ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

Ecole Doctorale ABIES
Agriculture Alimentation Biologie Environnement Santé
Agriculture Food Biology Environment Health

cirad
LA RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

(AgroParisTech)

Spécialité : Sciences agronomiques et écologiques

présentée et soutenue publiquement par

Damien SABATIER

le 13 mars 2012

Influence des facteurs agro-climatiques sur les modalités d'allocation de la biomasse produite aux différentes composantes lignocellulosiques des structures de la canne à sucre

Directeur de thèse : **Bertrand NEY**
Co-encadrement de la thèse : **Jean-François MARTINÉ**

Jury

M. Denis BASTIANELLI, Docteur, UR EMVT, CIRAD	Examinateur
M. Philippe DEBAEKE, Docteur, UMR AGIR, INRA	Rapporteur
M. Ghislain GOSSE, Docteur, Chercheur et Mérite, INRA	Rapporteur
M. William HOAREAU, Docteur, Organisme de recherches et de sélections privé, eRcane	Examinateur
M. Jean-François MARTINÉ, Docteur, UR SCA, CIRAD	Examinateur
M. Bertrand NEY, Professeur, UMR EGC, INRA-AgroParisTech	Examinateur

AgroParisTech
UMR Environnement & Grandes Cultures
1091, F-78850 Thiverval Grignon, France

RESUME

Malgré l'impact économique et les enjeux environnementaux liés à la production d'énergie renouvelable par combustion de la biomasse de canne à sucre, les systèmes de culture canniers ne sont optimisés que pour maximiser la production de sucre. Ce travail contribue à l'élaboration d'un module de simulation de l'évolution des composantes du rendement énergétique (CRE) de la biomasse de canne à sucre qui à terme servira à la conception et l'optimisation de systèmes de culture innovants visant une production multi-usages. Les deux critères retenus dans le cadre de ces systèmes de culture sont les rendements énergétique (MJ m^{-2}) et sucrier (kg m^{-2}). En préalable à la formalisation des dynamiques d'évolution des CRE (fractions anatomiques, structures et lignocelluloses) dans la biomasse de canne à sucre, l'influence de facteurs de variations agro-climatiques sur ces dynamiques d'évolution a du être testé. La vérification de cette hypothèse supposant la collecte massive de données au champ, un modèle proche infrarouge de prédiction des CRE dans la biomasse de canne à sucre a été développé. Ce modèle a permis de quantifier les CRE et de suivre leurs évolutions pour 3 cultivars de canne à sucre (R570, R579 et R585) cultivés dans des environnements contrastés (4 sites) durant deux cycles de culture (vierge et première repousse). Cette étude a révélé des différences significatives entre cycles de culture, sites, cultivars, méthodes coupe et composantes anatomiques pour les CRE et le rendement énergétique. Cependant, le rendement en biomasse aérienne de canne à sucre explique 97% de la variabilité du rendement énergétique à la récolte. La maximisation du rendement en biomasse aérienne s'avère être le principal paramètre à optimiser pour maximiser le rendement énergétique de la production. Toutefois, ces nouveaux objectifs de production peuvent être à l'origine de diminution importantes des rendements en sucre par pertes lors du procédé d'extraction. Ces antagonismes doivent être quantifiés et pris en compte dans l'évaluation de performances de système de culture tant que le sucre sera la principale source de rémunération.

Mots-clés : système de culture innovant, production multi-usages, sucre, énergie, biomasse, canne à sucre.

ABSTRACT

Impact of agro-climatic factor on sugarcane biomass partitioning in structures and lignocellulosic compounds

In spite of economical impact and environmental challenge linked to renewable energy production from sugarcane biomass combustion, sugarcane cropping system are still optimized for sucrose mass production only. This work aims to build a module for simulation of energetic yield components (CRE) of the sugarcane biomass which will be of interest in future conception and optimization of innovative sugarcane cropping system focusing on multi-uses production objectives. Both energetic yield (MJ m^{-2}) and sucrose mass (kg m^{-2}) are kept for those cropping system. However, checking effects of agro-climatic factors before to formalize the evolution of CRE of the sugarcane biomass (anatomical parts, fiber and lignocellulosic compounds) is required. In parallel a large amount of data from field study is needed. Thus we developed a near infrared model to predict CRE of sugarcane biomass samples from 3 cultivars (R570, R579 et R585) planted in 4 contrasted environments during 2 crop cycles (plat crop and first ratoon). It results from this study that there were significant differences between crop cycles, sites, cultivars, method of harvest and anatomical parts for CRE and energetic yield. Nevertheless, aboveground biomass of sugarcane explains more than 97% of the variability of energetic yield at harvest. Rise in aboveground biomass appears to be the main parameter target to reach rise in energetic yield. However, news production objective can cause important decrease in sugar extracting yield because of sugar looses during extraction process. These antagonisms must be identified, quantified and taking into account for sugarcane cropping system performance evaluation and especially as long as sucrose remains the main source of money.

Keywords : innovative cropping system, multi-uses production, sucrose, energy, biomass, sugarcane cane.

REMERCIEMENTS

Une thèse c'est avant tout une aventure, une aventure humaine, parce qu'une thèse c'est l'œuvre d'une seule personne mais le travail d'une communauté. Comme toute aventure elle est faite d'une multitude de rencontres souvent inattendues mais toujours profitables. Avant de commencer cet épanchement de remerciements et de synonymes en tous genres, je voudrais par anticipation et pour être le plus exhaustif possible, remercier tous les protagonistes que j'aurai par mégarde pu oublier de citer dans ces quelques lignes.

Je remercie en premier lieu Jean-François Martiné mon Co-encadrant sur cette thèse pour tout le soutien que tu m'as apporté tant sur le plan humain que scientifique. Je n'oublierai jamais notre première rencontre ni tous les bons moments passés au travail comme à la ville et ne te remercierai jamais assez de m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse. Ta rigueur scientifique des plus admirable et ton humeur toujours des plus joviale ont contribué à rendre cette aventure plaisante à tous les points de vues.
En second lieu je remercie Bertrand Ney mon directeur de thèse pour avoir su encadrer ce travail, malgré l'éloignement et le peu de temps qui lui a été imparti. Ton intérêt pour la recherche, ton sens aigue de la pédagogie et ta curiosité scientifique sans limite ont été les moteurs de cette thèse. Je ne te remercierai également jamais assez pour tous ce que tu m'as apporté durant cette thèse.

Je voudrais maintenant remercier l'ensemble de l'équipe du CIRAD Réunion, les nordistes de la station de recherche de la Bretagne avec une mention spéciale à Michel Jeanette et Lilian Gauvin, merci les « dalons » sans qui tout cela n'aurait pas été possible, les sudistes du 3P, les stagiaires, les VCAT, le staff d'eRcane, le Cyroi, le CRVOI, la MRST, Qualitropic, l'Université de la Réunion et le croq' midi, la Case Coco, la Case Orange et toutes les Cases qui nous ont accueilli…
Je remercie également l'ensemble de l'équipe du CIRAD de Montpellier, la station INRA d'Avignon, l'INRA d'Estrées-Mons, l'INRA de Paris-Grignon et le CRA Wallonie…

Enfin, j'aimerai pouvoir rendre hommage à chacun d'entre vous de manière singulière, mais même si comme vous je suis persuadé que les mots valent mieux que les paroles, je ne pense pas moins que je n'aurais jamais pu vous rendre en quelques mots tout ce que vous avez pu m'apporter ces trois dernières années. Et pour ça, je vous cris un grand **MERCI !!!**

Un merci tout à fait spécial, parce qu'elles le valent bien, à ma mère Venise et à ma compagne Isabelle.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 16

CHAPITRE 1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET PROBLÉMATIQUE 20

1.1. LA CANNE À SUCRE : IMPORTANCE SOCIO-ÉCONOMIQUE DE LA CULTURE ET FONCTIONNEMENT DE LA PLANTE 21
1.1.1. Généralités 21
1.1.2. Morphologie et anatomie de la plante, et topophysie de la fibre 24
1.1.3. Les composantes lignocellulosiques de la fibre 26
1.1.4. Agencement pariétal et chronologie de la biosynthèse des composantes lignocellulosiques de la fibre 28
1.1.5. Cycle et pratiques culturales 30

1.2. DE LA RÉCOLTE À LA TRANSFORMATION… 32
1.2.1. Les méthodes de récolte de la canne 32
1.2.2. Transport, paiement et transformation 33
1.2.3. La biomasse fibreuse issue de la filière sucrière 34

1.3. CARACTÉRISATION ET USAGES DE LA BIOMASSE FIBREUSE 36
1.3.1. Composition chimique de la biomasse résiduelle 37
1.3.2. Composition chimique de la bagasse 37
1.3.3. Les différents usages de la biomasse fibreuse 38

1.4. LA CANNE À SUCRE COMME CULTURE A VOCATION ÉNERGÉTIQUE ? 39
1.4.1. Définition du potentiel énergétique d'une production 39
1.4.2. La canne à sucre comme source d'énergie 41
1.4.3. Rentabilité économique du procédé de valorisation énergétique par combustion 42
1.4.4. Les antagonismes sucre / fibre 44
1.4.5. Source de variabilité de la composition chimique de la fibre 45

1.5. ÉTAT DES LIEUX DES MODÈLES DE CROISSANCE DE LA CANNE À SUCRE 48
1.5.1. Un bref historique 48
1.5.2. Fonctionnement, avantages et inconvénients 49
1.5.3. La place de la fibre en modélisation 50

1.6. PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE 51

CHAPITRE 2. MATÉRIELS & MÉTHODES 55

2.1 PLAN D'EXPÉRIMENTATIONS 55
2.1.1 Protocole experimental 55
2.1.2 Traitement des échantillons 60

2.2 MÉTHODES ANALYTIQUES 63
2.2.1 Méthode de référence : fractionnement biochimique séquentiel « Van Soest » 64
2.2.2 Méthode alternative : spectroscopie de réflexion dans le proche infrarouge (SPIR) 67

2.3 VALIDATION DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL 69
2.4 DESCRIPTION DU MODÈLE DE CROISSANCE « MOSICAS » 70
2.5 ESCRIPTION DU MODULE « STRUCTURE & QUALITÉ » INCORPORÉ AU MODÈLE DE CROISSANCE « MOSICAS » 72
2.5.1 Phénologie et conversion 74
2.5.2 Partition de la biomasse aérienne en composantes anatomiques 74
2.5.3 Partition des composantes anatomiques de la biomasse aérienne en fibre 75
2.5.4 Partition des fibres en composantes lignocellulosiques 76

CHAPITRE 3. DOSAGE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA BIOMASSE DE CANNE À SUCRE PAR SPECTROSCOPIE DE RÉFLEXTION DANS LE PROCHE INFRAROUGE 78

3A. QUALITÉ DE LA PRÉDICTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA BIOMASSE DE CANNE À SUCRE PAR SPECTROSCOPIE DE RÉFLEXION DANS LE PROCHE INFRAROUGE : INFLUENCE DE LA TAILLE DES PARTICULES D'ÉCHANTILLONS PULVÉRULENTS 79

3.1. INTRODUCTION 81
3.2. MATERIALS AND METHODS 82
3.2.1. Experimental sugarcane samples 82
3.2.2. Grinding methods 82
3.2.3. Chemical analysis 83
3.2.4. Spectra collection 83
3.2.5. Optimization of calibration method 84
3.2.6. Validation of calibration method 85

3.3. RESULTS AND DISCUSSION 85
3.3.1. Chemical composition of sugarcane samples 86
3.3.2. Spectral variability 87
3.3.3. Optimization of calibration method 90
3.3.4. Validation of calibration method 92

3.4. CONCLUSIONS 94

CHAPITRE 3B. MISE AU POINT D'UN MODÈLE DE PRÉDICTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA BIOMASSE DE CANNE À SUCRE PAR SPECTROSCOPIE DE REFLEXION DANS LE PROCHE INFRAROUGE : COMPARAISON DE MÉTHODES DE VALIDATIONS CROISÉES CLASSIQUE ET INDEPENDANTE 95

3.5. INTRODUCTION 97
3.6. MATERIALS AND METHODS 98
3.6.1. Experimental sugarcane samples 98

3.7. RESULTS AND DISCUSSION 103
3.7.1. Sugarcane samples 103
3.7.2. Calibration and cross-validation 105
3.7.3. Validation 112

3.8. CONCLUSIONS 117

CHAPITRE 4. ÉLABORATION DES RENDEMENTS ENERGÉTIQUE ET SUCRIER DE LA BIOMASSE DE CANNE À SUCRE EN CONDITIONS CLIMATIQUES ET CULTURALES CONTRASTÉES 119

4A. DÉFINITION ET ESTIMATION DES VARIABLES CONSTITUTIVES DU RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE DE LA BIOMASSE DE CANNE À SUCRE ET LEUR VARIABILITE À LA RÉCOLTE 120

4.1. INTRODUCTION 122
4.2. MATERIALS AND METHODS 124
4.2.1. Field experiment 124
4.2.2. Sampling and treatment 126
4.2.3. Biochemical fractionation and prediction by NIRS 126
4.2.4. Calculation of energetic potential 127
4.2.5. Statistical analysis 128

4.3. RESULTS 128
4.3.1. Climatological conditions and irrigation 128
4.3.2. Dry aboveground biomass – yield 129
4.3.3. Dry aboveground biomass – partitioning 129
4.3.4. Dry aboveground biomass – energy 140

4.4. DISCUSSIONS 142
4.4.1. Variability of yield 142
4.4.2. Variability of energetic quality characteristics of components 142
4.4.3. Factors affecting energy characteristics and energetic potential (Ep)? 143

4.5. CONCLUSION 146

4B. VARIABILITÉ DE LA RÉPARTITION EN COMPOSANTES ANATOMIQUES DE LA BIOMASSE AÉRIENNE ET DE LEUR TENEUR EN COMPOSÉS LIGNOCELLULOSIQUES AU COURS DU CYCLE DE CULTURE DANS LES DIFFÉRENTES SITUATIONS 147

4.6. PARTITION DE LA BIOMASSE AÉRIENNE VERS SES COMPOSANTES ANATOMIQUES 147
4.6.1. Partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable 147
4.6.2. Partition de la biomasse aérienne en biomasse des autres composantes anatomiques 148

4.7. PARTITION DES COMPOSANTES ANATOMIQUES VERS LA FIBRE 150
4.7.1. Partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre 150
4.7.2. Partition de la biomasse des autres composantes anatomiques en biomasse de fibre 152

4.8. PARTITION DE LA FIBRE DES COMPOSANTES ANATOMIQUES VERS LES COMPOSANTES LIGNOCELLULOSIQUES 153
4.8.1. Partition de la biomasse de fibre en biomasse d'hémicellulose 153
4.8.2. Partition de la biomasse de fibre en biomasse de cellulose 154
4.8.3. Partition de la biomasse de fibre en biomasse de lignine 158

4.9. ÉVOLUTION DU POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE ET SUCRIER DE LA PRODUCTION SELON DIFFÉRENTS IDÉOTYPES 161
4.9.1. Définition des profils de production 165
4.9.2. Caractérisation de l'effet site *vs*. profils de production 165
4.9.3. Caractérisation des cultivars *vs*. profils de production 166

