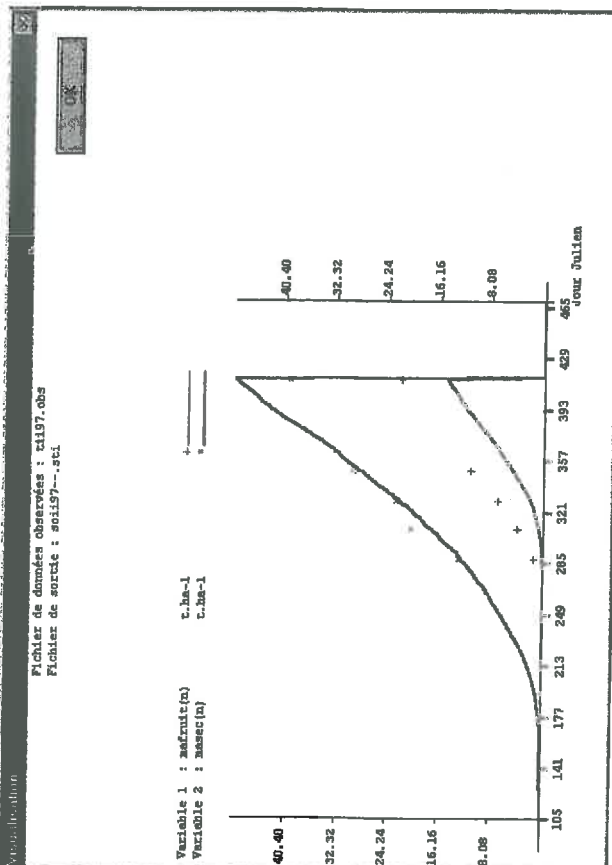
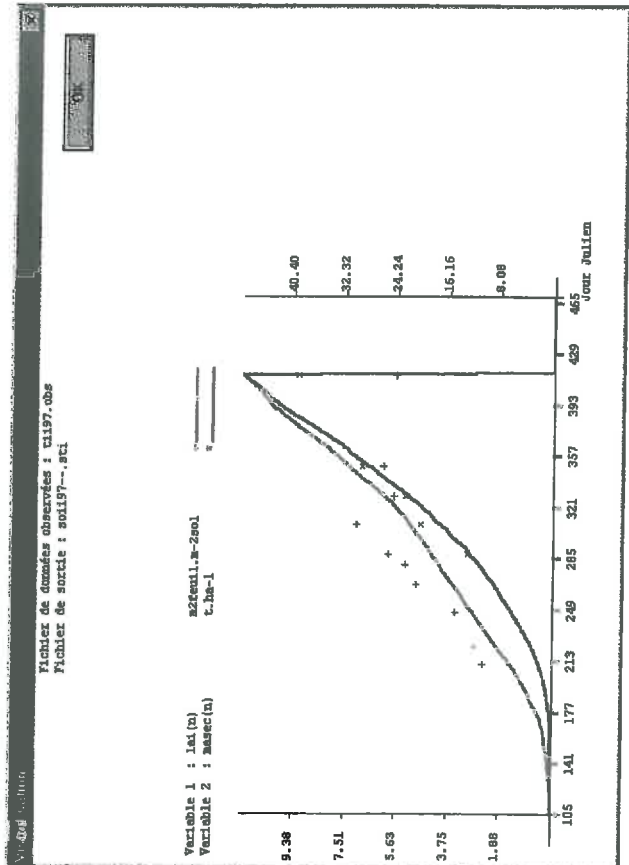


Figure 3.18 : Résultats des simulations avec le premier jeu de paramètres pour l'essai tii97

dans les courbes de simulation de la teneur en eau et en sucre correspondent aux 12 boîtes et sont dus au mode de calcul actuel de la croissance et du remplissage des fruits.

Attention, pour les besoins du modèle adapté à la canne, nous avons dû remplacer provisoirement les variables AZOMES, INN et QNPLANTE (dans le fichier observations) dont nous ne nous occupons pas, par les variables (respectivement) PDSFRUITFRAIS, SUCRE et H₂OREC dont nous avons besoin et qui feront partie de celles qui pourront être renseignées dans le fichier .obs quand la version 5.0 sera figée. Notons aussi que les courbes de simulation correspondant à ces 3 variables récemment introduites ne s'annulent pas à la date de récolte comme elle devraient. Cet artefact, dû à un manque de recul par rapport aux évolutions récentes du modèle, sera absent dans la version 5.0.

III.B. Amélioration de la qualité des simulations après optimisation des paramètres

III.B.1. Choix des paramètres à optimiser et du mode d'optimisation

Compte-tenu des problèmes soulevés dans le point précédent (cf. III.A.2.) nous avons décidé d'améliorer la simulation de la mise en place de l'indice foliaire. Pour ce faire, nous avons tout d'abord optimisé les paramètres DLAIMAXBRUT, STLEVAMF et STAMFLAX, ensemble, sur la variable de sortie LAI (avec les données des 2 essais) et pendant la phase LEV-DRP, l'indice foliaire excessif après ce stade n'ayant pas trop d'importance. Nous les optimisons ensemble car ils sont très liés et nous avons vu que STICS est très sensible à la place du stade AMF. Nous avons ensuite optimisé la valeur de DURVIEF, qui semblait trop importante, sur la variable de sortie LAI pendant tout le cycle. Nous supposons que ces optimisations, en améliorant la simulation du LAI amélioreront par le même coup celle de la matière sèche aérienne. Nous ne toucherons donc pas aux efficacités de conversion dont l'ordre de grandeur donné par la bibliographie semble correct.

Une fois ces paramètres de mise en place de l'indice foliaire optimisés, nous nous sommes intéressés de plus près aux paramètres AFPF et BFPF qui décident de la croissance des fruits et que nous avons eu du mal à renseigner dans un premier temps. Ils ont été optimisés sur la variable de sortie PDSFRUITFRAIS, ce qui donne à peu près le même résultat que si on les optimise sur MAFRUIT, car l'humidité est assez bien simulée.

En dernier lieu nous avons optimisé le paramètre VITPROPSUCRE, dont la valeur était visiblement trop élevée, sur la variable de sortie SUCRE, toujours à partir des deux essais.

III.B.2. Bilan de l'amélioration statistique du jeu de paramètres proposé

III.B.2.a. Stades et évolution de l'indice foliaire

La durée que nous avons affectée à STLEVAMF a été confirmée par l'optimisation qui nous proposait la même valeur. Le stade LAX a été légèrement reculé et le taux d'accroissement foliaire maximal augmenté. Les nouvelles valeurs des paramètres figurent dans le tableau récapitulatif 3.2. La durée de vie d'une feuille (en Q₁₀) a été réduite, et même si elle paraît trop courte à présent, nous allons conserver cette valeur dans l'attente de connaissances et données dont nous pourrions tirer quelque chose. La simulation de l'évolution de l'indice foliaire qui découle de ces modifications est améliorée même si elle n'est pas encore optimale (cf. figure 3.19 et 3.20 et tableau 3.3). La valeur du critère RMSE est plus proche de la limite que nous nous

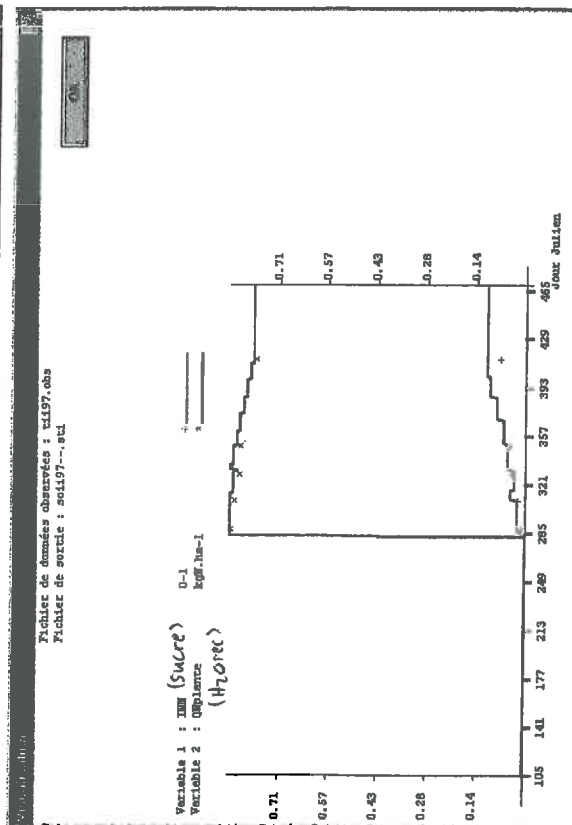
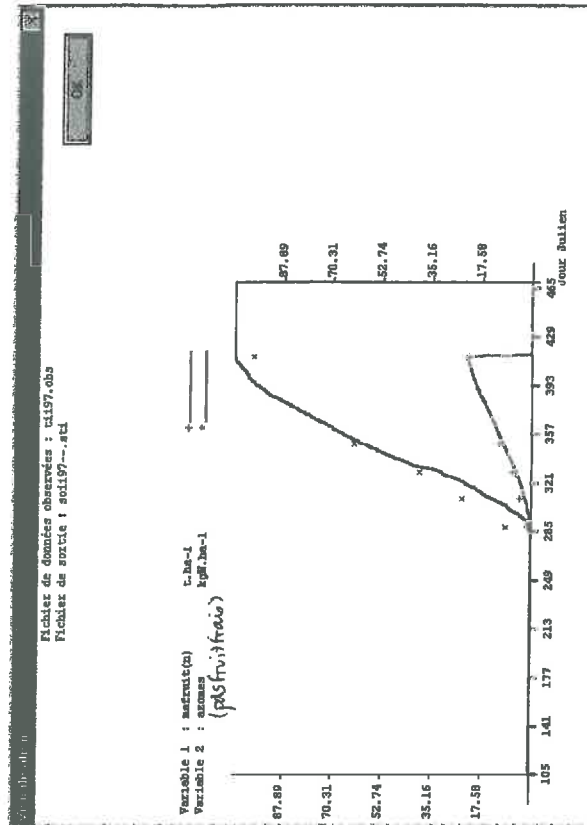
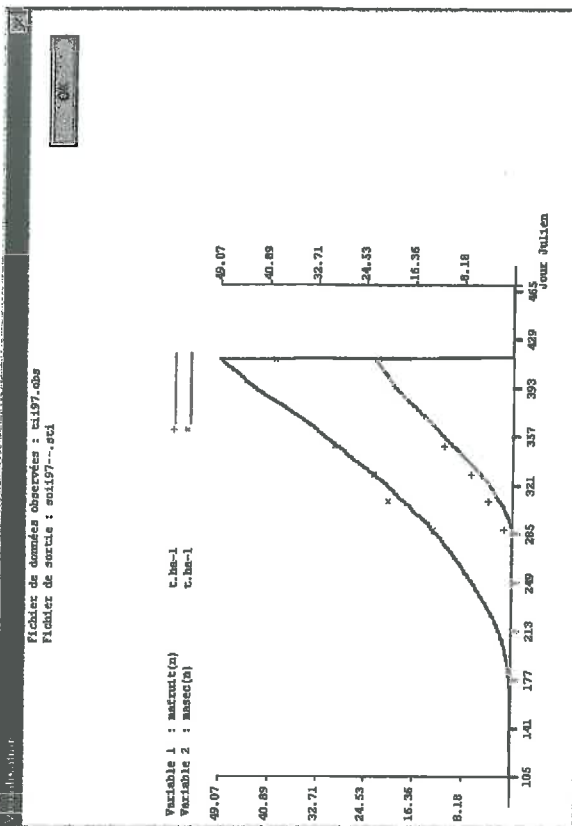
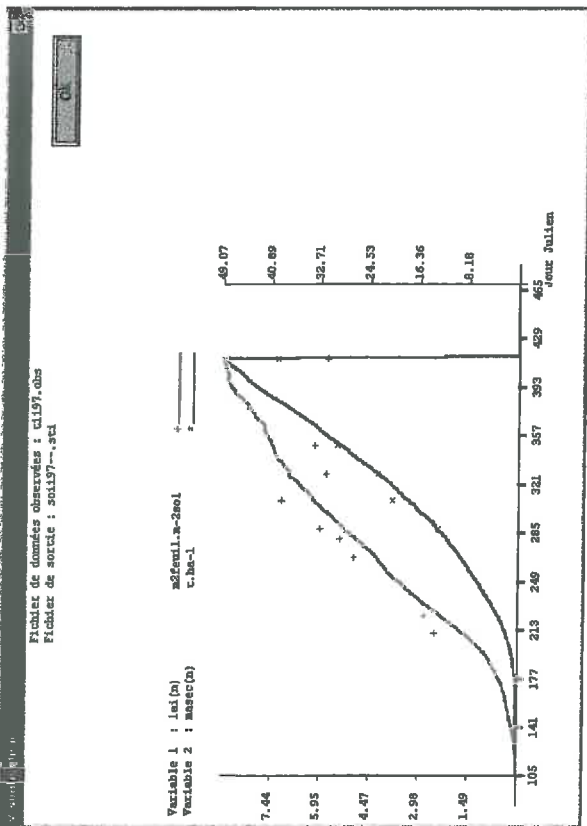


Figure 3.20 : Résultats des simulations après optimisation pour l'essai t1197

étions fixée à 1, et même inférieure pour l'essai tii97. L'indice foliaire est toujours sous-estimé en phase végétative et sur-estimé en phase de remplissage des tiges usinables mais de façon moins importante qu'avant optimisation.

III.B.2.b. Simulation de la croissance en biomasse

La simulation de la matière sèche aérienne totale est meilleure qu'avant optimisation mais la valeur du critère est toujours légèrement supérieure, pour l'essai bap99, au seuil d'acceptabilité que nous nous étions fixé à 10% de la valeur finale. Pour l'essai tii97, les simulations estiment à 4t/ha (sur une quarantaine de t/ha) près, le bon tonnage en matière sèche aérienne.

III.B.2.b. Simulation du rendement et de la qualité

Les simulations de la matière sèche et fraîche de cannes usinables ont été considérablement améliorées, ainsi que la répartition entre le nombre de cannes et leur poids, à travers l'optimisation des paramètres de la courbe logistique de croissance des fruits dans STICS. En effet le calcul du critère donne pour les variables MAFRUIT, PDSFRUITFRAIS des valeurs satisfaisantes. La RMSE calculée sur la matière fraîche de canne usinable pour l'essai à Tirano est calculée à 10% près alors que nous tolérions jusqu'à 20% d'erreur. Le nombre de cannes usinables calculé est à présent voisin de 8 tiges/m² ce qui est très satisfaisant connaissant les densités habituelles de cannes à la récolte. Leur poids individuel calculé (cf. bilan boii97o et bbap99o en annexe 10) est maintenant de l'ordre de 1000-1500g, ce qui correspond mieux à la réalité. Nous n'avons donc pas eu besoin de revenir sur le paramétrage d'AFRUITPOT, SPFRMIN et SPFRMAX.

La teneur en sucre calculée avec la nouvelle valeur du paramètre VITPROPSUCRE est d'un meilleur ordre de grandeur. Sa valeur à la récolte est correctement estimée à 2% près pour l'essai bap99 et à 3% près pour tii97 (cf. figures 3.19 et 3.20 et tableau 3.3). Cependant on remarque que dans la réalité, la teneur en sucre est déjà stabilisée avant la récolte pour l'essai à Barau, ce que STICS ne modélise pas car le calcul actuel de la teneur en sucre dans le modèle ne la fait pas plafonner. Même si les teneurs en sucre sont à peu près bien estimées, la différence notée dans les observations (cf. figure 3.15) n'apparaît pas dans les simulations. Au contraire, les différences d'humidité observées sont conservées dans les simulations.

III.B.3. Cause des écarts persistants

Finalement, les variables qui intéressent les sucriers, à savoir le rendement en cannes et leur richesse en sucre, sont assez bien simulées. La qualité de ces simulations peut toutefois encore être améliorée, en considérant des seuils plus sévères pour les critères. Avant d'être satisfait, il faut noter que les variables qui interviennent avant la mise en place des fruits sont moins bien simulées. Or l'amélioration ultérieure de la qualité des simulations de LAI et MASEC aura certainement un effet sur la simulation des variables PDSFRUITFRAIS et SUCRE qui leur sont liées par l'intermédiaire du rapport source-puits. C'est peut-être à ce moment là que la modification des valeurs des paramètres SPLAIMIN, SPLAIMAX, SPFRMIN, SPFRMAX deviendra utile pour améliorer la simulation des variables d'indice foliaire et de biomasse totale tout en conservant la qualité de celle des variables de rendement et de qualité.

Une cause possible pour la surestimation du LAI en 2^{ème} moitié de cycle est notre non prise en compte de l'effet densité qui a pour rôle dans STICS de limiter la croissance de l'indice foliaire à partir de seuils de compétition. Martiné, dans son modèle de croissance MOSICAS, prend indirectement en compte cet effet en faisant plafonner le LAI à 6, l'effet densité n'ayant que peu été étudié. Des essais sont actuellement menés à la Réunion dans le but de tester l'effet de

l'écartement entre rangs, dont les résultats pourront être intégrés à STICS une fois obtenus et analysés. Une amélioration, en parallèle, des paramètres de la sénescence foliaire permettrait, d'obtenir au final une meilleure simulation de l'évolution nette du LAI (croissance puis légère décroissance).

Quant à la sous-estimation du LAI en début de cycle, elle est peut-être due à l'effet d'un stress azoté. En effet, rappelons que nous n'avons pas désactivé les options qui font jouer les stress quand ceux-ci sont détectés. Or STICS en a détecté pour les deux essais pendant la période LEV-DRP. Ceci peut signifier deux choses :

- les essais ayant été diagnostiqués comme non stressés l'ont été un peu quand même, ce qui est possible
- le module de bilan azoté de STICS n'est pas tout à fait calibré, ce qui fait que le modèle diagnostique et applique un stress alors qu'il n'a pas joué dans les essais pour lesquels nous disposons des données
- Le paillage n'a pas été pris en compte dans les simulations faute de données sur sa qualité.

Nous pensons que ces trois aspects peuvent être en cause. Rappelons en outre que la courbe de dilution critique active dans STICS **surestime les besoins azotés de la canne à sucre** d'après Martiné (Comm. Pers., 2001). Le modèle simule donc une absorption trop importante d'azote, ce qui peut se voir dans les fichiers bilans. Ceux-ci montrent que STICS calcule une absorption d'azote par la culture de l'ordre de 450kg/ha à Barau et 385kg/ha à Tirano. Or d'après Martiné, une culture de canne absorbe de l'ordre de 300kg/ha en conditions optimales. Le fait que STICS simule une absorption trop intense doit être en cause dans l'épuisement plus rapide de l'offre en azote dans le sol et donc responsable de l'entrée en stress de la culture. En calibrant plus finement le module de bilan azoté et les **paramètres de la courbe de dilution critique**, cette sous-estimation de l'indice foliaire en début de cycle et donc de la biomasse totale qui en dépend devrait être minimisée.

Dans notre raisonnement, les conditions phytosanitaires de culture ont toujours été considérées comme optimales. Un écart de rendement par rapport au potentiel (obtenu d'après Fauconnier, (1991), sur des petites parcelles très soignées) pourrait être dû à des effets néfastes de ravageurs non diagnostiqués sur le terrain et non pris en compte par le modèle.

Enfin, les différents choix que nous avons été amenés à faire pour intégrer au mieux le fonctionnement physiologique réel et particulier de la canne à sucre en respectant la généricité du modèle ont peut-être chacun leur part de responsabilité dans les écarts. Il serait utile de tester l'idée de faire correspondre un fruit de STICS à un entre-nœud usinable (une fois les données nécessaires acquises) afin de voir si ce choix améliorerait la qualité des simulations par les changements de paramétrage qu'il induirait et leur répercussion éventuelle sur le rapport source-puits. Le test de l'option « densité racinaire vraie » que nous n'avons pas sélectionnée au profit de l'option profil optimal type, pourrait s'avérer intéressant, une fois les formalismes associés stabilisés, pour améliorer les modules de bilan entre offre et demande en nutriments.

IV. DOMAINE DE VALIDITE DE LA PARAMETRISATION, LIMITES ET PERSPECTIVES

IV.A. Aspects variétaux

Le jeu de paramètres, à l'obtention duquel nous avons travaillé tout au long de ce mémoire, nous a permis d'obtenir des résultats satisfaisants compte-tenu des objectifs que nous nous étions fixés, mais il a ses limites, en dehors desquelles il ne doit pas être utilisé, à moins de procéder à quelques modifications. Nous avons acquis sur le terrain des données relatives à la variété **R570** ; celles que nous avons conservées parmi les essais du CIRAD de la Réunion concernent uniquement cette même variété. Certes, c'est la variété la plus représentée sur l'île de la Réunion. Avant d'utiliser ce jeu de paramètres (matérialisé par nos fichiers param.par et canne.plt), pour une autre variété, il faut veiller à réestimer les paramètres supposés variétaux comme les sommes de températures nécessaires à la réalisation des différents stades, les paramètres de l'effet densité et le « potentiel de croissance des cannes ».

IV.B. Aspects agronomiques et techniques

Le cycle qui a été étudié est un **cycle de repousse**, or nous avons vu que celui-ci est différent, au moins en terme de durée, du cycle des cannes vierges. De plus, les conditions du démarrage des cannes vierges sont différentes avec un système racinaire qui n'est pas déjà en place. Les réserves d'une bouture sont du même type que les réserves des parties souterraines des cannes coupées mais la croissance du système racinaire ralentit le démarrage des parties aériennes et retarde le remplissage des tiges usinables. Des paramètres inactifs dans notre cas le deviennent pour un cycle de cannes vierges (ex : CROIRAC et PROFSEM). Les plantements de cannes vierges sont plus homogènes en répartition spatiale des tiges (pas encore trop de pertes de souches) mais moins homogènes en âge (davantage de tiges secondaires). Toutes ces considérations nous amènent à proposer l'introduction d'une option « cycle de repousse ou cycle de cannes vierges », ce qui permettrait de ne pas rendre artificiellement un jeu de paramètres adapté aux deux types de cycle. Cette option permettrait de donner différentes valeurs aux paramètres intervenant de façon spécifique dans un type de cycle sans recourir à des modifications de formalismes. Il serait possible aussi de constituer 2 fichiers plante différant sur ces paramètres.