4.10. ELEMENTS DE DISCUSSION SUR LES FACTEURS DE VARIATIONS 167
4.10.1. Partition de la biomasse aérienne en biomasse decomposantes anatomiques 167
4.10.2. Partition de la biomasse des composantes anatomiques en biomasse de fibre 167
4.10.3. Partition de la biomasse de fibre en biomasse de composantes lignocellulosiques 168
4.10.4. Potentiel énergétique et sucrier de la production 169

CHAPITRE 5. CONCEPTION D'UN MODULE DE SIMULATION DES COMPOSANTES DU RENDEMENT ENERGÉTIQUE 170

5A. VALIDATION DU CHOIX DU MODELE ET CALAGE DU NOUVEAU MODULE DE PARTITION DE LA BIOMASSE AÉRIENNE : EQUATIONS ET PARAMÈTRES 171

5.1 VALIDATION DE LA PRÉCÉDENTE VERSION DU MODELE « MOSICAS » SUR LES DONNÉES OBSERVÉES DANS NOS ESSAIS 171
5.1.1 Sur la biomasse aérienne 171
5.1.2 Sur la partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable 173

5.2 DESCRIPTION DU NOUVEAU MODULE DE PARTITION : PARAMÈTRES ET ÉQUATIONS 173
5.2.1 Somme de température à l'apparition de la tige usinable 173
5.2.2 Partition de la biomasse aérienne en composantes anatomiques 174
5.2.3 Partition des composantes anatomiques vers la fibre 176
5.2.4 Partition de la biomasse de fibre vers les composantes lignocellulosiques 178

5.3 CALAGE DU NOUVEAU MODULE DE PARTITION INCLUT DANS LE MODÈLE « MOSICAS » 183

5B. VALIDATION DU NOUVEAU MODULE DE PARTITION DE LA BIOMASSE AÉRIENNE SUR UN JEU DE DONNÉES INDEPENDENT **186**

5.4 VALIDATION DU NOUVEAU MODULE DE PARTITION DE LA BIOMASSE AÉRIENNE SUR UN JEU DE DONNÉES INDEPENDANT **186**
5.4.1 Estimation de la biomasse aérienne (dAB) **186**
5.4.2 Estimation du taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable (MS) **187**
5.4.3 Estimation de la biomasse de tige usinable (MS) **187**
5.4.4 Estimation du taux de partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre (NDFMS) **188**

DISCUSSION GÉNÉRALE, CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES **189**

6.1. RAPPELS : CADRE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE **189**
6.2. ACQUIS, LIMITES ET PERSPECTIVES RELATIFS À CES TRAVAUX **190**
6.2.1. La granulométrie des échantillons à prédire a t'elle un effet sur les capacités prédictives d'un modèle PIR ? **190**
6.2.2. Mise au point d'un modèle PIR de prédiction des variables constitutives du rendement énergétique d'échantillons de biomasse de canne à sucre : validation croisée classique *vs*. indépendante **191**
6.2.3. Modalités et déterminisme de la répartition des variables constitutives du rendement sous l'effet de facteurs de variation agro-climatiques **193**
6.2.4. Modélisation des dynamiques d'évolution des variables constitutives du rendement énergétique de la biomasse de canne à sucre **199**

6.3. CONCLUSIONS **203**

RÉFÉRENCES

ANNEXES

GLOSSAIRE

Abréviation	Définition	Unité
ADF	Acid Detergent Fiber	g $100g^{-1}$
ADL	Acid Detergent Lignin	g $100g^{-1}$
ADS	Acid Detergent Soluble	g $100g^{-1}$
aNDF	Neutral Detergent Fiber ayant subit un traitement à l'α-amylase	g $100g^{-1}$
aNDFom	Neutral Detergent Fiber ayant subit un traitement à l'α-amylase et corrigé des cendres	g $100g^{-1}$
Ash_{ADF}	Taux de cendres du résidu ADF	g $100g^{-1}$
Ashi	Taux de cendres des différentes composantes anatomiques	g $100g^{-1}$
Ash_{NDF}	Taux de cendres du résidu NDF	g $100g^{-1}$
CELNDFGB	Fraction de cellulose dans la fibre des limbes verts	g $100g^{-1}$
CELNDFMS	Fraction de cellulose dans la fibre des tiges usinables	g $100g^{-1}$
CELNDFTR	Fraction de cellulose dans la fibre des feuilles mortes	g $100g^{-1}$
CELNDFTS	Fraction de cellulose dans la fibre des méristèmes	g $100g^{-1}$
Ci	Fraction de la biomasse aérienne en composantes anatomiques	g $100g^{-1}$
dAB	Biomasse aérienne sèche	g m^{-2}
dHOLNDFAB	Biomasse d'holocellulose de la biomasse aérienne sèche	g m^{-2}
dHOLNDFMS	Biomasse d'holocellulose des tiges usinables	g m^{-2}
dLIGNDFAB	Biomasse de lignine de la biomasse aérienne sèche	g m^{-2}
dLIGNDFMS	Biomasse de lignine des tiges usinables	g m^{-2}
dMS	Biomasse sèche des tiges usinables	g m^{-2}
dNDFAB	Biomasse de fibre de biomasse aérienne sèche	g m^{-2}
dNDFMS	Biomasse de fibre des tiges usinables	g m^{-2}
dNDFTR	Biomasse de fibre des feuilles mortes	g m^{-2}
dSUGMS	Biomasse de carbohydrates non structuraux des tiges usinables	g m^{-2}
dTR	Biomasse sèche de feuilles mortes	g m^{-2}
Ep	Potential énergétique	MJ m^{-2} y^{-1}
ETP	Evapotranspiration potentielle	mm
fAB	Biomasse aérienne fraîche	g m^{-2}
fTR	Biomasse fraîche de feuilles vertes	g m^{-2}
fGB	Biomasse fraîche de limbes verts	g m^{-2}
fGL	Biomasse fraîche de feuilles vertes	g m^{-2}
fGS	Biomasse fraîche de gaines vertes	g m^{-2}

fLE	Biomasse fraîche de feuilles totales (vivantes + mortes)	g m^{-2}
fMS	Biomasse fraîche de tiges usinables	g m^{-2}
fST	Biomasse fraîche de tiges	g m^{-2}
fTS	Biomasse fraîche de méristèmes	g m^{-2}
GB	Fraction de limbes verts dans la biomasse aérienne	g $100g^{-1}$
GS	Fraction de gaines vertes dans la biomasse aérienne	g $100g^{-1}$
HEMNDFGB	Fraction d'hémicellulose dans la fibre de limbes verts	g $100g^{-1}$
HEMNDFGS	Fraction d'hémicellulose dans la fibre de gaines vertes	g $100g^{-1}$
HEMNDFMS	Fraction d'hémicellulose dans la fibre de tiges usinables	g $100g^{-1}$
HEMNDFTR	Fraction d'hémicellulose dans la fibre de feuilles mortes	g $100g^{-1}$
HEMNDFTS	Fraction d'hémicellulose dans la fibre de méristèmes	g $100g^{-1}$
HOLNDFMS	Fraction d'holocellulose dans la fibre de tiges usinables	g $100g^{-1}$
HOLNDFTR	Fraction d'holocellulose dans la fibre de feuilles mortes	g $100g^{-1}$
LCCij	Fractions des $j^{ème}$ composantes lignocellulosiques dans les $i^{ème}$ composantes anatomiques	g $100g^{-1}$
LHVj	Valeur chalorifique inférieure des $j^{ème}$ composantes lignocellulosiques	MJ kg^{-1}
LIGNDFABa	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse de lignine dans la fibre de la biomasse aérienne	
LIGNDFABb	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse de lignine dans la fibre de la biomasse aérienne	g $100g^{-1}$
LIGNDFABk	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse de lignine dans la fibre de la biomasse aérienne	
LIGNDFGB	Fraction de lignine dans la fibre de limbes verts	g $100g^{-1}$
LIGNDFGS	Fraction de lignine dans la fibre de gaines vertes	g $100g^{-1}$
LIGNDFMS	Fraction de lignine dans la fibre de tiges usinables	g $100g^{-1}$
LIGNDFTR	Fraction de lignine dans la fibre de feuilles mortes	g $100g^{-1}$
LIGNDFTS	Fraction de lignine dans la fibre de méristèmes	g $100g^{-1}$
MSa	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse de tiges usinables	
MSk	Paramètre utilisé pour estimer l'âge thermique des tiges usinables	
NDFAB	Fraction de fibre dans la biomasse aérienne	g $100g^{-1}$
NDFABa	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse de fibre de la biomasse aérienne	
NDFABb	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse de fibre de la biomasse aérienne	g $100g^{-1}$

NDFABk	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse de fibre de la biomasse aérienne la fibre	
NDFGB	Fraction de fibre dans la biomasse de limbes verts	g $100g^{-1}$
NDFGS	Fraction de fibre dans la biomasse de gaines vertes	g $100g^{-1}$
NDFi	Fraction de fibre des $i^{ème}$ composantes anatomiques	g $100g^{-1}$
NDFMS	Fraction de fibre dans la biomasse de tiges usinables	g $100g^{-1}$
NDFMSa	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse de fibre de tiges usinables	
NDFMSb	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse de fibre de tiges usinables	g $100g^{-1}$
NDFMSk	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse de fibre de tiges usinables	
NDFTR	Fraction de fibre dans la biomasse de feuilles mortes	g $100g^{-1}$
NDFTS	Fraction de fibre dans la biomasse de méristèmes	g $100g^{-1}$
NDSol	Neutral Detergent Solubles	g $100g^{-1}$
PAR	Rayonnement photosynthétique actif	MJ m^{-2}
PARi	Rayonnement photosynthétique actif incident	MJ m^{-2}
PCI	Potentiel calorifique inférieur	MJ kg^{-1}
PCS	Potentiel calorifique supérieur	MJ kg^{-1}
pMS	Initiation de la partition de la biomasse aérienne en tiges usinables	°j
TR	Fraction de feuilles mortes dans la biomasse aérienne	g $100g^{-1}$
TRa	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse sénescente	
TRb	Paramètre utilisé pour estimer la biomasse sénescente	
TS	Fraction de méristèmes dans la biomasse aérienne	g $100g^{-1}$
TTAB	Age thermique de la culture	°j
TTMS	Age thermique de la tige usinable	°j
TVD	*Terminal Visible Dewlap* ou dernier ochréa visible	sans
WGC	*Whole Green Cane* ou canne entière en vert	g m^{-2}

INTRODUCTION

L'avènement de l'ère industrielle et les développements technologiques qui l'ont accompagné ont pu être réalisés au prix de l'exploitation et d'une consommation effrénée des ressources fossiles. Le premier choc pétrolier survenu en 1973 a permis une prise de conscience de l'intérêt que représente la diversification des sources d'énergies primaires. Aujourd'hui, au-delà de la volonté d'accéder à une moindre dépendance énergétique, le changement climatique à l'échelle de la planète, est une des plus importantes problématiques environnementales à laquelle est confrontée l'humanité (Berndes et al., 2003). Demain, la pénurie programmée des principales ressources fossiles engendrera, et engendre déjà, une hausse du coût des énergies et un accroissement de la demande en bioénergies et bioproduits. La valorisation de la biomasse, comme source d'énergie primaire et de matière première pour l'élaboration de biomatériaux et l'extraction de molécules chimiques plateformes ou synthons[1] sont des alternatives prometteuses. Le terme biomasse comprend ici les différents matériaux d'origines biologiques comme le bois, les plantes herbacées, et les résidus issus de l'agriculture et de l'agroalimentaire (Trebbi, 1993). Il apparaît que la biomasse est une ressource dont le potentiel est encore largement sous utilisé avec plus de 60% de la production mondiale qui n'est pas valorisée (Demirbas, 2001). Or, la biomasse est considérée comme la source d'énergie renouvelable qui a le plus grand potentiel pour contribuer aux besoins énergétiques de la société moderne des pays industrialisés et en développement à travers le monde (Demirbas et al., 2009).

L'usage énergétique de la biomasse de canne à sucre a pris une dimension économique considérable ces dernières années (Cheavengetti et al., 2011) et représente une alternative concrète à l'usage de combustibles fossiles. La canne à sucre (*Saccharum sp.*), poacée tropicale en C4, est largement plébiscitée car elle présente les caractéristiques d'une culture à fort potentiel bioénergétique (Goldemberg et al., 2008 ; Waclawovsky et al., 2010 ; Vermeris, 2011). Elle affiche un bilan énergétique positif et une efficience photosynthétique ainsi que des rendements annuels en biomasse supérieurs aux autres cultures (Klass et al., 1998). Par ailleurs, elle possède des systèmes intégrés optimisés (production, transport et transformation) déjà présents sur de nombreux sites de production (Rein et al., 2007). De plus, de la récolte à la transformation il est possible d'obtenir jusqu'à 8 produits et coproduits pouvant

[1]Synthons : briques élémentaires à partir desquelles il est possible de synthétiser, par recombinaison chimique, d'autres molécules plus complexes

potentiellement être utilisés comme sources de matières premières renouvelables pour l'alimentation humaine et animale, l'extraction de bioproduits ou de molécules chimiques élémentaires, l'élaboration de biomatériaux, ou la production de bioénergies (Almazan et al., 1998). Il devient donc indispensable de mieux la valoriser.

L'International Energy Agency (IEA) a initié un accord sur les bioénergies en 1978 avec pour but d'améliorer la coopération et l'échange d'informations entre les pays ayant un programme national de recherche, de développement et de déploiement des bioénergies. Depuis 1978, les techniques de production des cultures à vocation énergétiques ont significativement progressées et de nombreux projets ont été initiés pour évaluer les potentialités énergétiques de la biomasse dans les six plus grandes zones territoriales au monde[2] (Wright, 2006).

En France, une démarche globale de valorisation de la biomasse dans les Département d'Outre Mer (DOM), approuvée par le Gouvernement, a été initiée suite aux Etats Généraux de l'Outre Mer. Le Grenelle de l'Environnement et le Comité Interministériel de l'Outre Mer ont mis l'accent sur le développement endogène et l'autonomie énergétique de ces territoires (Dupre, 2011) fortement dépendant de sources énergétiques exogènes.

A la Réunion, DOM producteur de canne à sucre, la filière "canne à sucre" produit essentiellement du sucre mais a été également pionnière en matière de valorisation énergétique de la biomasse. Successivement en 1992 et 1995, la mise en service de deux centrales thermiques a permis de valoriser par combustion le principal coproduit généré par le procédé d'extraction du sucre à l'échelle industrielle, la bagasse. Cette valorisation devenait nécessaire car la bagasse représente une part non négligeable de la biomasse avec environ 30% de la production (CTICS Réunion). La production d'énergie à partir de la bagasse occupe une place majeure dans l'actuel « mix » énergétique (hydroélectrique, éolien, solaire, biogaz,…) de l'île de la Réunion. Sa valorisation par combustion génère 11% de la production électrique annuelle de l'île, l'hydroélectrique 20% et les autres sources 2% (ARER, 2009).

Dans le cadre de l'adoption de la Loi d'Orientation pour l'Outre-Mer (LOOM) en décembre 2000 et du Plan énergétique Régional pluriannuel de prospection et d'exploitation des Energies Renouvelables et d'Utilisation Rationnelle de l'Energie (PRERURE) en 2005,

[2] Chine, Union Européenne, Etats-Unis, Brésil, Canada et Australie.

plusieurs projets et programmes ont vu le jour sous l'impulsion du projet gouvernemental Green Energy Revolution Reunion Island (GERRI) : le projet "STratégie d'Autosuffisance énergétique pour la Relance et la Transition de l'Economie Réunionnaise" (STARTER), le projet "Canne Fibre" et le "Schéma Directeur Biomasse Energie" proposé par l'Agence Régionale Energies Réunion (ARER). Tous ayant pour but commun de définir les perspectives de consommation et de production d'énergie, les gisements de biomasse disponibles et de favoriser leur valorisation (Dupre, 2011).

Dans ce contexte dynamique et innovant, la principale ambition de l'Etat et des collectivités locales est de faire de l'île de la Réunion un territoire autonome sur le plan énergétique (transport, électricité et stockage) à l'horizon 2030. Stratégiquement, pour répondre à court terme à cette volonté forte et compte tenu du savoir faire réunionnais en termes de production agricole et de valorisation de la biomasse, l'augmentation de la production de bioénergie passera obligatoirement par (i) l'augmentation des rendements de biomasse de canne, (ii) une meilleure valorisation des coproduits issus de la filière canne à sucre et (iii) une diversification des usages de ces coproduits (Dupre, 2011).

L'accroissement des rendements de biomasse de canne ou de certaines de ses composantes va nécessiter la mise au point d'un panel de systèmes de culture complexes. Ces systèmes devront combiner des objectifs de production multiples dont le sucre et les bioénergies. Le sucre reste l'objectif de production majeur voire encore exclusif de la filière canne à sucre néanmoins, la production d'énergie par valorisation de la biomasse de canne devrait prendre une importance croissante. Les systèmes de culture actuels devront donc être profondément modifiés pour être adaptés aux nouveaux objectifs de production, aux voies de valorisation ciblées (combustion, gazéification, éco-extraction…), aux conditions environnementales prédominantes et aux choix techniques (cultivars, dates de plantation et de récoltes, intrants…) pouvant être mis en œuvre dans les principaux bassins de production de l'île. Les nouveaux systèmes de culture devront également être, pour répondre efficacement aux nouveaux objectifs de production, flexibles et adaptables aux fluctuations des prix des marchés générées par un contexte socio-économique en constante évolution (prix de l'énergie *vs.* prix du sucre en particulier).

Cependant, un préalable nécessaire à la conception et l'optimisation de systèmes de culture innovants visant une production multi-usages (sucre/énergie) est la quantification des effets des facteurs agronomiques (cultivars et longueur de cycle) et climatiques (cycle et site)

sur les critères définis par ces nouveaux objectifs de production. Les deux critères retenus dans le cadre de ces systèmes de culture sont les rendements énergétique (MJ m^{-2}) et sucrier (kg m^{-2}). La quantification des effets des facteurs agro-climatiques sur les composantes du rendement énergétique (CRE) et sucrier à savoir la production de biomasse aérienne et les modalités d'allocation de ses composantes anatomiques (tiges, feuilles,…), métabolique (sucres), structurale (fibre) et lignocellulosiques (hémicellulose, cellulose et lignine), apparaît nécessaire. Or, si le fonctionnement de la canne à sucre a été largement décrit pour la production de biomasse aérienne et de sucre, et leur prédiction tentée par des modèles écophysiologiques de croissance (Liu and Kingston, 1995 ; Inman-Bamber et al., 1995 ; Keating et al., 1999 ; Martiné et al., 2003), les modalités d'allocations de la biomasse aérienne de canne à sucre vers la fibre et ses composantes lignocellulosiques n'ont quant à elles très peu ou pas été explorées (Rein et al., 2007).

La problématique de cette thèse concerne donc l'élaboration du rendement énergétique et sucrier de la canne à sucre, à travers les modalités d'allocation des CRE et du sucre dans la biomasse aérienne en lien avec les conditions environnementales prédominantes et les pratiques culturales réalisables.

Le procédé de valorisation par combustion (cogénération[3]) étant le plus couramment utilisé par la filière sucrière pour produire de l'énergie sous forme d'électricité, le premier objectif de cette thèse est *de facto* l'identification et l'étude de la variabilité des CRE de la biomasse de canne à sucre. Cet objectif supposait une collecte massive de données, concernant les CRE, au champ. Nous avons donc mis au point une technique de dosage indirecte par spectroscopie dans le proche infrarouge des CRE dans la biomasse de canne à sucre. Cette mise au point constitue le troisième chapitre de la thèse, et a fait l'objet de deux articles publiés. Cet apport méthodologique a permis de suivre l'évolution des CRE de différents cultivars de canne à sucre dans des environnements contrastés au cours de deux cycles de culture consécutifs (chapitre 4). Le cinquième et dernier chapitre concerne la conception d'un module de simulation de l'évolution des CRE de la biomasse de canne à sucre.

[3] Cogénération : production simultanée de vapeur d'eau et d'électricité par combustion de la biomasse.

CHAPITRE 1.
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET PROBLEMATIQUE

CHAPITRE 1. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ET PROBLEMATIQUE

Ce chapitre a pour vocation d'éclairer le lecteur sur différents éléments clés de la production de canne à sucre, de la plante et de ses usages. Nous avons vu que le contexte socio-économique a moyen terme favorise la production de sucre dans la filière, mais que la valorisation énergétique des coproduits joue et jouera un rôle probablement déterminant pour la production d'énergie renouvelable. Cette partie bibliographique mettra donc l'accent sur la formation de la valeur énergétique des coproduits obtenus après extraction du sucre. La valeur énergétique est calculée à partir de la répartition massique des composantes anatomiques dans la biomasse aérienne et de leur composition en fibre, hémicellulose, cellulose et lignine dont on suppose qu'elle est variable entre composantes anatomiques, cultivars, pratiques et contextes édaphiques. Les outils servant à prédire les valeurs "sucrière" et "énergétique" seront également analysés.

1.1. LA CANNE A SUCRE : IMPORTANCE SOCIO-ECONOMIQUE DE LA CULTURE ET FONCTIONNEMENT DE LA PLANTE

1.1.1. Généralités

1.1.1.1. Importance socio-économique

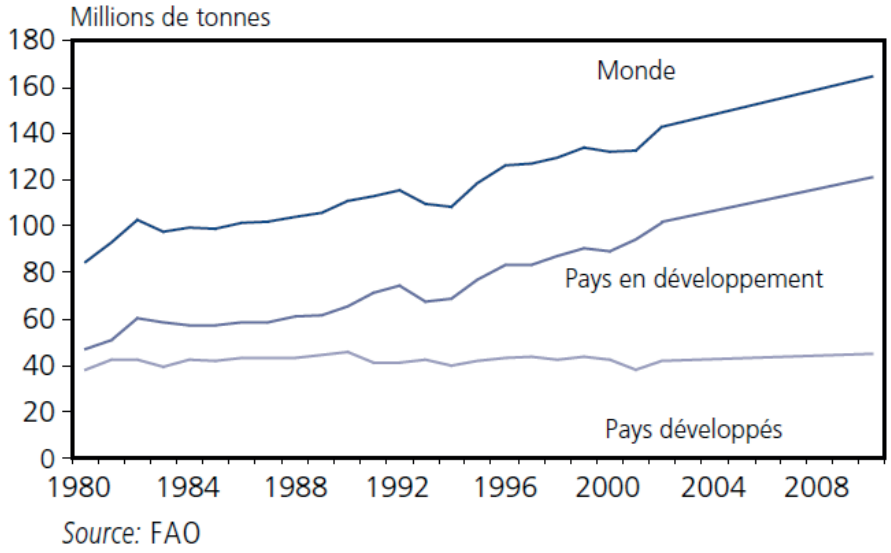
Sur la campagne 2009/2010 la production mondiale de sucre atteint 162,2 millions de tonnes (124,9 millions pour la canne à sucre et 37,3 millions pour la betterave) soit une augmentation de 6,5% par rapport à la précédente campagne. Sur un pas de temps plus long on notera qu'en moins de 30 ans la production mondiale de sucre a été multipliée par 2. L'augmentation de la production mondiale de sucre est essentiellement due à l'augmentation de la production de sucre de canne notamment dans les pays en développement (Figure 1.1).

Cette augmentation progressive est le reflet de la hausse des revenus et de l'évolution des modes de consommation alimentaire. Les pays en développement consomment actuellement plus de 60% de la production mondiale de sucre et c'est dans ces pays – surtout en Asie – que l'accroissement de la demande sera le plus fort (Appui de la FAO aux négociations de l'OMC, 2011). Si l'exportation du sucre est cruciale car elle génère des capitaux, la canne à sucre présente d'autres intérêts pour la croissance économique de pays en développement (voir § 1.2).

Tableau 1.1 Les 10 premiers pays producteurs de canne à sucre en 2010 (FAOSTAT).

Pays producteur	Surfaces récoltées (Mha/an)
Brésil	8,51
Inde	4,42
Chine	1,71
Pakistan	1,03
Thaïlande	0,93
Mexique	0,71
Cuba	0,43
Indonésie	0,42
Philippine	0,40
Australie	0,39

Figure 1.1 Production de sucre



1.1.1.2. Taxonomie et génomique

La canne à sucre *Saccharum* spp. est une Poacée pérenne à cycle photosynthétique en C4 qui se propage généralement par voie végétative (sauf le passage par voie sexuée dans un schéma de sélection classique). La canne à sucre est classée dans le groupe *Saccharum*, que l'on appelle également « *Saccharum complex* », et qui est composé par des espèces et des genres inter fertiles de la tribu des *Andropogoneae*. Le groupe *Saccharum* comprend avec la canne à sucre dite noble (*Saccharum officinarum*), des espèces de cannes de types sauvages comme *Saccharum spontaneum*, *Saccharum robustum,* ainsi que d'autres genres comme *Miscanthus* ou *Erianthus*.

Les espèces du groupe *Saccharum* présentent des niveaux de ploïdie élevés (i.e. polyploïdes) et sont souvent caractérisés par leur aneuploïdie. Le nombre de chromosomes des espèces du groupe *Saccharum* varie de 2n = 36 à 2n = 170 avec 10 chromosomes chez *Saccharum officinarum* contre 8 chez *Saccharum spontaneum* (D'Hont et al., 1995; D'Hont et al. 1996; Cesnik et Miocque, 2004; Nobrega et Dornelas, 2006). Les variétés modernes de canne à sucre cultivées (cultivars) sont des hybrides de *Saccharum officinarum* dont une partie du patrimoine génétique provient des espèces du groupe *Saccharum* et plus couramment de *Saccharum spontaneum* (Dillon, 2007). Le genre *spontaneum* est intéressant pour ses caractéristiques agronomiques (taux de fibre élevé et fort tallage). En effet, certaines variétés plus fibreuses en collection peuvent atteindre voire dépasser les 40 % de matière sèche alors que les variétés sucrières plafonnent généralement à 30 % de matière sèche dans les tiges.

Des études récentes (Piperidis et D'Hont, 2001; D'Hont, 2005) ont montré que les génomes des hybrides modernes sont composés par 10 à 20% de chromosomes provenant de *S. spontaneum*, par 5 à 17% de chromosomes recombinants et le reste des chromosomes provenant de *S. officinarum*. La variabilité génétique de la teneur en fibre de la plante paraît être très importante. Ainsi, les possibilités d'accroissement de la production de fibre sont possibles à court terme par le choix variétal et à moyen et longs termes par la création variétale.

1.1.1.3. Zone de culture et extension géographique

La canne à sucre est cultivée dans toutes les régions tropicales et subtropicales du monde de part et d'autre de l'équateur jusqu'à des latitudes d'environ 35°N et 35°S (van Dellewijn, 1960). La température est le principal facteur limitant l'implantation de la canne à sucre dans des zones d'altitude ou de latitudes plus élevées car le gel est létal pour la plante.

Toutefois, elle peut être cultivée dans des zones marquées par des hivers froids et d'autres espèces appartenant au même genre botanique comme le *Miscanthus* sont elles cultivées en zones tempérées. Burner et al., (2008) constatent d'ailleurs que des hybrides F1 issus de croisements entre les genres *Saccharum* sp. et *Miscanthus sinensis* sont plus tolérants au froid que les hybrides entre *Saccharum* sp. et *Saccharum spontaneum*. L'intégration des caractéristiques de tolérances au froid sont intéressantes pour étendre la zone d'expansion de la canne à sucre vers les zones tempérées (Lam et al., 2009).

1.1.2. Morphologie et anatomie de la plante, et topophysie de la fibre

La majeure partie des connaissances sur la structure morphologique de la canne à sucre et la répartition des fibres dans la tige et les feuilles ont été synthétisées par van Dillewijn, 1960 et Clements, 1980.

1.1.2.1. Les tiges

Les tiges portent les feuilles et sont constituées de plusieurs entre-nœuds successifs séparés par des nœuds. Au niveau de chaque nœud se situe un bourgeon ainsi que des *primordia* radiculaires qui peuvent respectivement donner naissance à de nouvelles tiges et des racines. Les différents tissus que l'on rencontre de la périphérie de la tige de canne à sucre, à son centre sont les suivants :

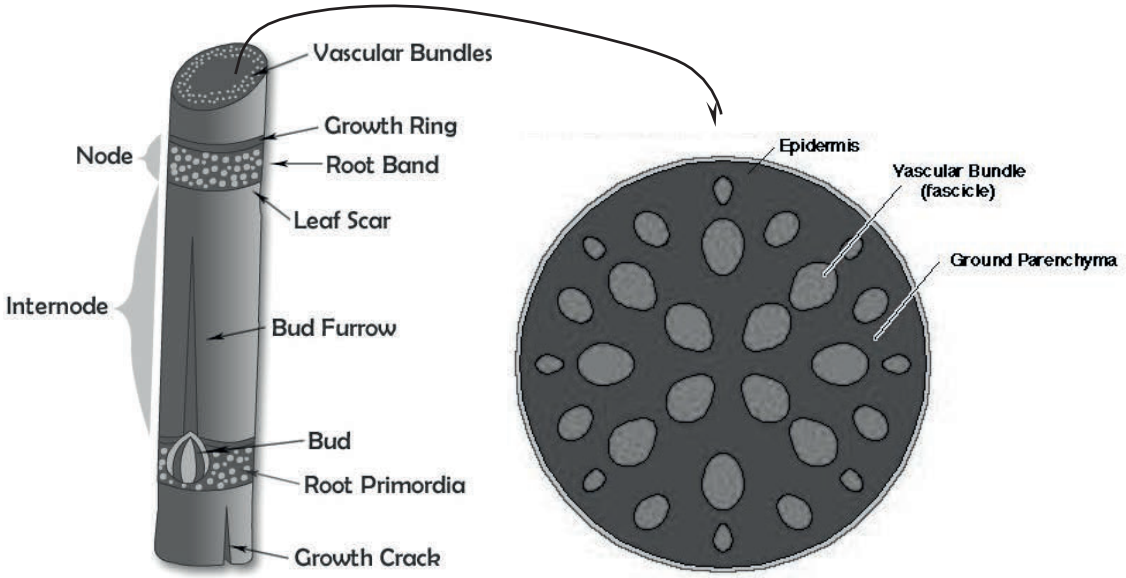
- un épiderme avec une couche cireuse recouvrant une mosaïque de cellules siliceuses courtes et de cellules subéreuses allongées;
- deux rangées de cellules lignifiées qui donnent la résistance à la tige. Les faisceaux libéroligneux de la périphérie sont souvent jointifs et forment un anneau continu;
- des faisceaux fibro-vasculaires très denses et petits en périphérie. Leurs nombres diminuent, leurs espacements et leurs tailles augmentent de la périphérie vers le centre de la tige.