Rappelons que notre calibration repose sur des données ayant été obtenues à partir d'un écartement entre rangs de 1,5m, et que tant que les effets de la densité ne seront pas mieux connus chez la canne, il faut être prudent avec les paramètres de la mise en place de l'indice foliaire.

IV.C. Conditions pédo-climatiques

Notre calibration a été effectuée sur des données provenant d'essais dont la gamme de variation de la température et du rayonnement ont été présentées en 2^{ème} partie (tableau 2.5). Les effets éventuels de conditions s'écartant de celles de nos essais n'ont donc pas été pris en compte mais on a vu que les données sélectionnées étaient assez représentatives de l'ensemble des sols les plus cultivés en canne et climats de la Réunion.

Conclusion

Le respect de la **généricité de STICS** d'une part et l'intégration la moins artificielle possible de la **réalité physiologique de la canne à sucre** dans STICS n'ont pas été chose facile. La première étape de l'adaptation de STICS à la canne à sucre a été rendue possible par notre étude des concepts sur lesquels reposent le modèle et des processus du fonctionnement de la plante, la plante et le modèle (version 5.0 provisoire) étant nouveaux l'un pour l'autre. La confrontation des deux a nécessité de faire des **choix** qui ont été à l'origine d'une partie de l'attribution de significations et de valeurs aux paramètres des modules de développement, de croissance aérienne et d'élaboration du rendement et de la qualité, que nous avons choisi de calibrer en priorité. D'un autre côté, la disponibilité de **données**, provenant d'essais menés dans diverses conditions pédo-climatiques de l'île de la Réunion, et acquises selon une méthodologie appliquée par nous même sur le terrain, a permis d'améliorer l'ajustement des valeurs des paramètres concernés par notre **calibration**. L'analyse de la qualité des simulations réalisées des repousses de la variété R570 a mis en relief l'**avancée de STICS-Canne** par rapport à son état initial avec l'introduction récente du concept de plante à croissance indéterminée, du découplage de la croissance et de la sénescence et du calcul de variables précisant qualitativement le rendement. En même temps, le fruit de notre travail a révélé ses limites. Une meilleure connaissance non seulement du fonctionnement des parties aériennes (effet des stress sur la croissance et la sénescence de l'indice foliaire et de la biomasse aérienne, effet de la floraison sur la teneur en sucre, si elle advient) mais aussi de la dynamique des parties souterraines, serait nécessaire. La canne à sucre a encore beaucoup de secrets, même pour les spécialistes. Gardons aussi en mémoire que l'évolution constante du modèle risque de remettre en cause notre calibration, d'où l'importance de se référer aux conditions dans lesquelles elle a été effectuée. La généralité au niveau des paramètres n'étant pas encore établie dans la version 5.0 provisoire, elle nécessitera éventuellement lors de sa fixation, de revenir sur quelques valeurs de paramètres.

Le travail que nous avons effectué à l'**interface** entre la plante entourée de son milieu et de spécialistes de son fonctionnement et le modèle à utilisations multiples et structure par conséquent contraignante, s'insère dans la démarche globale d'adaptation de STICS à la canne à sucre pour répondre à divers objectifs. Pour atteindre l'objectif agronomique de long terme qui a guidé nos travaux, une étape d'étude de l'effet du sevrage (stress hydrique en fin de cycle pour favoriser l'enrichissement en sucre) sur les priorités de répartition des assimilats, le rendement et le remplissage des tiges usinables, devra faire suite à nos travaux. La calibration des modules de STICS auxquels nous n'avons pas donné la priorité et l'évaluation du modèle en conditions non optimales seront nécessaires avant l'utilisation ultime de STICS-Canne pour simuler des scénarios d'irrigation permettant d'optimiser la récolte et l'extraction du sucre.

Bibliographie

- BALL-COELHO B., SAMPAIO E.V.S.B., TIESSEN H. and STEWART J.W.B., 1992. –Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. *Plant and Soil*, **142**, pp. 297-305.
- BISSUEL C., 2000. –Cours écophysologie végétale, DAA STPV, ENSA Rennes.
- BONHOMME R., DROUET J.L. et AMEGLIO T., 1996. –Introduction à la modélisation du fonctionnement d'un couvert, in *Actes de l'Ecole-Chercheur INRA en bioclimatologie*, tome 1, INRA, pp. 647-669.
- BOOTE K.J., JONES J.W. and PICKERING N.B., 1996. –Potential Uses and Limitations of Crop Models. *Agronomy Journal*, **88**, pp. 704-716.
- BRASSEREAU D. et FAUCONNIER R., 1970. –*La canne à sucre*, Editions Maisonneuve et Larose, Paris, 461p.
- BRISSON N. et DELECOLLE R., 1991. –Développement et modèles de simulation de culture. *Agronomie*, **12**, pp. 253-263.
- BRISSON N., BONHOMME R., AMEGLIO T., GAUTHIER H., OLIOSO A. et DROUET J.L., 1996. –Modèle de culture : simulation sous contraintes à partir d'un potentiel de croissance, in *Actes de l'Ecole-Chercheur INRA en bioclimatologie*, tome 2, INRA pp. 39-52.
- BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFFROY M.H., RUGET F., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DURR C., NICOUILLAUD B., RICHARD G., BEAUDOUIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D., CELLIER P., MACHET J.M., MEYNARD J.M. and DELECOLLE R., 1998. –STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, **18**, pp. 311-346.
- BRISSON N., 1998. –STICS-APC ou l'adaptation d'un modèle de culture pure aux cultures associées et à certaines composantes de l'agronomie tropicale. Note, 41p.+annexes.
- BRISSON N. et MARY B. (Eds.), 1999. –*STICS version 4.0 : Notice concepts et formalismes*.
- BRISSON N., 1999. –*STICS version 4.0 : Notice entrées-sorties*.
- BRISSON N. et RIPOCHE D., 1999. –*STICS version 4.0 : Notice utilisateurs*.
- BRISSON N., 2001. –Le Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standards (STICS), *Les Echos du département E.A.*, **4**, pp. 18-24.
- BRISSON N., RUGET F., GATE P., LORGEOU J., NICOUILLAUD B., TAYOT, X., PLENET D., JEUFFROY M.H., BOUTHIER A., RIPOCHE D., MARY B. and JUSTES E., 2001. –STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. II. Evaluation with comparison to actual experiment. *Agronomie*, accepté pour publication.

- BULL T.A. and GLASZIOU K.T., **1975**. –Sugar cane (chap. 3) pp. 51-72, in *EVANS L.T., Crop Physiology*, Cambridge University Press, New York, 374p.
- CHABALIER P.F., **1988**. –Les sols à la Réunion pp. 26-30, chap. L'environnement de l'agriculture Réunionnaise pp. 19-57, in *Panorama Agricole et sucrier 1978-1988 : Ile de la Réunion*, 3^{ème} congrès international de l'ARTAS du 16 au 23 octobre 1988, 200p.
- CHOPART J.L. et MARION D., **1994**. –Caractérisation au champ de l'enracinement de la canne à sucre : Application à l'élaboration d'une méthode d'évaluation de la biomasse racinaire. Rapport ATP Cirad 14/92. Note tech. Idessa 7/94RD, 28 p.
- DAGNELIE P., **1973**. –*Théorie et méthodes statistiques, application agronomique*, volume 1, Les Presses Agronomiques de Gembloux, A.S.B.L., Gembloux, 378p.
- DELECOLLE R., LOUBET B. et TCHAMITCHIAN M., **1996**. –Calibration, sensibilité et validation des modèles, in *Actes de l'Ecole-Chercheur INRA en bioclimatologie*, tome 2, INRA, pp. 285-304.
- DERBOIS C., **1988**. –L'irrigation à la Réunion pp. 31-37 chap. L'environnement de l'agriculture Réunionnaise pp. 19-57, in *Panorama Agricole et sucrier 1978-1988 : Ile de la Réunion*, 3^{ème} congrès international de l'ARTAS du 16 au 23 octobre 1988, 200p.
- FAHRASMANE L. et GANOUPARFAIT B., **1997**. –*De la canne au rhum*, INRA éditions, Paris, 104p.
- FAUCONNIER R., **1991**. –*Le technicien d'agriculture tropicale : la canne à sucre*, Editions Maisonneuve et Larose, Paris, 165p.
- GAY J.P., CHABALIER P.F., WALTER G. et POULET J.P., **1997**. Hétérogénéité, échantillonnage et estimation du poids de cannes dans une parcelle pp. 335-353, in *Communications présentées au congrès 1997*, 4^{ème} congrès international de l'ARTAS du 12 au 18 octobre 1997, La Réunion, 674p.
- GHILOUFI M., **1999**. –*Méthodologie d'adaptation de STICS à de nouvelles cultures : Application au tournesol et à la betterave à sucre*. Mémoire de DAA, INA-PG, 43p.
- HUSSON F., **2000**. –Cours statistiques et évaluation de modèles, DAA STPV, ENSA Rennes.
- INMAN-BAMBER N.G., **1991a**. –Some physiological factors affecting the optimum age and season for harvesting sugarcane. *Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association*, pp. 103-108.
- INMAN-BAMBER N.G., **1991b**. –A growth model for sugarcane based on the CERES-Maize water balance. *South African Journal of Plant & Soil*, **8**, pp. 93-99.
- INMAN-BAMBER N.G., June **1994**. –Effect of age and season on components of yield of sugarcane in South Africa. *Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association*, pp. ? ?.