Cet ensemble, spécifiquement le dernier type de tissus, est baigné dans un parenchyme vivant, qui assure avec le phloème les fonctions de stockage, notamment des sucres, et de distribution de la sève élaborée (Dinant, 2008). Ce parenchyme est le constituant principal de la moelle (*pith*) par opposition à l'écorce de la tige (*rind*). Les faisceaux, qui constituent les fibres, sont en disposition parallèle dans l'entre-nœud. Ces faisceaux se ramifient ou se courbent au niveau des nœuds, pour aller alimenter les feuilles, les *primordia* radiculaires et les bourgeons. Les fibres sont concentrées dans la partie périphérique de la tige au niveau de l'écorce. En effet, la masse linéaire de fibre est plus élevée à l'extérieur que dans la partie centrale de la tige. Cette masse linéaire augmente également du sommet de la tige vers sa base. Le phénomène est directement lié à une augmentation du diamètre du manchon de sclérenchyme vasculaire. La dureté des tiges est quant à elle directement liée à la répartition des faisceaux vasculaires, leur nombre, la taille de la gaine sclérenchimateuse entourant les faisceaux et au taux variable de lignification des cellules intervasculaires.

1.1.2.2. Les feuilles

Les feuilles, simples et alternées, sont composées d'une gaine enveloppant la tige et d'un limbe, tous deux reliées par une articulation appelée « *ochrea* ». Le nombre de feuilles vivantes par tiges est d'environ 10. Lorsque la feuille a terminé sa croissance le limbe peut mesurer jusqu'à 1,5 m de long pour une surface moyenne de l'ordre de 0,05 m² (Martiné et al., 2003). Les deux composantes anatomiques formant la feuille sont constituées de tissus ayant des fonctions propres et étant organisés de manières bien distinctes.

Figure 1.1 Anatomie et histologie des tiges de canne à sucre (Merriam-Webster, Inc 2006)



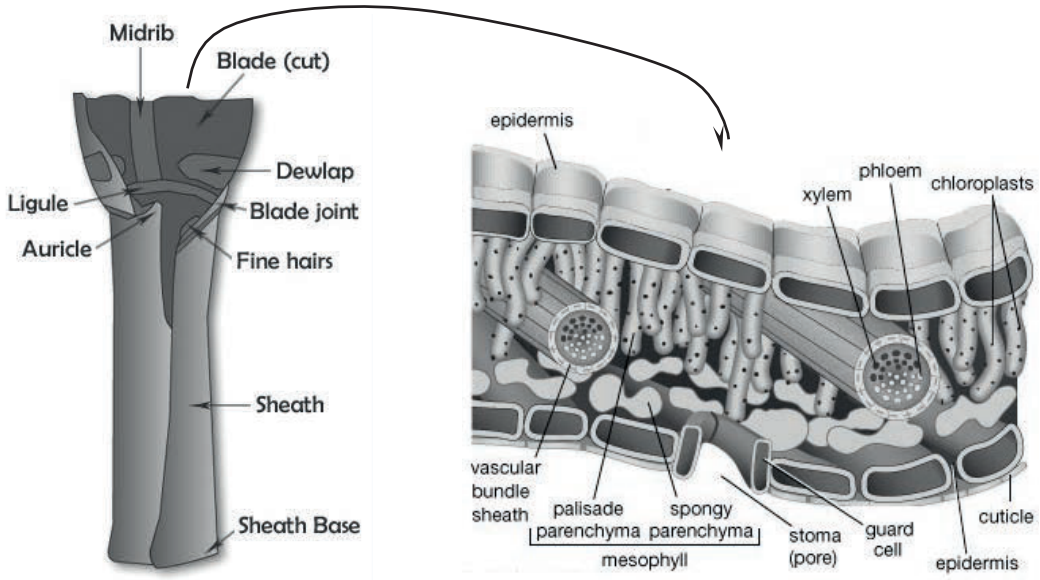
à gauche la tige : node = nœud, internode = entre-nœud, vascular bundles = faisceaux vasculaires, growth ring = anneau de croissance, root band = anneau racinaire, leaf scar = cicatrice foliaire, bud furrow = fourreau du bourgeon, root primordia = primordia racinaire, growth crack = fente de croissance ; **à droite une coupe transversale de la tige** : epidermis or rind = épiderme, ground parenchyma or pith = parenchyme de réserve.

La gaine est composée de faisceaux fibro-vasculaires disposés en lignes radiales et immergés dans un parenchyme. Chaque faisceau est entouré par un manchon sclérenchymateux qui est un continuum des faisceaux de la tige. Au centre des faisceaux fibro-vasculaires on retrouve les vaisseaux du xylème et du phloème.

Le limbe est constitué de faisceaux vasculaires de trois dimensions : les petits faisceaux sont situés près de l'épiderme inférieur et par couple autour des grands faisceaux qui sont eux situés au centre du limbe tout comme les faisceaux de taille moyenne. Tous les faisceaux sont

regroupés sur la face inférieure du limbe. On notera que la dureté de la nervure médiane, liée à son niveau de lignification, est un caractère variétal (Pouzet, 2011). L'épiderme du limbe est différent de celui de la tige avec la présence de cellules siliceuses, de liège et de stomates formant des bandes alternées (van Dillewijn, 1960).

Figure 1.2 Anatomie et histologie des feuilles de canne à sucre (Merriam-Webster, Inc 2006)



à gauche la feuille : ligule = ligule, auricule = auricule, midrib = nervure centrale, blade = limbe, dewlap = ochréa, blade joint = jointure du limbe, fine hairs = poils, sheath = gaine, sheath base = base de la gaine ; **à droite une coupe transversale du limbe** : epidermis = épiderme, xylem = xylème, phloem = phloème, chloroplasts = chloroplastes, vascular bundle sheath = gaine des faisceaux vasculaire, palisade parenchyma = parenchyme pallissadique, spongy parenchyma = parenchyme lacuneux, mesophyll = mésophylle, stoma = stomate, guard cell = cellule de garde, cuticle = cuticule.

1.1.3. Les composantes lignocellulosiques de la fibre

Les principales composantes de la fibre sont deux polymères glucidiques, la cellulose et l'hémicellulose, et un polyphénol, la lignine. Ainsi on parlera par la suite de composantes lignocellulosiques de la fibre (Figure 1.4).

1.1.3.1. La cellulose

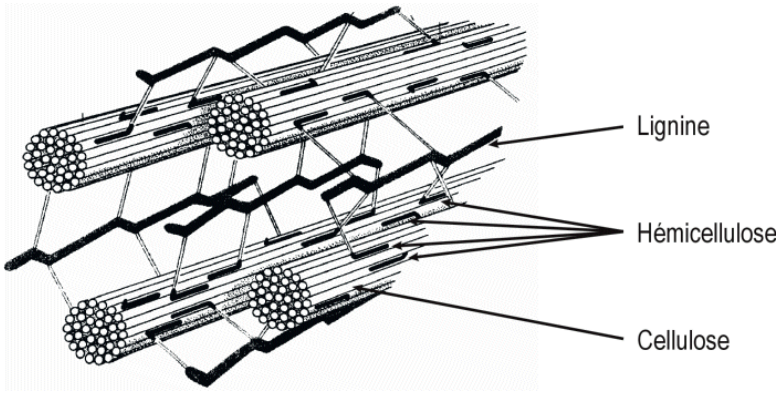
La cellulose est le constituant principal des parois cellulaires des plantes et représente la substance naturelle la plus abondante de la biosphère. La cellulose est une macromolécule

linéaire constituée presque exclusivement de molécules de glucose reliées entre elles par des liaisons β 1-4. Deux molécules de glucose ainsi reliées (dimère de glucose) constituent un motif cellobiose dont le nombre permet de calculer le degré de polymérisation de la molécule de cellulose. On considère que la cellulose de bagasse est constituée de 2000 à 3000 unités de cellobiose (Setty et al., 1995). A l'état natif les chaines de cellulose sont orientées en arrangement parallèle et leur empilement forme des microfibrilles. Cette structure fibrillaire est la conséquence des nombreux groupes hydroxyles qui créent des ponts hydrogènes inter et intra moléculaires lui conférant une stabilité structurelle et une insolubilité dans l'eau.

1.1.3.2. Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des composés amorphes, qui constituent un vaste groupe de polyholosides hétérogènes constitués majoritairement de pentoses (xylose et arabinose), de quelques hexoses (glucose, mannose, galactose et rhamnose) et d'une faible proportion d'acides uroniques (galacturonique et glucuronique). Les hémicelluloses sont des polymères de faible poids moléculaire, solubles en milieu alcalin et acide. Elles ont une architecture complexe formée par un axe central sur lequel se greffent des chaînes latérales plus ou moins développées et branchées. D'après Pessoa et al. (1997), les pentoses composant les hémicelluloses de la bagasse de canne à sucre sont majoritairement du D-xylose (50 à 70 %) et du L-arabinose (5 à 15 %). Les hémicelluloses des poacées jouent un rôle particulier dans la réticulation des fibres car elles ont la particularité d'être liées chimiquement entre elles et aux lignines conférant à la structure une résistance beaucoup plus grande aux dégradations. Les hémicelluloses sont également reliées à la cellulose, mais par des liens non covalents qui sont des liaisons hydrogènes ou hydrophobes de type van der Waals. Ainsi, les hémicelluloses des plantes constituent la partie la plus accessible de la fibre à la biodégradation.

Figure 1.3 Organisation structurelle des composantes lignocellulosiques de la paroi cellulaire



1.1.3.3. La lignine

La lignine est un polyphénol qui constitue la seconde substance naturelle la plus abondante de la biosphère après la cellulose. Elle représenterait environ 30% du carbone organique de la biosphère. La lignine n'est présente que dans les plantes vasculaires. Bien que très importantes, les lignines sont encore mal connues car elles présentent des structures complexes et aléatoires qui rendent problématiques leurs caractérisations par des voies chimiques traditionnelles.

1.1.4. Agencement pariétal et chronologie de la biosynthèse des composantes lignocellulosiques de la fibre

Les parois cellulaires végétales sont des structures dynamiques qui représentent des déterminants clés de la croissance et du développement des plantes et de leurs réponses aux conditions environnementales et aux stress induits (Farrokhi et al., 2006). Elles sont principalement constituées par les trois composantes lignocellulosiques précédemment décrites.

Les trois composantes lignocellulosiques sont synthétisées sur des sites cellulaires différents et à des périodes différentes de la vie de la cellule (Catesson, 1980 ; Buchanan et al., 2000). Les carbohydrates sont les premiers synthétisés et les lignines ne se forment que très peu en début de la vie de la cellule. Ce n'est qu'à la fin de la vie de la cellule qu'elles sont synthétisées en grande quantité et selon une intensité variable en fonction du type de tissu.

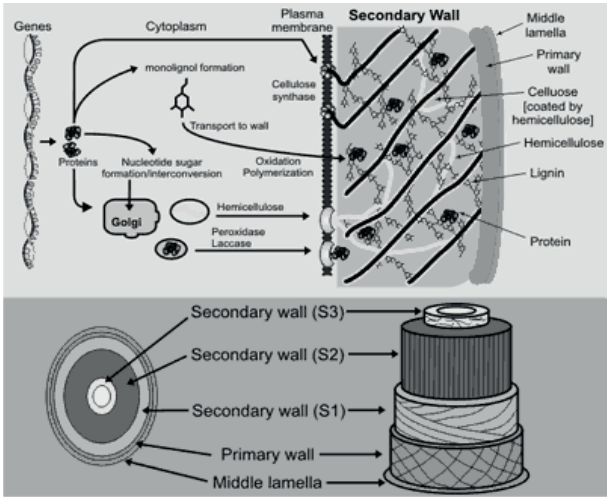
Les parois cellulaires sont au nombre de trois avec de l'extérieur vers l'intérieur de la cellule la lamelle moyenne, la paroi primaire et les trois couches (S1, S2 et S3) de la paroi secondaire (Figure 1.5).

La lamelle moyenne et la paroi primaire sont les premières synthétisées. La paroi secondaire est la dernière à être synthétisée et n'apparaît que lorsque la cellule a achevé sa croissance.

1.1.4.1. La lamelle moyenne

La lamelle moyenne constitue la partie commune entre les cellules et représente un ciment cellulaire. Elle est principalement composée de pectines hydrophiles et de protéines. La lamelle moyenne est imprégnée de lignine en fin de vie des cellules particulièrement à proximité des tissus conducteurs et de soutien. Elle est alors à l'origine des regroupements des fibres en faisceaux.

Figure 1.5 Biosynthèse et organisation schématique de la paroi cellulaire (Copyright © Nature Publishing Group, 2005)



1.1.4.2. La paroi primaire

La paroi primaire commence à se former en début de vie de la cellule. Elle est constituée d'une matrice d'hémicelluloses et de pectines, en association avec de nombreuses protéines et des composés phénoliques, combinés avec des microfibrilles de cellulose. La paroi primaire est très hydratée (90% d'eau). Elle protège la membrane plasmique en lui conférant une extensibilité qui permet à la cellule de croitre et de contenir la pression de turgescence. Pendant la phase de croissance cellulaire les dépôts de lignines sont très faibles et le processus de lignification intervient principalement au cours de la formation de la paroi secondaire.

1.1.4.3. La paroi secondaire

La paroi secondaire commence à se former lorsque la croissance cellulaire est achevée. Elle est constituée d'une matrice compacte d'hémicellulose située autour de microfibrilles de cellulose. Cet ensemble peu hydraté (20% d'eau ou moins) s'imprègne ensuite de lignine. La paroi secondaire est beaucoup plus épaisse que la paroi primaire et représente environ 60% du volume de paroi cellulaire. Elle confère à la cellule une résistance mécanique et s'oppose aux transferts hydriques. Le dépôt de lignine le plus important intervient lors de la formation de la dernière couche (S3). Toutefois, des synthèses de lignine *de novo* peuvent intervenir en réponse à des stress subis par la plante (Vance et al., 1980).

1.1.5. Cycle et pratiques culturales

Les systèmes de culture canniers commerciaux sont dits semi-pérennes (Cheavegatti et al., 2011) puisqu'ils sont établis sur un temps assez long, qui varie généralement de 6 à 7 ans.