- INMAN-BAMBER N.G., 1996. –Factors affecting dry matter and sucrose content of sugarcane. *Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association*, 70, p. 37.
- KEATING B.A., LIU D.L., INMAN-BAMBER N.G., ROBERTSON M.J., MUCHOW R.C. and KINGSTON G., 1994. Comparison of levels of approach in modelling sugarcane potential yield, in *Workshop on « Research and Modelling Approaches to Examine Sugarcane Production Opportunities and Constraints »*, 10-11 November 1994, St-Lucia, QLD, pp. 43-51.
- LETERME P., 2000. –Cours Introduction à la modélisation, DAA STPV, ENSA Rennes.
- LINGLE S.E., 1999. –Sugarcane, in SMITH D.L. and HAMEL C. (Eds), *Crop Yield, Physiology and Processes*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, pp. 287-310.
- MARTINE J-F., 1995a. –*Modélisation de la croissance de la canne à sucre : méthodes de mesure*, Centre Français de la Canne et du Sucre, La Réunion, 38p.
- MARTINE J-F., 1995b. –*Modélisation de la croissance de la canne à sucre*. Rapport annuel, CIRAD-Réunion, 8p.
- MARTINE J-F., 1996a. –*MOSICAS, Modèle de fonctionnement et d'élaboration du rendement canne. Paramétrage de la variété R570*, CIRAD, La Réunion, 40p.
- MARTINE J-F., 1996b. –*Modélisation de la croissance de la canne à sucre : outil de diagnostic*. Rapport annuel, CIRAD-Réunion, 5p.
- MARTINE J-F., 1997a. –Variabilité de la croissance et des potentialités de la canne à sucre à la Réunion : utilisation du modèle de croissance MOSICAS pp.353-365, in *Communications présentées au congrès 1997*, 4^{ème} congrès international de l'ARTAS du 12 au 18 octobre 1997, La Réunion, 674p.
- MARTINE J-F., 1997b. –*Modélisation de la croissance de la canne à sucre : outil de diagnostic*. Rapport annuel, CIRAD-Réunion, 10p.
- MARTINE, J.F., 1998a. –*Rapport de mission d'appui auprès de J.P. GAY CIRAD-CA-Guadeloupe dans le cadre du programme canne à sucre*, CIRAD-Réunion, 11p.
- MARTINE J-F., 1998b. –*Modélisation de la croissance de la canne à sucre : outil de diagnostic*. Rapport annuel, CIRAD-Réunion, 9p.
- MARTINE J-F., 1999. –*Modélisation de la croissance de la canne à sucre*. Rapport annuel, CIRAD-Réunion, 5p.
- MARTINE J-F., SIBAND P. and 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, pp. 3-12.
- Ministère de la Coopération, 1993. –Sugarcane, pp. 938-956, *In Memento de l'Agronome*, 1635p.

- MUCHOW R.C., SPILLMAN M.F., WOOD A.W. and THOMAS M.R., **1994**. –Radiation Interception and Biomass Accumulation in a Sugarcane Crop Grown under Irrigated Tropical Conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*, **45**, pp. 37-49.
- NICKELL. L.G., **1977**. –Sugarcane (chap. 4), in de T. ALVIM P. and KOZLOWSKI T.T., *Ecophysiology of Tropical Crops*, Academic Press, Inc, New-York, pp. 89-112.
- O'LEARY G.J., **2000**. –A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. *Field Crops Research*, **68**, pp. 97-111.
- PARFAIT A. et FAHRASMANE L., **1989**. –La filière rhum et la production cannière. *Bulletin Agronomique* (Petit Bourg, FRA), **9**, pp. 76-78.
- PASSIOURA J.B., **1996**. –Simulation models : science, snake oil, education or engineering ? *Agronomy Journal*, **88** (5), pp.690-694.
- PERRET S., **1992**. –*Etude des propriétés physiques, hydriques et mécaniques des sols andiques de la Réunion. Facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons cultureux, implications agronomiques et écologiques*. Thèse, ENSAM, 279p.
- POUZET D., CHABALIER P.F. et LEGIER P., **1997**. –Fertilité et Fertilisation des sols Réunionnais Application à la canne à sucre pp. 30-32 chap. L'environnement de l'agriculture Réunionnaise pp. 23-68, in *Panorama Agricole et sucrier 1988-1997 : Ile de la Réunion*, 4^{ème} congrès international de l'ARTAS du 12 au 18 octobre 1997, 219p.
- QUERE L., **1999**. –*Contribution à l'évaluation des modèles d'indice foliaire, de biomasse aérienne et de composantes du rendement de STICS-blé*. Mémoire de DAA, ENSA Rennes, 50p.
- RAUNET M., **1991**. –*Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion : conséquences pour la mise en valeur agricole*, CIRAD, La Réunion, 437p.
- REHM S. and EPSIG G., **1991**. –*The Cultivated Plants of the Tropics and Subtropics*, Verlag Joseph Margraf, Berlin, 552p.
- ROBERTSON M.J., MUCHOW R.C., INMAN-BAMBER N.G. and WOOD A.W., **1996**. – Relationship between biomass and sucrose accumulation by sugarcane, in WILSON J.R., HOGARTH D.M., CAMPBELL J.A. and GARSIDE A.L. (Eds), *Sugarcane : Research Towards Efficient and Sustainable Production*, CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures, Brisbane, pp. 84-86.
- ROBERTSON M.J., MUCHOW R.C. and WOOD A.W., **1999**. –A physiological basis for response of sugarcane to drying off before harvest. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.*, **21**, pp. 196-202.
- RUGET F., BRISSON N., DELECOLLE R. and FAIVRE R. –Sensitivity analysis of a crop simulation model (STICS), in order to estimate its parameters : methodology, results. Soumis pour publication à Agronomie, numéro spécial 'estimation de paramètres', en cours.
- Service Météorologique Régional de la Réunion, **1997**. –Aperçu sur la climatologie de l'île de la Réunion pp. 25-29 chap. L'environnement de l'agriculture Réunionnaise pp. 23-68, in *Panorama*

Agricole et sucrier 1988-1997 : Ile de la Réunion, 4^{ème} congrès international de l'ARTAS du 12 au 18 octobre 1997, 219p.

SINCLAIR T.R. and SELIGMAN N.G., **1996**. –Crop Modeling : From Infancy to Maturity. *Agronomy Journal*, **88**, pp. 698-704.

STICS, Réunion des 21 & 22 septembre 2000 au CIRAD Montpellier, note INRA, 70 p.

TAYOT X., RUGET F., BRISSON N., FORT J.L. et LEMAIRE G., décembre **1998**. –Un outil pour le conseil : le modèle de simulation de culture STICS. *Perspectives Agricoles*, **241**, pp. 92-97.

VAN ANTWERPEN R., MEYER J.H. and INMAN-MAMBER N.G., **1993**. –Cane root development and crop modelling. *Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association*, pp. 73-77.

VARLET-GRANCHER C. et BONHOMME R., **1979**. Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. II. Interception de l'énergie solaire par une culture. *Annales Agronomiques (FRA)* **30** (1), pp.1-26.

VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., CHARTIER M. et ARTIS P., **1981**. –Evolution de la réponse photosynthétique des feuilles et efficacité théorique de la photosynthèse brute d'une culture de canne à sucre (S.O.). *Agronomie*, **1** (6), pp. 473-481.

VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., JACOB C., ARTIS P. et CHARTIER M., **1980**. –Caractérisation et évolution de la structure d'un couvert végétal de canne à sucre. *Annales Agronomiques (FRA)*. **31** (4), pp. 429-454.

VARLET-GRANCHER C., **1982**. –Analyse du rendement de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal, Thèse, Université de Paris-Sud, centre d'Orsay, 144p.

VARLET-GRANCHER C., GOSSE G., CHARTIER M., SINOQUET H., BONHOMME R., ALLIRAND J.M., **1989**, Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, **9**, pp. 419-439.

ANNEXES

Annexe 1 : Premier paramétrage de STICS pour la canne (Brisson & Gay, 1998)

paramètre	valeur retenue			origine
codeplante	can			Jean Pierre Gay, Nadine Brisson
t0min	12			Biblio canne
t0max	30			Biblio canne
phobase	23			Biblio canne
phosat	13,5			Biblio canne
effet retard stress hydrique pré-floraison	NON			
température pilote	TCULT			Brisson et al., 1998
tgmin	12			biblio canne
stplger	60			Gay
belong	0,2178			idem maïs
celong	2,04427			idem maïs
eimax	15			Gay
laipantule	0,1			
dlaimax	0,00068			ajustement sur expérimentations CIRAD
bdens	5			Gay
tcmin	12			Gay
tcmax	42			Gay
sbv	150			ordre de grandeur
hautbase	0			ordre de grandeur
hautmax	2			ordre de grandeur
temin	12			
temax	42			
teopt	28			Gay
teoptbis	28			
msaer0	0			
efcroijuv	2,9			efcroiveg/2
efcroiveg	5,8			ajustement sur expérimentations CIRAD
efcroirepro	4			ajustement sur expérimentations CIRAD
coefmshaut	-			
extin	0,55			biblio canne
ktrou				
difol				
forme				
rapforme				
nbjgrains	70			ajustement sur expérimentations CIRAD
cgrain	0,16			ajustement sur expérimentations CIRAD
cgrainv0	0			ajustement sur expérimentations CIRAD
vitrcarb	0,003			ajustement sur expérimentations CIRAD
lmax	0,9			
vitrcart	-			
nbjgrmin	-			
nbjgrmax	-			
afruitpot	-			
dureefruit	-			
nboite	-			
allocamx	-			
alpf	-			
bfpt	-			
remobil	-			
sdrpnou	-			
vitrazo	- 0,004			ordre de grandeur
tmnremp	-			
tmxremp	-			
piotage racines par température de culture	NON			
piotage racines par température de sol	OUI			
proppfz	0,5			ordre de grandeur
zlabour	20			ajustement sur expérimentations INRA
zpenle	110			ajustement sur expérimentations INRA
zprlim	140			ajustement sur expérimentations INRA
draclong	-			
debsenrac	-			
lvfront	0,05			
psisto	12			Ozier
psiturg	5			Ozier
kmax	1			Ozier
rsmn	150			ordre de grandeur
mouillabil	1			
stemflowmax	0			
kstemflow	0			
Vmax1	0,0018			paramétrage maïs
Kmabs1	50			paramétrage maïs
Vmax2	0,017			paramétrage maïs
Kmabs2	25000			paramétrage maïs
adil	3,5			paramétrage maïs
bdil	0,37			paramétrage maïs
adilmax	5,44			paramétrage maïs
bdilmax	0,37			paramétrage maïs
masecNmax	1			paramétrage maïs
lNNmin	0,3			ordre de grandeur donné par E.Justes
légumineuse	NON			
h2oplante	0,9			Gay
h2ogmat	0,75			Gay
h2ograin	0,69			Gay
dessecgrain	2,30E-05			Gay
stlevsnms	400			ordre de grandeur
ratiosen	0,8			ordre de grandeur
tustressmin	0,7			ordre de grandeur
VARIETAL	R570	B695666	B8008	
lvc	-	-	-	
stlevamf	50	400	400	ajustement sur expérimentations CIRAD
stamflax	2100	1600	1740	ajustement sur expérimentations CIRAD
stlaxsen	500	500	500	ajustement sur expérimentations CIRAD
stsenlan	5000	5000	5000	ajustement sur expérimentations CIRAD
stlevdrp	2150	2000	2140	ajustement sur expérimentations CIRAD
stdrpmat	3000	3000	3000	ajustement sur expérimentations CIRAD
pgrainmaxi (0%)	1200	1200	1200	ajustement sur expérimentations CIRAD
adens	-0,27	-0,17	-0,13	ajustement sur expérimentations CIRAD
croitrac	0,08	0,06	0,06	ajustement sur expérimentations CIRAD

Annexe 2 : Critères statistiques disponibles pour calibrer ou évaluer le modèle STICS

- Y_{ij} Valeur observée n° i de la variable j
- \hat{Y}_{ij} Valeur simulée n° i de la variable j
- n_j Nombre d'observations de la variable j
- \bar{Y}_j Valeur moyenne de la variable j
- n Nombre de variables ayant des observations

Pour chaque variable j , on calcule:

1. L'écart moyen
$$MD_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Y}_{ij} - Y_{ij})$$

2. L'écart relatif moyen
$$RMD_j = \frac{MD_j}{\bar{Y}_j}$$

3. L'écart quadratique moyen
$$RMSE_j = \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Y}_{ij} - Y_{ij})^2}$$

4. L'écart quadratique relatif moyen
$$RRMSE_j = \frac{RMSE_j}{\bar{Y}_j}$$

5. L'écart pondéré moyen
$$MWE_j = \frac{1}{C_V} \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \left(\frac{\hat{Y}_{ij} - Y_{ij}}{Y_{ij}} \right)^2}$$

où C_V représente le coefficient de variation moyen sur les données*.

6. La droite de régression
$$\hat{Y}_j = aY_j + b$$

et le coefficient de corrélation r

7. L'efficacité du modèle
$$EF_j = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Y}_{ij} - Y_{ij})^2}{\sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Y}_{ij} - \bar{Y}_j)^2}$$

Pour l'ensemble des variables j , on calcule:

1. L'écart relatif moyen
$$RMD = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n RMD_j$$


2. L'écart quadratique relatif moyen
$$RRMSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n RRMSE_j$$

3. L'écart pondéré moyen**
$$MWE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n MWE_j$$

4. L'efficacité du modèle
$$EF = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n EF_j$$

Annexe 3 : Les fichiers sol appelés par les USM bap99 et tii97

Visualisation des paramètres



Le sol
param sol

numsol	argi	Norg	calc	conseuil	obstarac
Sol : 17	30.2	0.27	0.00	0.20	200.00
	albedo	q0	prothum	pH	ruisotru
	0.17	12.00	40.00	7.00	0.00

	epc	HCCF	HMINF	DAF	cailloux	typecailloux	infil
Horizon 1	20.0	50.5	28.3	1.08	0.00	1	50.00
Horizon 2	20.0	50.6	29.9	1.09	0.00	1	50.00
Horizon 3	20.0	49.5	29.7	1.02	0.00	1	50.00
Horizon 4	20.0	49.6	25.3	0.99	0.00	1	50.00
Horizon 5	20.0	49.6	25.3	0.99	0.00	1	50.00

cailloux macroporosité
 ammonium volatilisation sol gonflant

Recherche d'un sol


par numéro par nom

17 BarandikN

Saisie d'un nouveau sol

champs vides sol courant

Visualisation des paramètres



Le sol
param sol

numsol	argi	Norg	calc	conseuil	obstarac
Sol : 18	40.0	0.20	0.00	0.2	200.00
	albedo	q0	prothum	pH	ruisotru
	0.17	12.00	40.00	7.00	0.00

	epc	HCCF	HMINF	DAF	cailloux	typecailloux	infil
Horizon 1	20.0	43.8	28.5	1.13	0.00	1	50.00
Horizon 2	20.0	47.5	36.9	1.11	0.00	1	50.00
Horizon 3	20.0	51.0	42.2	1.11	0.00	1	50.00
Horizon 4	20.0	55.3	47.6	1.16	0.00	1	50.00
Horizon 5	20.0	55.6	47.9	1.16	0.00	1	50.00

cailloux macroporosité
 ammonium volatilisation sol gonflant

Recherche d'un sol

par numéro par nom

18 Tirbrunandik

Saisie d'un nouveau sol

champs vides sol courant

Annexe 4 : Observations CIRAD-Réunion et calculs (en grisé) pour les essais t197 et bap99

Essai	sej	LAI		MSI		nbt		MSAtot		MS		richesse en sucre		humidité
		MSiv	MSKot	MSim	nbtv	nbt	nbtim	nbtot	MSAtot	MScu	PS	MScu	richesse MScu	
t197	988.55													
t197	1081.55	2.50												
t197	1259.80	2.80												
t197	1410.20	3.50												
t197	1518.95	4.92												
t197	1576.90	5.33												
t197	1763.80	5.95	571.76	0	22.20	0	22.20	1319.76	132.89	16.30	116.59	12.27	1.84	84.97
t197	1972.55	7.12	708.62	159.85	16.10	4.40	22.50	2066.77	395.23	63.40	331.83	16.04	2.59	83.83
t197	2233.65	5.77	856.61	263.53	14.51	8.22	22.73	2309.86	696.66	148.30	548.36	21.29	3.76	82.35
t197	3139.55	6.12	646.98	361.20	12.31	10.22	22.53	2985.77	1132.31	284.80	847.51	25.15	4.54	81.94
t197	333.45	5.73	628.65	419.98	8.77	13.55	22.32	3980.87	2222.14	715.40	1506.74	32.19	7.26	77.44
bap99	600.95	0.21			8.19	0	8.19	19.40						
bap99	1035.00	0.81			17.58	0	17.58	135.10						
bap99	1558.80	3.10			21.18	0	21.18	631.00						
bap99	1995.70	4.15	429.06	162.54	11.56	10.24	21.80	1563.63	409.52	66.80	342.72	16.31	2.67	83.63
bap99	2537.75	5.06	547.09	882.90	8.34	13.31	21.66	2830.87	1282.96	414.00	868.96	32.27	7.30	77.37
bap99	3012.25	5.64	620.54	463.96	7.34	14.29	21.63	3882.40	2049.27	884.30	1164.97	43.15	11.56	73.22
bap99								2351.65	2351.65	1057.00	1294.65	44.95	11.89	73.55

Annexe 5 : L'unité de simulation tii97 et ses initialisations

Gestion des Unités de Simulation

USM disponibles :

Identificateur de la nouvelle USM :

Pour ajouter une USM :
 1) partir d'une usm existante,
 2) faire les modifications,
 3) saisir le nouvel identificateur,
 4) cliquez sur Ajouter une usm.

Fichiers sélectionnés :

Technique
 Climatique 1
 Climatique 2
 Plante
 Sol
 LAI

Choix d'un fichier

Période de simulation
 Début
 Fin

Culture sur 2 années

Sauver l'USM courante Initialisations

Ajouter une USM Supprimer une USM Annuler OK

initialisation pour démarrage en cours de culture

Démarrage à un stade

snu
 plt
 lev
 amf
 lax
 drp
 sen

Etat de la plante au démarrage

LAI0
 masac0
 Zrac0
 magrain0
 ONplants0

Initialisations sol

	Hinitf	Ninitf	densinitial
1	<input type="text" value="36.2"/>	<input type="text" value="50.0"/>	<input type="text" value="0.00"/>
2	<input type="text" value="42.2"/>	<input type="text" value="50.0"/>	<input type="text" value="0.00"/>
3	<input type="text" value="46.7"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.00"/>
4	<input type="text" value="51.5"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.00"/>
5	<input type="text" value="52.0"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="text" value="0.00"/>

OK
 Cancel
 Aide ?

* la valeur 0.0 est un code signifiant
 Hinitf=HCCF

Annexe 6 : Echantillonnage, découpe et broyage des cannes



Prélèvement d'un échantillon de 6 cannes entières de la classe III



Découpe de la canne usinable en morceaux (R570, juin 2001)



Broyage de la canne usinable (R570, juin 2001)

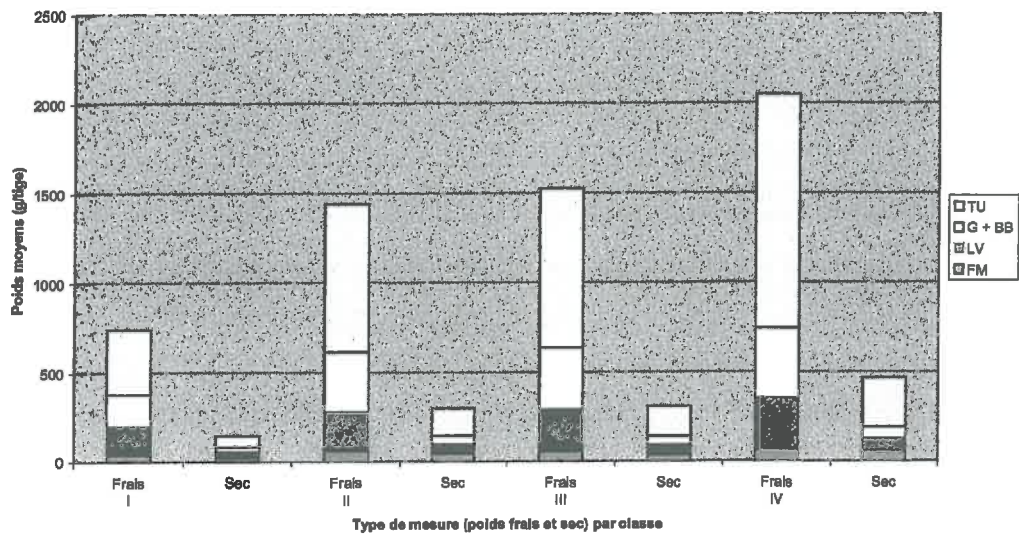
Annexe 7 : Mesures des hauteurs TVD et de canne usinable des échantillons N° et N+ prélevés

Classe N°	Tige	Classe/Tige	Hauteur TVD (cm)	Hauteur canne usinable (cm)
I (80-135)	4	I1	86	35
	8	I2	86	48
	2	I3	115	82
	1	I4	119	55
	5	I5	120	64
	6	I6	124	86
	10	I7	125	67
	7	I8	128	83
	3	I9	130	77
	9	I10	135	70
II (158-170)	1	II1	157	101
	3	II2	162	91
	9	II3	165	99
	2	II4	165	109
	5	II5	166	110
	6	II6	167	110
	7	II7	170	121
	8	II8	171	106
	4	II9	171	114
	10	II10	172	107
III (178-189)	5	III1	178	118
	4	III2	182	117
	2	III3	182	120
	6	III4	187	117
	3	III5	188	118
	1	III6	191	134
IV (200-220)	6	IV1	206	145
	3	IV2	207	137
	5	IV3	208	151
	1	IV4	209	150
	2	IV5	216	160
	4	IV6	220	165