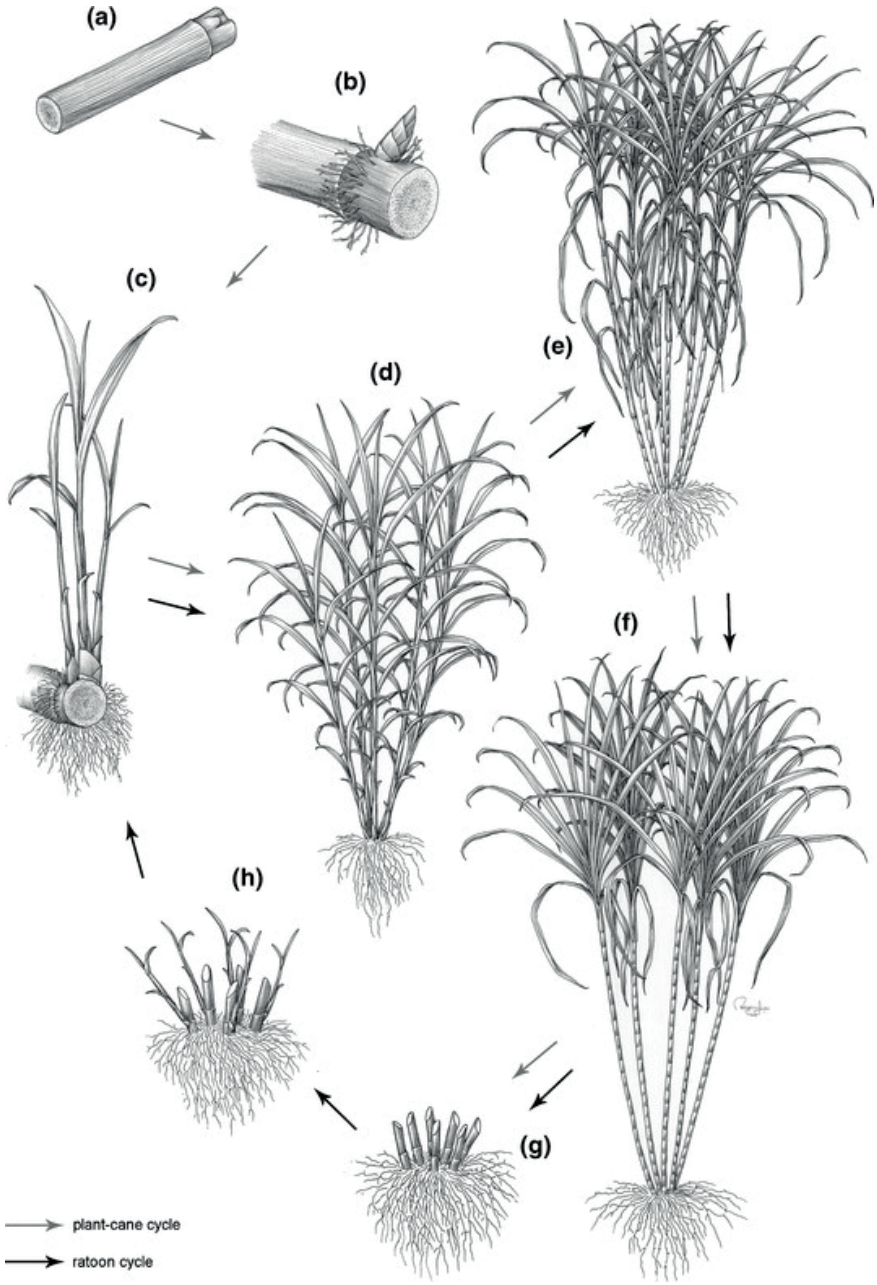
La plantation est l'opération qui débute le cycle de culture. En préalable de la plantation, on réalise un travail du sol qui se limite à un labour et un sillonnage (profondeur d'environ 30 cm) de la parcelle. La fertilisation est généralement appliquée au niveau du sillon avant plantation et des apports de surfaces peuvent être faits au cours du cycle. La plantation à proprement parlée consiste à déposer des boutures (fragments de tiges) au fond des sillons et à les recouvrir de terre. Après plusieurs cycles (5 à 6 récoltes), la replantation est nécessaire pour assurer le maintien de productivité des systèmes canniers. En effet, on observe une diminution des rendements dès la première repousse et de récolte en récolte (Matsuoka et al., 1999).

Au cours du cycle de développement végétatif de la plante on peut distinguer 4 phases : le débourrement des bourgeons et l'émission de racines, la levée et l'initiation du tallage, l'intensification du tallage et la croissance végétative, la maturation (Figure 1.6). La plante forme des touffes regroupant plusieurs tiges pouvant mesurer plusieurs mètres de long et contenant du jus concentré en saccharose.

La récolte correspond à une phase de maturation qui s'étale sur une période de 5 à 6 mois selon les conditions pédoclimatiques. La maturation correspond selon les zones de production à des stress hydriques et/ou thermiques qui favorisent l'accumulation de sucre dans les tiges et ralentissent la croissance de la culture et sa production de fibre. Les itinéraires techniques sont calés pour récolter la production lors de la phase de maturation de la culture[4]. La récolte est l'étape qui marque la fin du cycle de culture la précédant et le début du suivant. Pour un cycle débutant par une plantation on parle de « vierge » et tous les cycles qui suivront sont appelés « repousses ».

[4]A la Réunion cette phase intervient en période sèche et froide mais pluvieuse et froide au Maroc. Ceci souligne l'importance de la température pour le calage de la récolte par rapport à la maturation.

Figure 1.6 Cycle cultural et stades phénologiques de la canne à sucre, Illustration: Rogério Lupo, (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011).

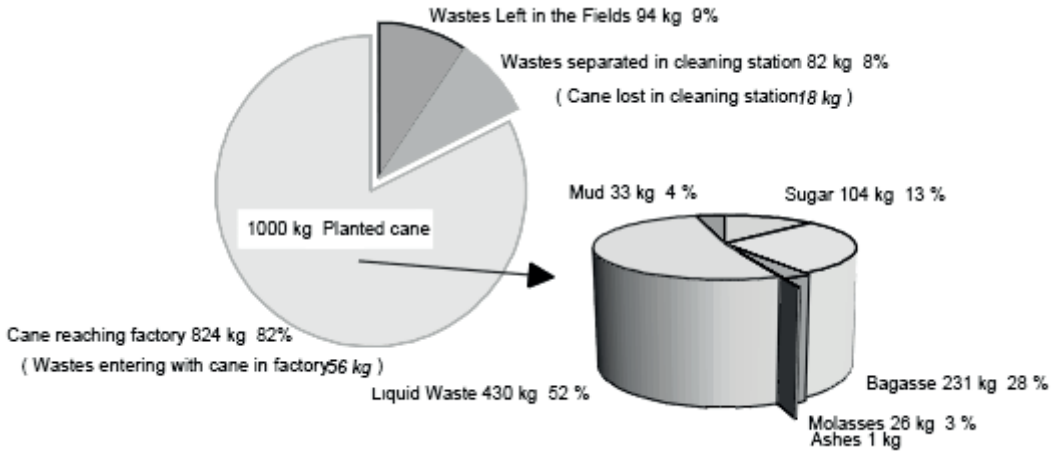


a Stalk pieces used in planting = boutures, **b** Beginning of bud sprouting and rooting = débourement des bourgeons et rhyzogénèse, **c** Tillering initiation = initiation du tallage, **d** Intense tillering = tallage intensif, **e** Beginning of maturation = début de maturation, **f** Manufacturable stalks in optimal sucrose concentration = concentration optimale en saccharose des tiges usinables, **g** Harvesting = récolte, **h** Ratoon sprouting = levee en repousse, plan-cane cycle = vierge, ratoon cycle = repousse.

1.2. DE LA RECOLTE A LA TRANSFORMATION…

D'après Almazan et al., (1998), de la récolte à la transformation de la production pour extraction du sucre, il est possible d'obtenir jusqu'à 8 produits et coproduits (Figure 1.7). Parmi tous les produits et coproduits générés à la récolte et par le procédé de transformation de la canne, nous allons uniquement détailler les sources de biomasse fibreuse issue de la filière sucrière. Les deux principales sources qui constituent la biomasse fibreuse sont la biomasse résiduelle (résidus de récolte) et la bagasse. Ce sont ces deux sources qui peuvent être utilisées à des fins non alimentaires, pour les animaux, l'extraction de bioproduits ou encore la production de bioénergie, et cela sans compétition territoriale (Almazan et al., 1998).

Figure 1.7 Inventaire et proportion des produits et coproduits de la canne issus de la récolte et de l'industrie sucrière (Almazan et al., 1998).



waste left in the field and separated in the cleaning station = résidus de récolte laissés au champ et séparés des chargements pour les usines équipées de station de dépaillage, liquid waste = déchet liquide, mud = boue, molasses = mélasses, ashes = cendres, bagasse = bagasse, sugar = sucre.

1.2.1. Les méthodes de récolte de la canne

La récolte de la canne peut être manuelle, dans ce cas la biomasse exportée de la parcelle, qui constitue les chargements livrés aux usines, renferme essentiellement la fraction anatomique de réserve de la plante appelé tige usinable ("canne", *millable stalk*). Pour faciliter la récolte manuelle certains pays (notamment le Brésil, l'Afrique, l'Île Maurice,…) pratiquent encore le brûlage (Hassuani et al., 2005). Cette méthode est en cours d'abandon pour des raisons environnementales (pollution de l'air, décimation de la faune,…), agronomiques (diminution

de la fertilité des sols, pertes de production en sucre) mais aussi parce que la biomasse résiduelle n'est pas valorisée (Ripoli, 2000).

Dans d'autre cas la récolte peut être mécanique, dans ce cas elle autorise une coupe en vert (pas de brûlage) ainsi, la biomasse exportée de la parcelle inclut les tiges usinables et des proportions plus ou moins grandes de biomasse résiduelle ceci étant fonction du type de coupeuse utilisée (Waclawovsky et al., 2010). La coupe en vert soulève toutefois un problème lié au procédé d'extraction du sucre. En effet, l'incorporation d'une proportion plus ou moins grande de biomasse résiduelle dans les chargements livrés aux usines (appelé "non canne") augmente le taux de fibre et diminue le rendement en sucre extractible (Glaz et al., 2011).

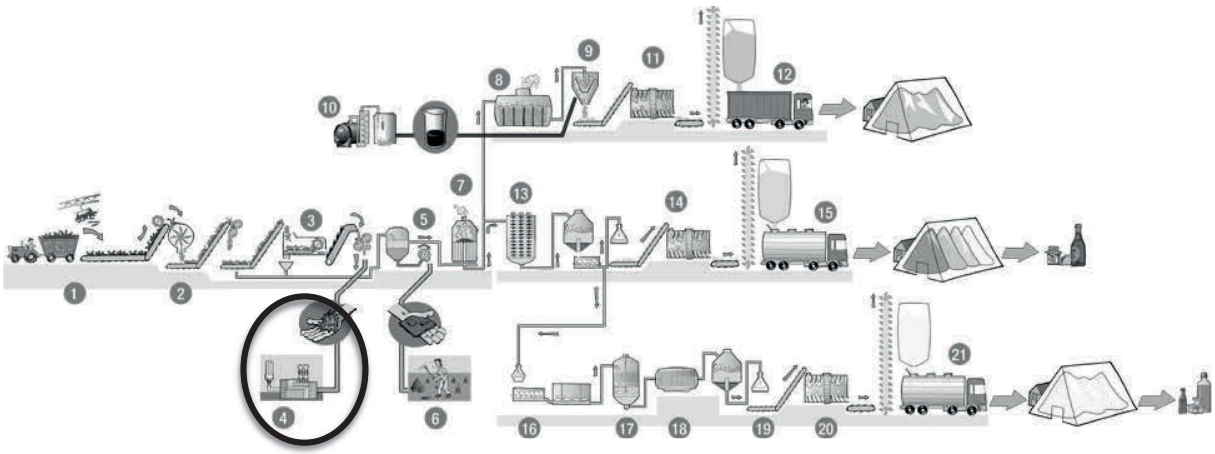
1.2.2. Transport, paiement et transformation

Après récolte, la partie de la production qui est exportée de la parcelle ("chargement") est acheminée sur les lieux de traitement. Ensuite, dans le cas de la Réunion, le CTICS (Centre Technique Interprofessionnel de la Canne à Sucre) est en charge de peser et d'analyser les chargements, afin d'en déterminer leurs valeurs marchandes avant qu'ils soient transformés. Il existe différentes méthodes pour déterminer la valeur marchande d'une production (réfractométrie, polarimétrie, spectroscopie dans le porche infrarouge) et celles-ci sont fonction des pays et du niveau de technicité adopté.

Les planteurs sont principalement rémunérés pour le sucre contenu dans les chargements livrés aux usines. A la Réunion les planteurs sont également, en plus du sucre, rémunérés pour la biomasse fibreuse à hauteur de 13 €/t de canne livrée ("prime bagasse"). Les formules de calcul qui permettent d'établir le paiement des planteurs varient selon les pays producteurs notamment parce que les méthodes employées, pour (i) déterminer la valeur marchande ainsi que (ii) les caractéristiques qualitatives des chargements et le cahier des charges de production diffèrent.

Au niveau de la chaine de production de l'usine (sucrerie), le procédé d'extraction du jus sucré des tiges de canne à sucre (Figure 1.8) génère des coproduits dont le plus abondant est la bagasse.

Figure 1.8 Procédé de transformation de la canne à sucre



1 et 2 : réception et préparation de la canne, 3 : extraction du jus, **4 : utilisation de la bagasse**, 5 et 6 : clarification et décantation, 7 : fabrication du sirop, 8 et 9 : cristallisation, malaxage et turbinage, 10, 11 et 12 : séparation de la mélasse, 13, 14 et 15 : fabrication du sucre roux, 16, 17, 18, 19, 20 et 21 : fabrication du sucre blanc raffiné.

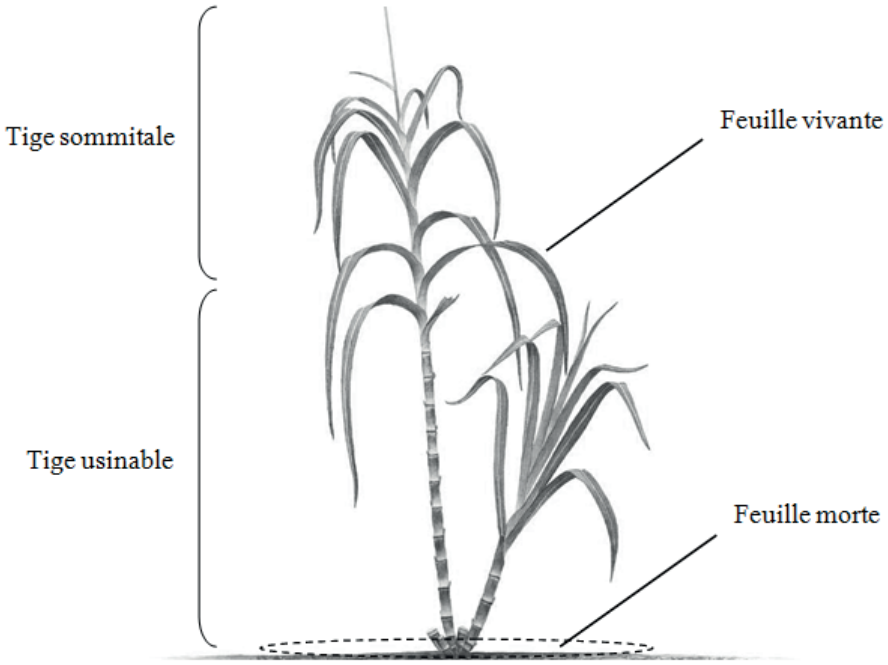
1.2.3. La biomasse fibreuse issue de la filière sucrière

1.2.3.1. La biomasse résiduelle

La biomasse résiduelle ou résidus de récolte est la part de la production laissée au sol lors de la récolte des tiges de canne. Communément appelés paille (*sugarcane straw* ou *trash*), les résidus de récolte sont composés par des feuilles, des extrémités de tiges (tiges sommitales ou fouets) et des tiges (entières ou étêtées) perdues lors de la récolte.