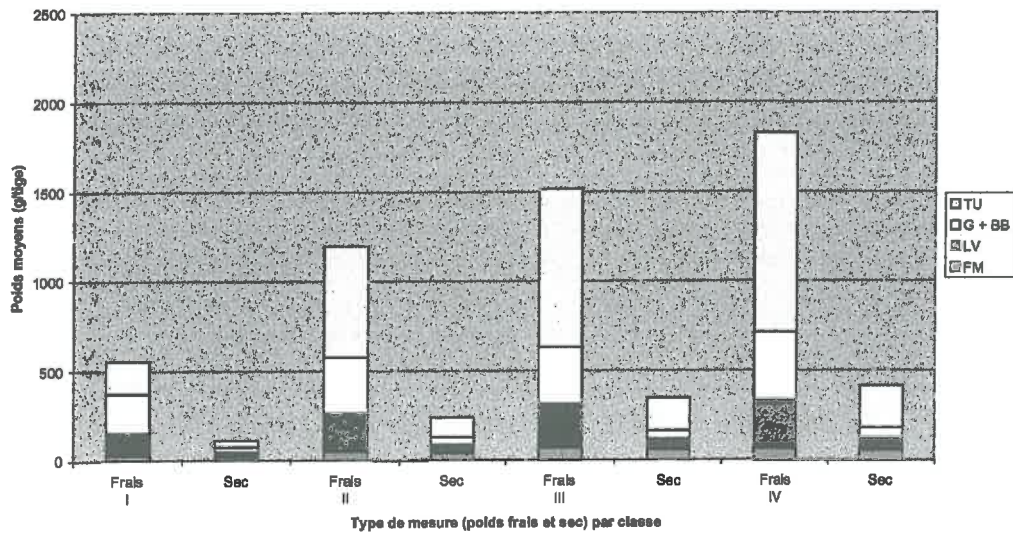
Classe N+	Tige	Classe/Tige	Hauteur TVD (cm)	Hauteur canne usinable (cm)
C1 (70-120)	2	I1	71	4
	9	I2	72	19
	7	I3	89	31
	6	I4	95	40
	3	I5	96	43
	5	I6	100	38
	1	I7	104	49
	4	I8	115	60
	10	I9	118	55
	8	I10	120	69
C2 (146-157)	10	II1	146	84
	4	II2	147	91
	2	II3	148	95
	6	II4	149	88
	8	II5	150	98
	9	II6	151	90
	1	II7	152	87
	5	II8	152	93
	7	II9	156	64
	3	II10	156	100
C3 (166-176)	2	III1	167	109
	3	III2	169	101
	4	III3	171	117
	6	III4	174	123
	1	III5	175	120
	5	III6	184	124
C4 (185-200)	3	IV1	186	128
	2	IV2	187	125
	6	IV3	188	124
	4	IV4	191	128
	1	IV5	195	139
	5	IV6	200	140

Annexe 8 : Moyennes par classe des poids des composantes de la biomasse totale fraîche et sèche des cannes prélevées

Répartition des poids des composantes dans la biomasse aérienne totale de tige selon les classes de hauteurs (Traitement N°)



Répartition des poids des composantes dans la biomasse aérienne totale de tige selon les classes de hauteurs (Traitement N+)



Annexe 9 : Sorties simulées par STICS et observations pour l'essai bap99

bap99 simul		ian	mo	jo	jul	lai(n)	masec(n)	mafruit(n)	pdsfruitrais	sucres	h2orec
(sbap99.st2)		1998	11	23	327	0.15	0.07	0	0	0	0
		1998	12	22	356	0.35	0.19	0	0	0	0
		1999	2	2	33	1.57	2.76	0	0	0	0
		1999	3	22	81	3.84	10.06	0	0.02	0.01	0.85
		1999	5	5	125	5.7	19.75	2	12.2	0.11	0.84
		1999	7	20	201	7.93	30.93	7.97	38.07	0.26	0.79
		1999	10	5	278	9.62	43.05	13.92	51.36	0.37	0.73
bap99.obs		1998	11	23	327	0.21	0.19				
		1998	12	22	356	0.81	1.35				
		1999	2	2	33	3.10	6.31				
		1999	3	22	81	4.15	15.64	4.10	25.01	0.02	0.84
		1999	5	5	125	5.06	28.31	12.83	56.70	0.07	0.77
		1999	7	20	201	5.64	38.82	20.49	76.51	0.12	0.73
		1999	10	5	278	5.64		23.52	73.50	0.12	0.89
bap99o simul		ian	mo	jo	jul	lai(n)	masec(n)	mafruit(n)	pdsfruitrais	sucres	h2orec
(sbap99o.st2)		1998	11	23	327	0.16	0.05	0	0	0	0
		1998	12	22	356	0.5	0.19	0	0	0	0
		1999	2	2	33	2	3.12	0	0	0	0
		1999	3	22	81	4.64	10.92	0.03	0.22	0.01	0.85
		1999	5	5	125	6.4	20.83	5.18	31.15	0.03	0.83
		1999	7	20	201	5.99	31.98	13.34	63.14	0.08	0.79
		1999	10	5	278	5.51	43.72	20.64	75.69	0.11	0.73

Annexe 10 : Fichiers bilans des simulations réalisées

Avant optimisation : *tii97*
 bap99

Après optimisation : *tii97o*
 bap99o

Bilan de la simulation STICS 4.0, modèle culture

1. DONNEES d'ENTREE

Fichier climatique : tirano0j.97
 Fichier techniques culturales : tii97.tec
 Fichier plante : ../cannep.plt groupe variétal: 3
 Valeurs initiales du sol : Tirbrunandik

eau (% sol sec)	NO3 (kg/ha)	NH4 (kg/ha)
36.2	50.0	5.0
42.2	50.0	6.0
46.7	.0	4.5
51.5	.0	3.3
52.0	.0	.0

Début de simulation : 15-avr-1997 jour 105.
 Fin de simulation : 23-aou-1998 jour 235 (ou 600)

Irrigation: Nombre d'arrosages= 94

date des arrosages	dose (mm)
28-avr-1997	25.
30-avr-1997	9.
16-mai-1997	28.
27-mai-1997	53.
2-jun-1997	22.
12-jun-1997	23.
20-jun-1997	11.
27-jun-1997	11.
3-jul-1997	8.
23-jul-1997	12.
24-jul-1997	12.
25-jul-1997	12.
1-aou-1997	16.
14-aou-1997	7.
18-aou-1997	11.
25-aou-1997	11.
29-aou-1997	10.
1-sep-1997	24.
5-sep-1997	18.
8-sep-1997	7.
9-sep-1997	7.
10-sep-1997	7.
11-sep-1997	7.
15-sep-1997	7.
16-sep-1997	7.
17-sep-1997	5.
18-sep-1997	4.
19-sep-1997	5.
22-sep-1997	5.
23-sep-1997	5.
26-sep-1997	9.
29-sep-1997	10.
30-sep-1997	7.
8-oct-1997	13.
9-oct-1997	12.

10-oct-1997	7.
13-oct-1997	9.
14-oct-1997	13.
15-oct-1997	13.
16-oct-1997	6.
22-oct-1997	12.
23-oct-1997	6.
27-oct-1997	10.
29-oct-1997	14.
3-nov-1997	6.
4-nov-1997	7.
5-nov-1997	6.
6-nov-1997	6.
7-nov-1997	7.
10-nov-1997	7.
11-nov-1997	8.
12-nov-1997	7.
14-nov-1997	5.
17-nov-1997	5.
18-nov-1997	5.
19-nov-1997	6.
24-nov-1997	23.
25-nov-1997	23.
27-nov-1997	22.
28-nov-1997	23.
2-dec-1997	10.
3-dec-1997	4.
8-dec-1997	14.
9-dec-1997	10.
10-dec-1997	5.
16-dec-1997	11.
17-dec-1997	5.
18-dec-1997	6.
19-dec-1997	7.
23-dec-1997	20.
26-dec-1997	18.
29-dec-1997	9.
30-dec-1997	11.
31-dec-1997	12.
3-jan-1998	10.
6-jan-1998	13.
8-jan-1998	19.
9-jan-1998	18.
11-jan-1998	23.
13-jan-1998	9.
14-jan-1998	9.
15-jan-1998	10.
16-jan-1998	9.
20-jan-1998	22.
21-jan-1998	18.
24-jan-1998	18.
25-jan-1998	18.
27-jan-1998	9.
29-jan-1998	14.
1-fev-1998	15.
2-fev-1998	18.

6-fev-1998 9.
 9-fev-1998 7.
 12-fev-1998 10.
 Quantité totale apportée: 1117. mm

Fertilisation: Nombre d'apports= 3
 date des apports N dose (kg N/ha)

 9-jun-1997 50.
 19-jun-1997 100.
 18-aou-1997 92.
 Quantité totale apportée: 242.

Résidus organiques et/ou travail du sol
 Aucun apport, aucun travail du sol

2. DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE

type : plante de jours courts
 unité de développement : photo-thermique
 température considérée : température de culture

stade	date	unités	unités cumulées d epui
-----	-----	-----	-----
s le semis			

sowing	15-avr-1997	0.	0.
stades végétatifs			
lev calcul.	23-avr-1997	107.	107.
amf calcul.	2-mai-1997	110.	217.
lax calcul.	27-aou-1997	1000.	1217.
sen calcul.	20-fev-1998	1948.	3166.
lan calcul.	20-fev-1998	0.	3166.
stades remplissage			
flo calcul.	11-oct-1997	1557.	1557.
drp calcul.	11-oct-1997	0.	1557.
mat calcul.	20-fev-1998	2150.	3707.
rec calcul.	20-fev-1998	0.	3707.

durée du cycle 310 jours
 Mode de récolte : moisson
 Récolte en fonction de la teneur en sucre

attention: pour cette simulation la date de récolte est une date butoir,
 la somme d'unités semis-récolte peut ne pas avoir été atteinte à cette date

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

Biomasse aérienne	(0 % eau)	=	48.48	t/ha
Rendement grains,fruits,	(0 % eau)	=	15.13	t/ha
Rendement grains,fruits,	(78.% eau)	=	69.84	t/ha
Nombre de grains,fruits,		=	12.	/m2
Densité de plantes		=	1.0	/m2

Poids du grain, fruit, (78.% eau) = 559.062 g
 Nombre d'inflorescences = 1.0
 Nombre de fruits non murs = 12./m2, soit un poids sec = 15.13t/ha
 Biomasse aérienne sénescence (0 % eau)= .59t/ha

Quantité N dans la culture = 383. kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits, = 344. kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = .79 % MS
 Teneur en [N] grains, fruits, = 2.28 % MS

Composition de la matière fraîche des grains/fruits

Teneur en matière sèche = 21.66 % MF
 Teneur en azote = .49 % MF
 Teneur en sucre = 36.94 % MF
 Teneur en huile = .00 % MF

Résidus pour la culture suivante : aucun

quantité = .0 t/ha C/N = 0.

4. BILANS EAU et AZOTE sur le cycle de culture

Somme ETM = 986. mm
 Somme ETR = 984. mm
 Somme ES = 109. mm
 Somme TR = 875. mm
 Somme P = 1583. mm

Réserve en eau maximale utilisée = 97. mm

Front racinaire maxi à = 100. cm

Indices moyens de STRESS :	swfac	turfac	inns	tcult-tair	exofa
phase végétative (lev-drp)	1.00	1.00	.72	.01	.00
phase reproductrice (drp-mat)	.99	.99	.99	.01	.00
dégats de gel du feuillage : avant AMF		.00	après AMF	.00	
dégats de gel des fleurs ou fruits		.00			

5. BILANS EAU et AZOTE sur toute la période de simulation (496 jours)

Jours normalisés à 30.°C Humus: 214. Résidus: 51.

ENTREES		SORTIES	
EAU (mm)			
pluie	1306.	évaporation	402.
irrigation	1117.	transpiration	875.
remontées	0.	ruissellement	0.
		infiltration profonde	1039.
		drainage agricole	0.
		interception feuille	0.
		interception mulch	81.
		irrigat non efficace	0.
Stock eau initial	519.	Stock eau final	550.
-----		-----	
TOTAL	2942.	TOTAL	2946.