Les nombreuses études conduites sur la biomasse résiduelle font état d'une large gamme de variation allant de 6 à 35 % de la matière sèche aérienne totale produite (Paillat et al., 1997 ; Leao, 2000 ; Sartori et al., 2000 ; Saldago et al., 2001 ; Pouzet et al., 2002 ; Razafimbelo et al., 2006 ; De Luca et al., 2008 ; Saad et al., 2008 ; Viator et al., 2008). La biomasse résiduelle représente d'après van Dillewijn, (1960) 34% de la matière sèche totale produite par la culture. Elle est constituée en pourcent de la matière sèche totale par des tiges sommitales ou fouets (9%), des feuilles vertes et limbes, des talles ou jeunes tiges (*tiller*) et des feuilles mortes (24,6%) (Figure 1.9).

Figure 1.9 Répartition des composantes anatomiques de la biomasse aérienne de canne à sucre



Les études d'Alexander, (1985) aboutissent à des résultats proches. Cet auteur détaille plus précisément la répartition massique de la biomasse résiduelle produite par la culture en pourcent de la matière sèche aérienne (hors racines) avec les tiges sommitales (13%), les feuilles attachées (4%), les feuilles au sol (14%) et les tiges usinables (69%).

Des essais de collecte de la biomasse résiduelle conduits en Colombie (Briceno et Torres, 2001) montrent une composition différente de la biomasse totale produite par la culture avec une grande proportion de fouets (50%), des feuilles (30%), des souches et des racines (1%), des talles mortes (3%), des jeunes talles (6%), et des gaines et du sol (10%). Les auteurs observent également des différences significatives de production et de répartition pour les différentes composantes entre les 10 variétés testées sur deux sites.

Gooding (1982) montre que les fouets et les feuilles sont beaucoup plus riches en fibre que les tiges (25 et 30% respectivement contre 15%). D'après Hassuani et al., (2005) la biomasse résiduelle sèche récoltée (140 kg/tonne de canne) est équivalente à la biomasse que constitue la bagasse (280 kg/tonne de canne à 50% d'humidité). La biomasse résiduelle peut donc représenter une source de fibre intéressante en complément de celle de la bagasse.

1.2.3.2. La bagasse

La bagasse est un composé fibreux hétérogène qui provient essentiellement des fibres des tiges mais aussi pour partie des feuilles demeurées adhérentes aux tiges. La bagasse est issue de cultivars sélectionnés pour le sucre et elle est surtout exploitée comme source d'énergie dans les sucreries.

La bagasse est constituée en moyenne, au sortir du procédé d'extraction du sucre, de 48% de fibre incluant les cendres, 50% d'eau et 2% de solubles solides constitués essentiellement par des sucres. A Cuba, Almazan et al. (1998) estiment que pour une tonne de canne récoltée, 824 kg de canne sont usinées pour produire 231 kg de bagasse contenant environ 50% de fibre et 50% d'humidité. En Inde, Sharma et al., (2000) estiment qu'une tonne de canne usinée produit entre 300 et 350 kg de bagasse avec 50 à 55% d'humidité. Kessari et Langelier (2005) font état d'une production moyenne de 270 kg par tonne de canne variant entre 250 et 300 kg par tonne de canne usinée.

La quantité de bagasse générée lors du procédé d'extraction du sucre dépend (i) de la variété car le taux de fibre conditionne directement la quantité de bagasse produite, (ii) des conditions de culture car l'itinéraire technique peut moduler le taux de fibre et (iii) de la qualité des chargements car à la récolte selon la méthode employée (manuelle ou mécanique) la quantité de biomasse résiduelle incorporée dans les chargements varie ce qui agit également sur le taux de fibre.

1.3. CARACTERISATION ET USAGES DE LA BIOMASSE FIBREUSE

La biomasse fibreuse est un mélange complexe de cellulose, hémicellulose et lignine qui varie selon les espèces, les sites de culture, le climat, l'âge et les composantes anatomiques de la plante récoltées (Han et al., 2007). Pour la canne à sucre, les données extraites des études de Paturau (1989) démontrent à l'échelle mondiale et de pays producteurs que les teneurs en composantes lignocellulosiques sont variables. Un grand nombre d'études traitent de la variabilité des principales composantes lignocellulosiques mais ces études concernent essentiellement la bagasse (Irvine et Benda, 1979 ; Wood, 1981 ; Sene et al., 2002 ; Conçalves et al., 2005 ; Rinaudo et joseleau, 2008). En effet, on constate qu'aucune étude ne mentionne leurs répartitions ni l'évolution de leurs répartitions dans les différentes composantes anatomiques à l'échelle de la plante.

1.3.1. Composition chimique de la biomasse résiduelle

D'après Burner et al., (2008) les feuilles représentent plus du tiers en matière sèche de la biomasse aérienne totale à la récolte et ont une concentration élevée de cellulose (48,2%) et de lignine (16,7%). Cependant, la littérature scientifique ne fournit que peu d'indications sur les fibres issues des feuilles de canne à sucre alors qu'elles représentent une part non négligeable de la biomasse. Une caractérisation qualitative des feuilles en vue de leur usage industriel est nécessaire compte tenu de la quantité produite, des possibilités techniques de collecte, et de la quasi absence de références sur le sujet (Pouzet, 2011).

Une étude menée sur la résistance de cultivars indiens à un foreur des tiges (Sharma et al., 2000) indiquent un différentiel de composition entre les tiges et les gaines de canne à sucre. D'après les auteurs les gaines ont des concentrations plus élevées en fibre (entre 62,1 et 69,9 %) et en cellulose (entre 28,8 et 32,5 %) que la tige. On notera aussi que les gaines ont des concentrations plus faibles en lignine (entre 2,4 et 3,2 %) que les tiges.

1.3.2. Composition chimique de la bagasse

D'après Paturau (1989) la composition chimique de la bagasse de canne à sucre en % de la matière sèche varie selon que l'on considère la bagasse entière, la fibre de bagasse ou la moelle de bagasse et la provenance géographique. La cellulose varie entre 34,9 et 42,5% de la matière sèche (Paturau, 1989) et l'on constate que cette teneur est plus élevée dans les fibres que dans la moelle ou la bagasse entière. La variabilité entre les provenances géographiques semble moins marquée qu'entre les fractions histologiques de la bagasse. L'hémicellulose varie entre 22 et 33% de la matière sèche (Paturau, 1989) et il apparait que ces teneurs sont plus variables entre les provenances géographiques qu'entre les fractions histologiques de la bagasse. La lignine varie entre 20 et 22% de la matière sèche (Paturau, 1989) et comme pour l'hémicellulose ces teneurs sont plus variables entre les provenances géographiques qu'entre les fractions histologiques de la bagasse.

Il apparaît dans la littérature d'autres citations sur la composition de la bagasse (Tableau 1.2) et également des teneurs moyennes en cellulose dans la matière sèche de la bagasse de 53% (Ashori et Nourbakhsh, 2009), 54% (Atkinson, 1993), 56 à 60% (Ibrahim et al., 1985) et 50% (Pandey et al., 2000).

Tableau 1.2 Variabilité des composantes de la bagasse de canne à sucre (Pouzet, 2011)

Références	Composantes lignocellulosiques (% de la matière sèche)		
	Hémicellulose	Cellulose	Lignine
Irvine et Benda, 1979	28	36	20
Wood, 1981	-	48 -58	18 - 22
Sene et al., 2002	25	46	20
Conçalves et al., 2005	24	44	28
Rinaudo et Joseleau, 2008	27 - 32	32 - 44	19 - 24
TAPPI[5]	23 - 30	45 - 50	20 -25

1.3.3. Les différents usages de la biomasse fibreuse

Les deux principales sources de biomasse fibreuse issues de la filière sucrière sont la bagasse et la biomasse résiduelle. Contrairement à la bagasse, la biomasse résiduelle n'est pratiquement jamais valorisée et le plus souvent elle est brûlée au champ pour faciliter les opérations lors de replantation. A la Réunion la biomasse résiduelle laissée au sol est quelque fois récoltée pour servir d'aliment pour le bétail ou comme litière dans les élevages mais également pour faciliter le démarrage des repousses en conditions fraîche et humide. Le paillage permet de conserver une bonne humidité du sol mais diminue son réchauffement.

L'utilisation de la biomasse résiduelle comme source d'énergie renouvelable supplémentaire, alors qu'elle est également impliquée pour le maintien de la fertilité des sols ou comme méthode de lutte contre les adventices pose question. Des études complémentaires sur le rôle de cette matière organique sont nécessaires car peu renseignées. En dehors de l'usage énergétique les principaux produits issus de la filière sucrière concernent l'industrie papetière et les matériaux de construction ce qui constitue une réponse pertinente à la raréfaction des ressources forestières (Almazan et al, 1998). La fabrication de papier absorbe aujourd'hui 10% de la production mondiale de bagasse avec comme exemple l'Inde qui fabrique 20% de sa production de papier à partir de bagasse (Pouzet, 2011).

La production de panneaux de particule à partir de bagasse est une technologie bien maîtrisée. Toutefois, la difficulté principale réside en un coût élevé des résines, le plus souvent de type urée formaldéhyde, utilisées pour lier les fibres (Paturau, 1982). Cependant, les lignines de

[5] TAPPI : Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Importante ONG qui édite des livres, des revues scientifiques et techniques, des standards (analyses...) dont le domaine s'étend aujourd'hui à la plupart des usages des fibres lignocellulosiques comme l'indique son site web (*http://www.tappi.org*)

canne à sucre peuvent se substituer entièrement aux phénols des résines issues de l'industrie pétrochimique (Hoareau, 2005).

Le furfural est produit à partir des pentosanes qui dans le cas de la bagasse sont constitués par 90% de xylane. Le furfural a de nombreux usages industriels comme solvant dans le raffinage des huiles de lubrification ou intermédiaire de la production de nylon. C'est également une molécule plate-forme qui après hydrogénation donne de l'alcool fulfurylique, point de départ de nombreuses résines résistantes à la chaleur et à la corrosion, utilisées dans les domaines pharmaceutique, fongicide, insecticide et dissolvant (Paturau, 1982).

Le méthane et le dioxyde de carbone sont les principaux produits gazeux issus de la fermentation méthanogène anaérobie de matériels cellulosiques. La cellulose est facilement digérée par les bactéries, mais la présence de lignine dans la bagasse de canne à sucre inhibe et rend beaucoup plus difficile sa dégradation bactérienne. Les biogaz ont un pouvoir calorifique intéressant (27,5 MJ/m^3), cependant la bagasse n'est pas un support approprié pour la production de méthane comparativement à d'autres coproduits comme les boues de distillerie (Paturau, 1982).

Il apparaît donc très important si l'on veut orienter et optimiser la valorisation de la biomasse fibreuse vers de nouveaux usages, de mieux connaître les modalités d'allocation des principaux constituants de la biomasse et l'impact de la production de sucre sur ces allocations, mais également comme pour le sucre identifier et quantifier les sources majeures de variations de sa composition chimique.

1.4. LA CANNE A SUCRE COMME CULTURE A VOCATION ENERGETIQUE ?

1.4.1. Définition du potentiel énergétique d'une production

La matière première qui va constituer le combustible dans le cadre de la filière canne à sucre est composée par différentes fractions industrielles. La partition de cette matière première se fait entre la partie de la production exportée de la parcelle qui intègre le processus d'extraction du sucre pour donner la bagasse et la partie qui reste au sol après récolte (biomasse résiduelle). Comme nous l'avons vu précédemment, la masse, la proportion et la composition de ces parties va dépendre de la variété, du site de production, du climat, de l'âge et des méthodes de récolte (Pouzet, 2011).

Le rendement énergétique de la production est le produit du rendement en biomasse collectée (t/ha) par le pouvoir calorifique de cette biomasse. Ce dernier dépend :

- des teneurs en composantes combustibles (carbohydrates structuraux et non structuraux),
- des teneurs en composantes non combustibles (eau et cendres),
- des caractéristiques chimiques de ces composantes (teneurs en C, H et O).

La valeur calorifique d'un combustible est caractérisée par les pouvoirs calorifique supérieur (PCS) et inférieur (PCI) exprimés en MJ kg^{-1}. La différence entre les deux correspond à l'énergie latente de vaporisation de l'eau générée par la combustion qui est récupérée dans le premier cas (eau liquide) et pas dans le second (vapeur d'eau). Cette eau est directement liée à la teneur en hydrogène de la biomasse.

Or, il existe peu de données sur la production de biomasse aérienne totale et la valeur calorifique de ses composantes, à part dans quelques cas d'étude pour des usages fourragers de la canne à sucre. Par ailleurs, de nombreuses études ont été conduites sur l'évaluation de la valeur calorifique (PCS = 19605 kJ kg^{-1} et PCI = 18128 kJ kg^{-1}) de la bagasse sèche sortie d'usine par différentes méthodes (Don et al., 1977). Cependant, la méthode directe par mesure calorimétrique est coûteuse et pose un problème de représentativité car la prise d'essai est très faible (quelques grammes de matière sèche). Des méthodes indirectes existent et ont fait l'objet d'un grand nombre de formules utilisant la composition atomique du combustible (Yin, 2011) comme la spectroscopie dans le proche infrarouge (Gillon et al., 1997 ; So et Eberhardt, 2010).

D'après l'étude conduite par Don et al., (1977) il n'y aurait pas de différence variétale significative entre les valeurs calorifiques de la fibre brute ($aNDF_{om}$ = fibre hors cendres, solubles et eau) provenant de différents organes, excepté pour les feuilles vertes. Le potentiel énergétique de plusieurs des composantes de la biomasse aérienne (pailles, bagasse, feuilles vertes, tiges sommitales et résidus de récolte) a été évalué au brésil (Ripoli et al., 2000 ; Hassuani et al., 2005), en Australie (Pankhurst, 2005) et à Cuba (Alonso et al., 2007) dans le but de présenter les intérêts agronomiques et d'estimer le potentiel énergétique par valorisation de la biomasse fibreuse issue de la filière sucrière.

Dans les systèmes de culture canniers actuels on peut considérer que plus d'un tiers de la biomasse lignocellulosique et de son contenu énergétique demeure inexploité par les filières sucrières traditionnelles (Pouzet, 2011). Il apparaît que le Brésil perd l'équivalent de la

consommation électrique de 12,5 millions de personne et à Cuba cela pourrait générer un surplus d'électricité de 80 kWh/tonne de canne.

1.4.2. La canne à sucre comme source d'énergie

Les résultats mis en lumière par les récents progrès du génie génétique sont révélateurs de l'orientation sucrière des critères de sélection sur lesquels sont basés les programmes de sélections canniers (D'Hont, 2005). Ces programmes ont conduit à une diminution du taux de fibre et du potentiel de productivité des hybrides commerciaux. Toutefois, cela suppose également qu'il existe une large gamme d'amélioration variétale possible avec comme prérequis la définition de nouveaux critères de sélection non plus basés principalement sur les caractéristiques sucrières mais répondant à des objectifs de production multi-usages (bioénergies et bioproduits).

Une culture dédiée à la production de bioénergie doit présenter les caractéristiques suivantes :

- croissance rapide,
- rendement en biomasse élevé,
- production énergétique totale en sortie du système de culture supérieure à l'énergie fossile nécessaire en entrée (Waclawovsky et al., 2010).

La canne à sucre présente ces caractéristiques toutefois, la capacité de production énergétique totale de la canne à sucre est encore mal connue car la biomasse résiduelle ne trouvait pas un réel usage commercial et sa caractérisation avait donc peu d'intérêt. Par ailleurs, même si les chercheurs commencent à s'intéresser à la biomasse résiduelle, les connaissances restent limitées aux filières sucre/éthanol et au principal coproduit, la bagasse (Pouzet, 2011). Il faut également garder à l'esprit que la production de sucre est centrale et qu'elle doit rester élevée même si l'on cherche à optimiser le potentiel multi-usage de la canne à sucre en valorisant au mieux la biomasse lignocellulosique. D'ailleurs, la biomasse résiduelle de canne est de plus en plus convoitée par les industriels du sucre pour générer de nouveaux revenus et rendre la filière plus compétitive face aux aléas des prix du sucre.

Le concept d'utilisation de la « biomasse totale » de canne à sucre fut introduit par Alexander et al. (1982). Ainsi, Alexander (1985) énonce les 3 conditions essentielles pour assurer la réorientation des systèmes de culture canniers vers la production de biomasse :

- l'utilisation de la plante entière incluant les tiges sommitales et les résidus de récolte formellement séparés;
- cibler la conduite de la culture sur la croissance et maximiser la production de l'ensemble des composantes de la biomasse;
- intégration dans les systèmes de culture canniers de cultures associés, telles que des herbacées tropicales, afin d'assurer un approvisionnement continu au cours de l'année des unités industrielles de valorisation de la biomasse lignocellulosique.

L'usage énergétique de la biomasse lignocellulosique est le plus courant dans la filière sucrière parce qu'il est le plus simple à mettre en œuvre. La filière sucrière utilise majoritairement la combustion, comme procédé de valorisation de la bagasse (environ 90% de la bagasse produite dans le monde est brulée), pour produire de la vapeur et de l'électricité afin d'alimenter les sucreries. Avec un équipement moderne (chaudière et turbo-alternateur) une centrale thermique peut produire jusqu'à 450 kWh par tonne de bagasse (Paturau, 1982).
L'utilisation de nouveaux procédés de valorisation comme la gazéification et la carbonisation ouvre des perspectives intéressantes, car ces derniers affichent des rendements énergétiques supérieurs (de 20 à 30%) au procédé de combustion généralement utilisé par les centrales thermiques, mais sont encore au stade expérimental (Kirubakaran et al., 2009). La production de bioéthanol de seconde génération par hydrolyse de la biomasse lignocellulosique (essentiellement la bagasse) a également une importance non négligeable. Lorsque cette technique deviendra économiquement intéressante le procédé de valorisation permettrait de générer 3000 L ha^{-1} à partir de la biomasse lignocellulosique soit une augmentation 43% de la production de bioéthanol obtenue par la fermentation du sucre (Somerville et al., 2010).

1.4.3. Rentabilité économique du procédé de valorisation énergétique par combustion

Une sucrerie classique consomme environ 35 kWh et 450 kg de vapeur d'eau par tonne de canne alors qu'une sucrerie moderne peut opérer avec 30 kWh et 300 kg de vapeur d'eau par tonne de canne (Paturau, 1982). Classiquement, 50% de la production de bagasse suffit à couvrir la consommation énergétique nécessaire aux procédés industriels (sucrerie et

distillerie). Toutefois, il apparaît que les sucreries traditionnelles utilisent inefficacement l'énergie fournie par la bagasse.
Il est avéré qu'avec une optimisation des procédés, orientée vers l'économie d'énergie, une sucrerie pourrait réduire de 50% sa consommation énergétique. Le surplus d'électricité généré par les centrales thermiques servant exclusivement à alimenter le réseau électrique public, c'est indiscutablement le plus simple et le meilleur usage qu'on puisse faire de la bagasse. Toutefois, une telle économie permettrait d'envisager une marge de manœuvre plus importante pour orienter l'excédent de bagasse sur d'autres usages, pouvant être plus compétitifs selon des conditions locales variables, comme la production de pâte à papier, de panneaux de particule, de furfural, de méthane….

Si l'on se livre à une rapide étude économique de la rentabilité énergétique de la culture de canne à sucre à la Réunion on obtient les résultats suivants :

sachant qu'il y a classiquement 33 % de bagasse par tonne de canne livrée (CTICS Réunion, 2010), on obtient une rémunération des planteurs par les usiniers à hauteur de 49 €/t de bagasse. La valeur marchande de la bagasse pouvant être indexée sur sa valeur énergétique (tonne équivalent pétrole « tep ») on peut en déduire la valeur d'une tonne de bagasse. Selon le prix du marché on obtient un prix de 583,7 €/t de Brent (valeur Insee, 08/2011). Considérant qu'une tonne de bagasse correspond à 0,173 tep on obtient un prix de 101 €/t de bagasse selon le cours du pétrole actuel. Considérant maintenant la technologie utilisée localement pour valoriser la bagasse, on obtient un rendement de conversion de 516 kWh/t de bagasse (ARER, 2009) soit au tarif actuel de rachat par EDF de l'électricité produite à partir de la biomasse (0,125 €/kWh hors primes) un prix de 64,5 €/t de bagasse ou de 21,5 €/t de canne. Si l'on soustrait à cela le coût de consommation électrique de la sucrerie pour générer 1 tonne de bagasse soit 30 à 35 kWh pour traiter 1 tonne de canne (en moyenne 4,1 €/t de canne) on obtient un prix de 52,2 €/t de bagasse ou 17,4 €/t de canne.
D'après l'analyse économique réalisée par Paturau (1982) il apparaît que si la bagasse est tarifée entre 10,9 et 14,5 € par tonne (prix indexé sur sa valeur en tonne équivalent pétrole soit 0,173 tep) et que le coût de production sur une base annuelle reste compris entre 4 et 6 c€ par kWh, la production d'électricité à partir de la bagasse demeure très compétitive. Toutefois, ne connaissant pas le coût de production par kWh des centrales réunionnaises il est difficile de pousser plus loin l'analyse.

Il est cependant toujours plus intéressant pour les planteurs de livrer des cannes propres (dépaillées et étêtées) afin de maximiser le rendement en sucre des chargements car un coefficient de réfaction à la fibre (malus) est appliqué dans la formule de paiement. Le coefficient de réfaction augmente de concert avec la teneur en fibre des chargements (CTICS Réunion, 2011) alors que la quantité de sucre extractible diminue de manière inversement proportionnelle à l'augmentation du taux de fibre (Legendre, 1992 ; Gravois et Milligan, 1992 ; Glaz et al., 2011). Il va donc de soi que les usages énergétique et sucrier sont au moins autant antagonistes que la production de fibre et de sucre ne le sont…

1.4.4. Les antagonismes sucre / fibre

La biomasse totale produite par la canne à sucre, se partage majoritairement entre le sucre et la lignocellulose. L'étude de la production de biomasse fibreuse à partir de la canne à sucre impose donc d'aborder le problème de l'incidence de la partition entre sucre et lignocellulose sur la production de fibre.

Il existe un antagonisme entre la production de sucre et celle de fibre. Le processus de partition est quantifié par une corrélation fortement négative (entre – 0,65 et – 0,76 selon les auteurs) entre la teneur en saccharose et la teneur en fibre (Brown et al., 1969 ; Jackson, 1994 ; Sunil et Lawrence, 1996).

Inman-Bamber et al., (2002 ; 2008) montrent que la réduction artificielle de la croissance de la canne à sucre par une alimentation hydrique limitée permet d'augmenter la concentration des tiges en saccharose. En revanche, en condition d'alimentation hydrique satisfaisante (croissance optimale) comme en condition de fort stress hydrique (inhibition de la photosynthèse), les mêmes auteurs constatent une diminution de la concentration en saccharose des tiges. Dans le premier cas parce que l'allocation des photoassimilats a lieu préférentiellement vers les composantes lignocellulosiques de la fibre alors que dans le deuxième cas l'inhibition de la photosynthèse engendre une augmentation de la respiration de maintien et un arrêt de croissance.

L'accroissement de la production de sucre conduit donc *de facto* à une diminution de la production de fibre (Martiné et Lebret, 2001). Cependant, la réciproque n'est pas forcement vraie. En effet, un rendement élevé induit par des conditions optimales de croissance ou par sélection de variétés hybrides fibreuses très productives permet d'accroître simultanément les productions de sucre et de fibre à l'hectare. Cependant, le résultat n'est généralement pas adapté aux contraintes des filières sucrières car le sucre devient trop difficile à extraire. Néanmoins, on notera qu'il existe une corrélation négative entre la biomasse totale produite et

la richesse en sucre. Salas et al., (1992) montrent pour des variétés cultivées en Guadeloupe pour le sucre, une diminution du rapport sucre/fibre au cours du cycle qui passe de 0,71 à 8 mois à 0,55 à 12 mois après plantation. Le rapport est en outre dépendant de la variété avec des valeurs qui oscillent, pour les 18 variétés testées, entre 0,64 et 1,05.

1.4.5. Source de variabilité de la composition chimique de la fibre

Les écarts que l'on trouve selon les sources bibliographiques ont trois origines principales :

- la variabilité naturelle,
- des caractéristiques spécifiques d'échantillonnage,
- et des problèmes liés à la méthode d'analyse qui mettent en évidence : (i) la difficulté à séparer chimiquement les trois principales composantes lignocellulosiques et (ii) les difficultés de les isoler sans les modifier.

Dans la partie qui suit nous allons traiter de la variabilité naturelle de la composition chimique de la biomasse fibreuse et de l'effet des pratiques sur cette composition.

La biomasse résiduelle produite par la culture de canne à sucre varie en fonction du rendement et des principaux facteurs de variations qui lui sont associés, l'âge de la culture, la variété, les modalités de récolte et les conditions pédoclimatiques (Pouzet, 2011).

Les caractéristiques physiques et la composition chimique des fibres varient avec l'âge des tissus et changent donc en fonction de la position des fibres le long de la tige. La tige de canne présente donc une répartition hétérogène de fibres dont la qualité et la composition peuvent être modulées par l'environnement. En effet, les caractéristiques morphologiques (longueur et diamètre) des entre-nœuds dépendent de la variété et de tous les facteurs trophiques (climat, fertilisation, cycle, variété, maladies et parasites, niveau de tallage…). Ces caractéristiques sont donc modulables par l'itinéraire technique (Pouzet, 2011).

Il existe une grande variabilité variétale de dureté des tiges de canne à sucre. Le dépaillage artificiel accroît la dureté de l'écorce alors que l'irrigation la diminue et la verse la retarde. La dureté est donc directement liée à la teneur en fibre, on notera qu'elle est beaucoup plus élevée chez *S. spontaneum* que chez *S. officinarum* (Pouzet, 2011).

Le caractère engainant des feuilles a également une origine variétale ainsi c'est un critère contre-sélectionné dans les schémas de sélection classiques. Toutefois, dans le cadre d'une production multi-usages le caractère engainant présente un intérêt car il permettrait

d'augmenter la biomasse résiduelle exportée de la parcelle. De plus, la teneur et la composition des fibres des feuilles étant différentes de celles des tiges, la sélection de ce caractère serait susceptible d'engendrer des modifications de la composition chimique de la biomasse récoltée et donc de la bagasse.

Les études qui portent sur l'évolution des composantes lignocellulosiques de la canne à sucre au cours du cycle ont été réalisées le plus souvent par des nutritionnistes animaux. De Andrade et al. (2004) observent des différences significatives entre deux âges (12 et 18 mois) pour la fibre, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Cette variabilité semble également être un caractère variétal. Fernandes et al. (2003) ayant conduit une étude similaire sur un nombre de variétés plus réduit et selon trois âges (426, 487 et 549 jours) arrivent aux mêmes conclusions.

Kung et Stanley, (1982) ont étudié les variations de la composition de la biomasse de canne à sucre à Hawaï sur deux cycles de culture consécutifs. Les cannes ont été récoltées en vierge à 6, 12 et 24 mois et en première repousse à 9 et 15 mois. Il apparaît que les valeurs de fibre, cellulose et hémicellulose diminuent au cours du cycle alors que la lignine ne varie pas de façon significative au cours du cycle. Les valeurs à 6 et 24 mois oscillent entre 68,3 et 52,6%, entre 30,9 et 24,5%, entre 26,9 et 18,4% et entre 6,3 et 7,3% de la matière sèche aérienne pour la fibre, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine respectivement.

Pate (1979) a étudié les variations de la composition de la biomasse de canne à sucre en Floride pour un cycle de 16 mois. Comme précédemment il apparaît que les valeurs de fibre et des composantes lignocellulosiques diminuent au cours du cycle excepté la lignine qui demeure relativement stable. Les changements observés sont à mettre en relation avec l'augmentation de la matière sèche aérienne qui correspond au stockage des sucres au fur et à mesure de la maturation de la culture.

Au cours du cycle la lignification s'intensifie avec l'âge de la culture ce qui induit également un durcissement des fibres au fur et à mesure de la croissance des tiges. Les composantes lignocellulosiques de la fibre varient donc dans la tige selon l'emplacement et l'âge des entre-nœuds. Ouensanga (1989) montre ainsi une diminution de la concentration en lignines et en hémicellulose de la base au sommet des tiges de canne à sucre. Il montre également un accroissement de la cellulose de la base de la tige à son milieu puis une décroissance du milieu à son sommet. D'autres travaux menés sur *Miscanthus* par Kaack et al. (2003) confirment les observations faites pour la lignine mais ce n'est pas le cas pour Ververis et al. (2004) qui ne trouvent pas de différence. Ceci nous montre que la composition lignocellulosique des tiges ne varie pas de manière simple avec l'âge des tissus et dépend des

facteurs qui restent à identifier et quantifier. De plus, on notera que les études ne sont souvent pas comparables, notamment à cause de mélange entre fraction anatomique et de l'expression des teneurs des composantes en pourcentage de la matière sèche ou fraîche.
La concentration et la composition en lignine varie entre taxons, tissus, types cellulaires, et couches de la paroi cellulaire, et du stade de développement de la plante ainsi que des conditions environnementales (Han et al., 2007). Plus récemment, la régulation négative d'un gène impliqué dans la biosynthèse des lignines a généré une réduction de la teneur totale en lignine et une accélération de la croissance en biomasse (Han et al., 2007). Ce type de relation antagoniste peut s'avérer être intéressant toutefois, il faut qu'il soit en adéquation avec les objectifs de production visés…

La perspective de nouveaux débouchés énergétiques impose de repenser les systèmes de culture afin d'optimiser le potentiel multi-usage de la canne à sucre. Jusqu'alors la production de sucre se faisait au détriment des autres composantes de la biomasse toutefois, entre le tout sucre et le tout énergie, il apparaît une large fenêtre d'optimisation des systèmes de culture pour répondre aux différents enjeux économiques et sociaux des pays producteurs de canne à sucre. Cette optimisation demeure cependant complexe car multi factorielle. La caractérisation des effets du génotype, de l'environnement et des techniques culturales sur l'élaboration de la qualité de la production, à travers la biomasse lignocellulosique et le sucre, est une étape essentielle dans la conception de systèmes de culture ciblant une production multi-usages.