AZOTE (kg/ha)

pluie	26.	exportation culture	383.
irrigation	0.	restitution culture	0.
engrais	242.	lixiviation	0.
fixation symbiot.	0.	organisation engrais	48.
minéralis. humus	144.	volat+dénit. engrais	24.
minéralis. résidus	0.	volat. amendements	0.
N plante initial	0.	dénitrification	0.
NO3 sol initial	100.	lixiviation drains	0.
NH4 sol initial	19.	NO3 sol final	77.
-----		NH4 sol final	6.
TOTAL	531.	-----	
		TOTAL	539.

Bilan de la simulation STICS 4.0, modèle culture

1. DONNEES d'ENTREE

Fichier climatique : barau00j.98
 Fichier techniques culturales : bap99.tec
 Fichier plante : ../cannep.plt groupe variétal: 3
 Valeurs initiales du sol : BarandikN

eau (% sol sec)	NO3 (kg/ha)	NH4 (kg/ha)
39.4	50.0	5.0
40.2	50.0	6.0
39.6	.0	4.5
37.4	.0	3.3
49.6	.0	.0

Début de simulation : 13-oct-1998 jour 286
 Fin de simulation : 12-oct-1999 jour 285 (ou 650)

Irrigation: Nombre d'arrosages= 0

Fertilisation: Nombre d'apports= 1

date des apports N	dose (kg N/ha)
19-oct-1998	225.
Quantité totale apportée:	225.

Résidus organiques et/ou travail du sol
 Aucun apport, aucun travail du sol

2. DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE

type : plante de jours courts
 unité de développement : photo-thermique
 température considérée : température de culture

stade	date	unités	unités cumulées d epui
s le semis			
sowing	13-oct-1998	0.	0.
stades végétatifs			
lev calcul.	25-oct-1998	95.	95.
amf calcul.	6-nov-1998	114.	209.
lax calcul.	19-fev-1999	1007.	1216.
sen calcul.	7-oct-1999	1814.	3030.
lan calcul.	7-oct-1999	0.	3030.
stades remplissage			
flo calcul.	22-mar-1999	1555.	1555.
drp calcul.	22-mar-1999	0.	1555.
mat calcul.	7-oct-1999	2150.	3705.
rec calcul.	7-oct-1999	0.	3705.

durée du cycle 358 jours
 Mode de récolte : moisson
 Récolte en fonction de la teneur en sucre

attention: pour cette simulation la date de récolte est une date butoir,
la somme d'unités semis-récolte peut ne pas avoir été atteinte à cette date

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

Biomasse aérienne (0 % eau) = 43.99 t/ha
 Rendement grains, fruits, (0 % eau) = 13.79 t/ha
 Rendement grains, fruits, (73.% eau) = 50.59 t/ha
 Nombre de grains, fruits, = 12. /m2
 Densité de plantes = 1.0 /m2
 Poids du grain, fruit, (73.% eau) = 405.962 g
 Nombre d'inflorescences = 1.0
 Nombre de fruits non murs = 12./m2, soit un poids sec = 13.79t/ha
 Biomasse aérienne sénescente (0 % eau)= 1.37t/ha

Quantité N dans la culture = 467. kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits, = 421. kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.06 % MS
 Teneur en [N] grains, fruits, = 3.05 % MS

Composition de la matière fraîche des grains/fruits

Teneur en matière sèche = 27.26 % MF
 Teneur en azote = .83 % MF
 Teneur en sucre = 37.03 % MF
 Teneur en huile = .00 % MF

Résidus pour la culture suivante : aucun
 quantité = .0 t/ha C/N = 0.

4. BILANS EAU et AZOTE sur le cycle de culture

Somme ETM = 1098. mm
 Somme ETR = 1095. mm
 Somme ES = 321. mm
 Somme TR = 774. mm
 Somme P = 2795. mm
 Réserve en eau maximale utilisée = 165. mm
 Front racinaire maxi à = 100. cm

Indices moyens de STRESS : swfac turfacs inns tcult-tair exofa
 C
 phase végétative (lev-drp) 1.00 1.00 .60 .38 .00
 phase reproductrice (drp-mat) 1.00 1.00 1.00 .00 .00
 dégâts de gel du feuillage : avant AMF .00 après AMF .00
 dégâts de gel des fleurs ou fruits .00

5. BILANS EAU et AZOTE sur toute la période de simulation (365 jours)

Jours normalisés à 30.°C Humus: 126. Résidus: 2.

EAU (mm)	ENTREES		SORTIES	
	pluie	2856.	évaporation	340.
	irrigation	0.	transpiration	774.
	remontées	0.	ruissellement	0.
			infiltration profonde	1626.
			drainage agricole	0.
			interception feuille	0.
			interception mulch	66.
			irrigat non efficace	0.
	Stock eau initial	426.	Stock eau final	482.
	-----		-----	
	TOTAL	3282.	TOTAL	3287.

AZOTE (kg/ha)				
	pluie	57.	exportation culture	467.
	irrigation	0.	restitution culture	0.
	engrais	225.	lixiviation	0.
	fixation symbiot.	0.	organisation engrais	45.
	minéralis. humus	136.	volat+dénit. engrais	23.
	minéralis. résidus	0.	volat. amendements	0.
			dénitrification	0.
	N plante initial	0.	lixiviation drains	0.
	NO3 sol initial	100.	NO3 sol final	6.
	NH4 sol initial	19.	NH4 sol final	3.
	-----		-----	
	TOTAL	537.	TOTAL	544.

Bilan de la simulation STICS 4.0, modèle culture

1. DONNEES d'ENTREE

Fichier climatique : tirano0j.97
 Fichier techniques culturales : tii97.tec
 Fichier plante : ../canne.plt groupe variétal: 3
 Valeurs initiales du sol : Tirbrunandik

eau (% sol sec)	NO3 (kg/ha)	NH4 (kg/ha)
36.2	50.0	5.0
42.2	50.0	6.0
46.7	.0	4.5
51.5	.0	3.3
52.0	.0	.0

Début de simulation : 15-avr-1997 jour 105
 Fin de simulation : 23-aou-1998 jour 235 (ou 600)

Irrigation: Nombre d'arrosages= 94

date des arrosages	dose (mm)
28-avr-1997	25.
30-avr-1997	9.
16-mai-1997	28.
27-mai-1997	53.
2-jun-1997	22.
12-jun-1997	23.
20-jun-1997	11.
27-jun-1997	11.
3-jul-1997	8.
23-jul-1997	12.
24-jul-1997	12.
25-jul-1997	12.
1-aou-1997	16.
14-aou-1997	7.
18-aou-1997	11.
25-aou-1997	11.
29-aou-1997	10.
1-sep-1997	24.
5-sep-1997	18.
8-sep-1997	7.
9-sep-1997	7.
10-sep-1997	7.
11-sep-1997	7.
15-sep-1997	7.
16-sep-1997	7.
17-sep-1997	5.
18-sep-1997	4.
19-sep-1997	5.
22-sep-1997	5.
23-sep-1997	5.
26-sep-1997	9.
29-sep-1997	10.
30-sep-1997	7.
8-oct-1997	13.
9-oct-1997	12.

10-oct-1997	7.
13-oct-1997	9.
14-oct-1997	13.
15-oct-1997	13.
16-oct-1997	6.
22-oct-1997	12.
23-oct-1997	6.
27-oct-1997	10.
29-oct-1997	14.
3-nov-1997	6.
4-nov-1997	7.
5-nov-1997	6.
6-nov-1997	6.
7-nov-1997	7.
10-nov-1997	7.
11-nov-1997	8.
12-nov-1997	7.
14-nov-1997	5.
17-nov-1997	5.
18-nov-1997	5.
19-nov-1997	6.
24-nov-1997	23.
25-nov-1997	23.
27-nov-1997	22.
28-nov-1997	23.
2-dec-1997	10.
3-dec-1997	4.
8-dec-1997	14.
9-dec-1997	10.
10-dec-1997	5.
16-dec-1997	11.
17-dec-1997	5.
18-dec-1997	6.
19-dec-1997	7.
23-dec-1997	20.
26-dec-1997	18.
29-dec-1997	9.
30-dec-1997	11.
31-dec-1997	12.
3-jan-1998	10.
6-jan-1998	13.
8-jan-1998	19.
9-jan-1998	18.
11-jan-1998	23.
13-jan-1998	9.
14-jan-1998	9.
15-jan-1998	10.
16-jan-1998	9.
20-jan-1998	22.
21-jan-1998	18.
24-jan-1998	18.
25-jan-1998	18.
27-jan-1998	9.
29-jan-1998	14.
1-fev-1998	15.
2-fev-1998	18.

6-fev-1998 9.
 9-fev-1998 7.
 12-fev-1998 10.
 Quantité totale apportée: 1117. mm

Fertilisation: Nombre d'apports= 3
 date des apports N dose (kg N/ha)

 9-jun-1997 50.
 19-jun-1997 100.
 18-aou-1997 92.
 Quantité totale apportée: 242.

Résidus organiques et/ou travail du sol
 Aucun apport, aucun travail du sol

2. DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE

type : plante de jours courts
 unité de développement : photo-thermique
 température considérée : température de culture

stade	date	unités	unités cumulées d epui
-----	-----	-----	-----
s le semis			

sowing	15-avr-1997	0.	0.
stades végétatifs			
lev calcul.	23-avr-1997	107.	107.
amf calcul.	2-mai-1997	110.	217.
lax calcul.	14-oct-1997	1366.	1583.
sen calcul.	20-fev-1998	1582.	3166.
lan calcul.	20-fev-1998	0.	3166.
stades remplissage			
flo calcul.	11-oct-1997	1557.	1557.
drp calcul.	11-oct-1997	0.	1557.
mat calcul.	20-fev-1998	2150.	3707.
rec calcul.	20-fev-1998	0.	3707.

durée du cycle 310 jours
 Mode de récolte : moisson
 Récolte en fonction de la teneur en sucre

attention: pour cette simulation la date de récolte est une date butoir,
 la somme d'unités semis-récolte peut ne pas avoir été atteinte à cette date

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

Biomasse aérienne (0 % eau) = 49.07 t/ha
 Rendement grains,fruits, (0 % eau) = 23.01 t/ha
 Rendement grains,fruits, (78.% eau) = 106.20 t/ha
 Nombre de grains,fruits, = 8. /m2
 Densité de plantes = 1.0 /m2

Poids du grain,fruit, (78.% eau) =1291.644 g
 Nombre d'inflorescences = 1.0
 Nombre de fruits non murs = 8./m2, soit un poids sec = 23.01t/ha
 Biomasse aérienne sénescente (0 % eau)= 7.89t/ha

Quantité N dans la culture = 385. kg/ha
 Quantité N dans les grains,fruits, = 346. kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = .78 % MS
 Teneur en [N] grains,fruits, = 1.50 % MS

Composition de la matière fraîche des grains/fruits

Teneur en matière sèche = 21.67 % MF
 Teneur en azote = .33 % MF
 Teneur en sucre = 11.37 % MF
 Teneur en huile = .00 % MF

Résidus pour la culture suivante : aucun
 quantité = .0 t/ha C/N = 0.

4. BILANS EAU et AZOTE sur le cycle de culture

Somme ETM = 1006. mm
 Somme ETR = 1003. mm
 Somme ES = 103. mm
 Somme TR = 901. mm
 Somme P = 1583. mm

Réserve en eau maximale utilisée = 106. mm
 Front racinaire maxi à = 100. cm

Indices moyens de STRESS :		swfac	turfac	inns	tcult-tair	exofa
c	phase végétative (lev-drp)	1.00	1.00	.70	.01	.00
	phase reproductrice (drp-mat)	.99	.99	.99	.01	.00
	dégats de gel du feuillage : avant AMF		.00	après AMF		.00
	dégats de gel des fleurs ou fruits		.00			

5. BILANS EAU et AZOTE sur toute la période de simulation (496 jours)

Jours normalisés à 30.°C Humus: 214. Résidus: 53.

ENTREES		SORTIES	
EAU (mm)			
pluie	1306.	évaporation	396.
irrigation	1117.	transpiration	901.
remontées	0.	ruissellement	0.
		infiltration profonde	1019.
		drainage agricole	0.
		interception feuille	0.
		interception mulch	82.
		irrigat non efficace	0.
Stock eau initial	519.	Stock eau final	550.
-----		-----	
TOTAL	2942.	TOTAL	2947.

AZOTE (kg/ha)

pluie	26.	exportation culture	385.
irrigation	0.	restitution culture	0.
engrais	242.	lixiviation	0.
fixation symbiot.	0.	organisation engrais	48.
minéralis. humus	144.	volat+dénit. engrais	24.
minéralis. résidus	0.	volat. amendements	0.
		dénitrification	0.
N plante initial	0.	lixiviation drains	0.
NO3 sol initial	100.	NO3 sol final	76.
NH4 sol initial	19.	NH4 sol final	6.
-----		-----	
TOTAL	531.	TOTAL	539.

Bilan de la simulation STICS 4.0, modèle culture

1. DONNEES d'ENTREE

Fichier climatique : barau00j.98
 Fichier techniques culturales : bap99.tec
 Fichier plante : ../cannep.plt groupe variétal: 3
 Valeurs initiales du sol : BarandikN

eau (% sol sec)	NO3 (kg/ha)	NH4 (kg/ha)
39.4	50.0	5.0
40.2	50.0	6.0
39.6	.0	4.5
37.4	.0	3.3
49.6	.0	.0

Début de simulation : 13-oct-1998 jour 286
 Fin de simulation : 12-oct-1999 jour 285 (ou 650)

Irrigation: Nombre d'arrosages= 0

Fertilisation: Nombre d'apports= 1

date des apports N	dose (kg N/ha)
-----	-----
19-oct-1998	225.
Quantité totale apportée:	225.

Résidus organiques et/ou travail du sol
 Aucun apport, aucun travail du sol

2. DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE

type : plante de jours courts
 unité de développement : photo-thermique
 température considérée : température de culture

stade	date	unités	unités cumulées d epui
s le semis	-----	-----	-----
-----	-----	-----	-----
sowing	13-oct-1998	0.	0.
stades végétatifs			
lev calcul.	25-oct-1998	95.	95.
amf calcul.	6-nov-1998	114.	209.
lax calcul.	25-mar-1999	1374.	1583.
sen calcul.	7-oct-1999	1443.	3026.
lan calcul.	7-oct-1999	0.	3026.
stades remplissage			
flo calcul.	22-mar-1999	1551.	1551.
drp calcul.	22-mar-1999	0.	1551.
mat calcul.	7-oct-1999	2150.	3701.
rec calcul.	7-oct-1999	0.	3701.

durée du cycle 358 jours
 Mode de récolte : moisson
 Récolte en fonction de la teneur en sucre

attention: pour cette simulation la date de récolte est une date butoir,
la somme d'unités semis-récolte peut ne pas avoir été atteinte à cette date

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

Biomasse aérienne (0 % eau) = 43.87 t/ha
 Rendement grains,fruits, (0 % eau) = 20.78 t/ha
 Rendement grains,fruits, (73.% eau) = 76.18 t/ha
 Nombre de grains,fruits, = 8. /m2
 Densité de plantes = 1.0 /m2
 Poids du grain,fruit, (73.% eau) = 969.787 g
 Nombre d'inflorescences = 1.0
 Nombre de fruits non murs = 8./m2, soit un poids sec = 20.78t/ha
 Biomasse aérienne sénescente (0 % eau)= 9.50t/ha

Quantité N dans la culture = 467. kg/ha
 Quantité N dans les grains,fruits, = 420. kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.06 % MS
 Teneur en [N] grains,fruits, = 2.02 % MS

Composition de la matière fraîche des grains/fruits

Teneur en matière sèche = 27.27 % MF
 Teneur en azote = .55 % MF
 Teneur en sucre = 11.41 % MF
 Teneur en huile = .00 % MF

Résidus pour la culture suivante : aucun

quantité = .0 t/ha C/N = 0.

4. BILANS EAU et AZOTE sur le cycle de culture

Somme ETM = 1101. mm
 Somme ETR = 1098. mm
 Somme ES = 338. mm
 Somme TR = 760. mm
 Somme P = 2795. mm

Réserve en eau maximale utilisée = 166. mm

Front racinaire maxi à = 100. cm

Indices moyens de STRESS :		swfac	turfac	inns	tcult-tair	exofa
c	phase végétative (lev-drp)	1.00	1.00	.59	.35	.00
	phase reproductrice (drp-mat)	1.00	1.00	1.00	.00	.00
	dégats de gel du feuillage : avant AMF		.00	après AMF		.00
	dégats de gel des fleurs ou fruits		.00			

5. BILANS EAU et AZOTE sur toute la période de simulation (365 jours)

Jours normalisés à 30.°C Humus: 126. Résidus: 2.

EAU (mm)	ENTREES		SORTIES	
	pluie	2856.	évaporation	356.
	irrigation	0.	transpiration	760.
	remontées	0.	ruissellement	0.
			infiltration profonde	1622.
			drainage agricole	0.
			interception feuille	0.
			interception mulch	65.
			irrigat non efficace	0.
	Stock eau initial	426.	Stock eau final	483.
	-----		-----	
	TOTAL	3282.	TOTAL	3287.

AZOTE (kg/ha)

	pluie	57.	exportation culture	467.
	irrigation	0.	restitution culture	0.
	engrais	225.	lixiviation	0.
	fixation symbiot.	0.	organisation engrais	45.
	minéralis. humus	136.	volat+dénit. engrais	23.
	minéralis. résidus	0.	volat. amendements	0.
			dénitrification	0.
	N plante initial	0.	lixiviation drains	0.
	NO3 sol initial	100.	NO3 sol final	6.
	NH4 sol initial	19.	NH4 sol final	3.
	-----		-----	
	TOTAL	537.	TOTAL	544.



Département : Sciences du Végétal

Spécialisation : Sciences et Techniques des
Productions Végétales

Enseignant responsable : Philippe LETERME

Cadre réservé à la Bibliothèque Centrale

Auteur : Pascale SMITH

Année de soutenance : 2001

Titre du mémoire : Etablissement de correspondances entre le fonctionnement physiologique de la canne à sucre et les concepts du modèle STICS. Calibration des modules de développement, de croissance aérienne, d'élaboration du rendement et de la qualité pour la variété R570

Organisme d'accueil : INRA, CIRAD (la Réunion)

Adresse complète : Unité climat, sol et environ^t,
Domaine Saint Paul, 84914 Avignon cedex9

Tél : 04 32 72 23 99

Fax : 04 32 72 23 62

Courriel : ruget@avignon.inra.fr

Maîtres de stage : Françoise RUGET, Jean-François MARTINÉ

Fonction : Chargés de recherches

Résumé : Les décideurs sucriers ont besoin d'une estimation quantitative et qualitative du rendement des parcelles de cannes dont ils tirent leur matière première. Par ailleurs, le sevrage (stress hydrique appliqué en fin de cycle) est de plus en plus pratiqué à l'île de la Réunion pour optimiser la teneur en sucre des tiges. Dans ce cadre, les modèles de culture, capables de simuler l'effet des conditions pédoclimatiques et techniques sur le développement et la croissance d'une culture, s'avèrent être des outils potentiels de prévision du rendement et d'aide à la conduite de l'irrigation. Avant de proposer à terme de répondre aux problèmes des producteurs de canne, le modèle générique et évolutif STICS, développé par l'INRA et nombre de partenaires, doit pouvoir estimer correctement la biomasse aérienne produite et ses composantes. Compte-tenu du caractère innovant de l'adaptation de STICS à la canne à sucre, l'objectif prioritaire de notre travail a été d'établir des correspondances entre les processus physiologiques impliqués dans le fonctionnement des parties aériennes d'un peuplement de canne et les formalismes stricts de STICS. Six concepts principaux ont posé problème : le démarrage du cycle, les notions de densité, de stades de développement, de fruit et de maturité et la compétition entre les organes récoltés et le feuillage. Après avoir effectué des choix dans la représentation de la canne par STICS pour attribuer des significations aux paramètres des modules concernés, nous avons ajusté leurs valeurs sur les jeux de données obtenus par le CIRAD selon une méthodologie que nous avons appliquée au suivi du cycle de la variété R570. Nous proposons finalement un jeu de paramètres caractérisant le fonctionnement des parties aériennes de cette variété en conditions optimales. Les simulations de l'indice foliaire et de la matière sèche aérienne peuvent encore être améliorées. Nous avons également proposé des explications aux écarts entre simulations et observations.

Abstract : Sugar technologists need a quantitative and qualitative estimation of the sugar cane production from which they extract their raw material. Moreover, managed water stress applied at the end of the crop cycle is a more and more current practice in Reunion Island, aiming at improving stem juice quality. In this context, crop simulation models, due to their ability to simulate the effect of climatic, soil and crop management conditions on crop development and growth, prove to be potential useful tools in predicting production level and helping farmers deal with irrigation decisions. Before answering sugar cane producers specific problems, the STICS generic model developed at INRA, must be able to accurately estimate aboveground biomass dry matter and yield components. Given the innovatory aspect of STICS's adaptation to sugar cane, the foreground objective of this study was to establish links between the complex physiological processes involved in cane shoot growth and the strict formalisms on which STICS was built. Six principal concepts needed particular attention : the plant emergence phase, the notions of plant density, developmental stages, fruit and maturity, and the competition between the harvested organs and the leaves. After making choices in the way of representing sugar cane growth with STICS in order to assign a signification to the parameters of the aerial modules, we fitted their values on data obtained by CIRAD following a methodology that we applied to above ground biomass measurements for the R570 cultivar. We finally propose a set of parameters representing the aerial parts physiology of this cultivar grown under non-stressed conditions. Leaf Area Index and aboveground simulations can be improved whereas fresh cane and sugar content simulations are quite satisfactory. We also proposed explanations for the gap between simulations and observations.

Mots clés : Canne à sucre, R570, la Réunion, processus physiologiques, modèles de simulation, STICS, paramètres

Modalités de diffusion à préciser obligatoirement au verso