Il apparaît possible de moduler la production des composantes lignocellulosiques à travers le choix variétal et le calage du cycle de culture. Le niveau de maturation de la plante, étant contrôlable par ces deux pratiques culturales, est donc un facteur déterminant de la qualité des fibres de la biomasse produite. La connaissance de l'évolution au cours du cycle des composantes lignocellulosiques, de leurs répartitions dans la plante et la compréhension des mécanismes qui les régissent en liens avec les conditions climatiques et les pratiques en est une autre. Cette matrice décisionnelle demeure toutefois complexe et son optimisation nécessite de faire des choix stratégiques qui seront fonction des objectifs de production ciblés. La modélisation semble donc être l'outil le plus adapté pour répondre a nos besoins d'optimisation

1.5. ETAT DES LIEUX DES MODELES DE CROISSANCE DE LA CANNE A SUCRE

Le sous-chapitre précédent fait état du potentiel multi-usages de la canne à sucre et soulève également la problématique d'une orientation de la production vers des usages antagonistes. Il est évident que la qualité de la biomasse à travers sa composition en lignocelluloses a un impact sur la rentabilité des procédés de valorisation et que cette qualité est variable. La modélisation est un moyen d'action privilégié dès lors que l'on connait les leviers agronomiques agissant sur la qualité de la biomasse. Or, parmi les modèles de croissance existant, aucun n'a à ce jour les capacités pour simuler l'accumulation des composantes lignocellulosiques de la fibre.

1.5.1. Un bref historique

La construction de modèles de croissance de la canne à sucre n'a réellement débuté qu'à la fin des années 80 avec le modèle « Auscane » (Jones et al, 1989) pour aboutir du milieu des années 90 au début des années 2000 à quatre modèles complets et fonctionnels. (i) En Afrique du Sud, le modèle « Canegro » fut intégré à partir de 1996 (Inman-Bamber et Kiker, 1997), au DSSAT, plateforme de simulation utilisée dans de nombreux pays. (ii) En Australie, le CSIRO intégra à la plate-forme de simulation APSIM (McCown et al, 1996) un modèle canne APSIM-Sugarcane dès 1995 (Robertson et al, 1995 ; Keating et al, 1999). (iii) A partir de 1984 le BSES Australien entreprit la construction du modèle « Q-Cane » (Liu et Kingston, 1995 ; Liu et Bull, 2001). (iv) A la Réunion, en 1993, après des tests infructueux du seul modèle canne disponible (Auscane), le programme canne à sucre du CIRAD décida de construire son propre modèle de croissance de la canne à sucre, « Mosicas ».

Actuellement, APSIM-Sugarcane et Canegro sont les deux modèles les plus utilisés. Q-Cane, bien que très performant, n'est plus employé (O'Leary, 2000). Mosicas fit l'objet de nombreuses communications dans des congrès (Martiné et al., 2001 ; Martiné et Lebret, 2001 ; Martiné et al., 2002), d'une thèse (Martiné, 2003) et plus récemment d'une adaptation aux conditions du Brésil et de la région du Gharb au Maroc (Aabad et al., 2009). Cependant, son utilisation reste aujourd'hui essentiellement localisée à la Réunion.

1.5.2. Fonctionnement, avantages et inconvénients

L'étude conduite par O'Leary, (2000) compare les 3 modèles (APSIM-Sugarcane, Canegro et Q-Cane) et nous alimenterons cette comparaison en y incluant une description de Mosicas afin de déterminer les intérêts et les limites des modèles pour la simulation du sucre produit. Cette analyse, bien que les modèles aient évolué depuis, permet de les comparer sur l'ensemble des processus physiologiques intervenant dans la production du sucre. Ces 4 modèles dynamiques ont un schéma global d'élaboration du rendement canne commun qui comprend les processus physiologiques suivants : interception du rayonnement utile incident (PAR) par l'indice foliaire (LAI) modélisé essentiellement à partir des températures, puis conversion (RUE) du rayonnement utile intercepté (PARi) en biomasse et partition de cette biomasse en ses différentes composantes (tiges, limbes verts et biomasse sénescente). Puis partition de la tige en pseudo-structures (fibre et non sucres solubles) et sucre.

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

Les points forts de Canegro sont, d'une part, sa formalisation de la conversion faisant intervenir la photosynthèse brute, la respiration de croissance et d'entretien, et, d'autre part, son intégration dans la plate-forme DSSAT (Hoogenboom, 2001) facilement disponible, bien documentée, et donnant accès à un réseau mondial d'utilisateurs.

Q-cane (Liu et Bull, 2001), le plus mécaniste, a comme atout principal de refléter aux mieux la réalité des mécanismes de formation du saccharose et de son utilisation pour les besoins de croissance (structure) et d'entretien (photosynthèse brute, transport et respirations dans chaque organe). Il se montre très performant en conditions irriguées optimales sur des jeux de données restreints mais sa validation en situations de stress hydrique important n'a jamais été réalisée. De plus le modèle n'est plus disponible.

Le principal avantage d'APSIM-Sugarcane est son organisation modulaire (eau, azote, évolution de la matière organique du sol et du paillis) mais réside également dans le fait qu'il puisse intégrer d'autres plantes. Il peut ainsi être utilisé dans des études de rotations ou environnementales. De plus, ses performances se sont récemment améliorées (même pour le sucre) et il comporte une formalisation dynamique de l'état hydrique de la tige très aboutie. Cependant, la documentation publiée est très imprécise (Robertson et al, 1995 ; Keating et al, 1999) et les contrats d'utilisation très restrictifs voire prohibitifs font qu'il n'est plus utilisé

ailleurs qu'en Australie. De plus il reste très onéreux et la modification du code et aussi très longue et couteuse.
Mosicas présente comme APSIM-Sugarcane l'avantage d'être organisé de façon modulaire (bilan hydrique, croissance). Il comporte une formalisation dynamique de la production des différentes composantes de la biomasse totale.

Les conclusions de O'Leary, (2000) montrent que APSIM-Sugarcane et surtout Canegro nécessitent une révision du formalisme décrivant la partition de la biomasse de tige vers le sucr. Comme pour Q-cane, ces modifications devraient adopter une approche source/puits et une formalisation dynamique de la production des différentes composantes de la biomasse totale. Concernant Mosicas on peut dire la même chose, des améliorations du module de partition de la biomasse et une modification de l'approche sont nécessaires. Néanmoins, Mosicas présentent d'autres avantages d'ordre pratique, non négligeables. Il est d'une part gratuit et d'autre part il peut être facilement compléter, modifier et tester par son concepteur dans le cadre de cette thèse.

1.5.3. La place de la fibre dans la modélisation

Parmi les quatre modèles présentés seul Q-cane (Liu et Bull, 2001) simule le processus de partition des composantes de la biomasse aérienne vers la fibre comme suggéré par O'Leary (2000). Toutefois, même si le modèle explique 95% de la variabilité observée pour la fibre avec une RMSE de 124 g m^{-2}, il n'a jamais été validé pour cette variable. D'après les auteurs les coefficients de partition des feuilles et des méristèmes vers la fibre varient peu au cours du cycle et du développement de la plante, les allocations pour ces fractions anatomiques demeurent donc constantes dans le temps. Par contre, pour la tige usinable l'accumulation de fibre est fonction de la température et de la respiration de croissance qui est elle-même fonction de la température. Les résultats montrent que l'accumulation de fibre est mieux simulée que l'accumulation de sucre. Les fibres étant constituées pour majorité d'éléments non solubles leur accumulation est beaucoup moins versatile que celle du sucre. En effet, si l'intensité de l'accumulation des fibres peut fluctuer au cours du cycle et des phases de développement de la plante c'est un phénomène qui n'est fondamentalement pas réversible contrairement à l'accumulation du sucre (phénomène de respiration de maintenance et de croissance).

1.6. PROBLEMATIQUE DE LA THESE

L'usage énergétique de la biomasse de canne à sucre a pris une dimension économique considérable ces dernières années (Cheavengetti et al., 2011). Parmi les cultures tropicales, la canne à sucre va être de plus en plus sollicitée car elle présente les caractéristiques d'une culture à fort potentiel bioénergétique (Waclavowsky et al., 2010). En effet, elle a un bilan énergétique positif, une efficience photosynthétique et des rendements en biomasse supérieurs aux autres cultures (Goldemberg et al., 2008). De plus, elle possède déjà des systèmes associés optimisés (production, transport et transformation) déjà présents sur de nombreux sites de production (Rein et al., 2007).

L'accroissement futur de la demande en biomasse de canne à sucre ou en certains de ses constituants (Rein et al., 2007) nécessitera donc un panel d'itinéraires techniques optimaux comprenant les cultivars (Giamalva, 1984 ; Rao et al., 2007 ; Legendre et Burner., 1995), longueur de cycle et date de coupe (Legendre et Burner., 1995),... Ces itinéraires devront être adaptés aux objectifs de production ciblés, aux conditions environnementales prédominantes et aux pratiques réalisables. Cependant, les systèmes de culture actuels ne sont définis que pour une production optimale et durable d'une seule composante de la biomasse, le sucre (Jackson, 2005).

Une réorientation des systèmes de cultures canniers s'avère nécessaire. En effet, le contexte environnemental actuel ainsi que les caractéristiques agronomiques de la canne à sucre font que les voies de valorisations nouvellement envisagées soient essentiellement dédiées aux énergies renouvelables. La mise au point de nouveaux systèmes de culture, ciblant une production multi-usages (sucre/énergie), ne pourra donc être réalisée que si l'influence de facteurs de variation agro-climatiques sur la répartition et l'évolution des variables constitutives du rendement énergétique de la biomasse de canne à sucre a été quantifiée.

Or, si le fonctionnement de la canne à sucre a été largement formalisé pour la production de biomasse aérienne et de sucre grâce notamment à la conception de modèle de croissance (Liu et Bull, 2001 ; Martiné et al., 2003 ; Singels et al., 2005), l'influence de facteurs agro-climatiques sur les modalités de répartition et d'allocation des variables constitutives du rendement énergétique de la biomasse de canne à sucre ont très peu ou pas été explorées (Rein et al., 2007).

De plus, si dans un avenir proche la politique énergétique de la Réunion tend fortement vers la production d'énergie renouvelable à partir de la biomasse fibreuse de canne à sucre et que le sucre reste un objectif de production rentable pour les producteurs, il va falloir faire des choix

techniques. Ces choix devront concerner les cultivars, longueurs de cycle et les dates de coupe en corolaire des pratiques culturales réalisables et des conditions environnementales prédominantes. Ceci dans le but d'aboutir à des profils qualité optimaux qui répondent à ces nouveaux objectifs de production multi-usages (i.e. générer un maximum de sucre et d'énergie de manière durable).

La combustion étant le procédé majoritairement employé pour valoriser la biomasse fibreuse de canne à sucre, il convient dans notre cas d'élaborer un outils pour aider à la conception par simulation d'itinéraires techniques optimaux permettant la mise au point de systèmes de culture canniers capable de générer une production répondant à des objectifs multi-usages (sucre/énergie).

Cela nous a conduit à poser plusieurs questions d'ordres différents :

(i) Comment définit-on le rendement énergétique de la culture ? Quelles sont les variables constitutives de son rendement énergétique ?

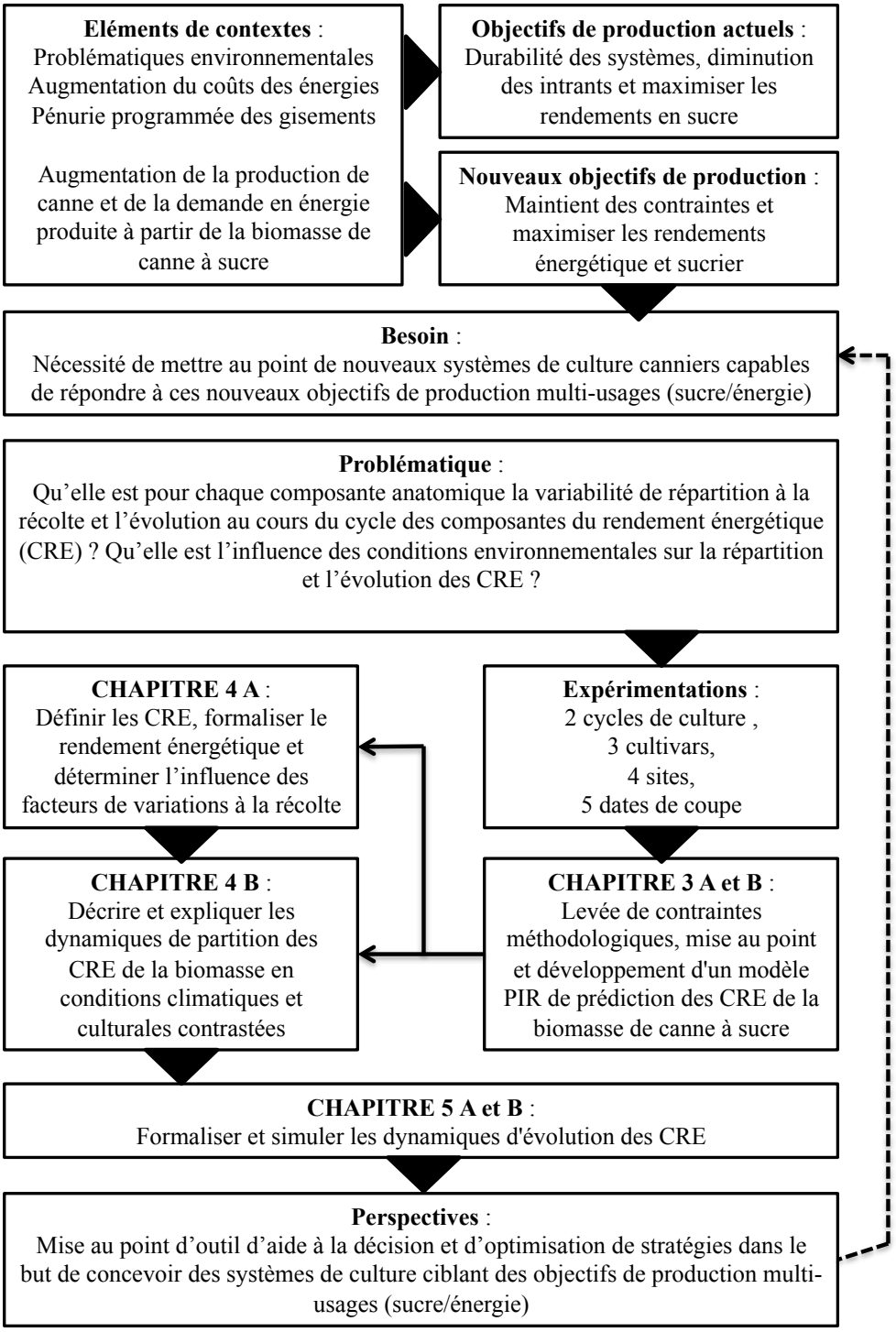
(ii) Existe-t-il des méthodes analytiques fiables pour doser efficacement et massivement les variables constitutives du rendement énergétique ?

(iii) Qu'elle est pour chaque composante anatomique la variabilité de répartition à la récolte et l'évolution au cours du cycle des variables constitutives du rendement énergétique ? Qu'elle est l'influence des conditions environnementales sur la répartition et l'évolution des variables constitutives du rendement énergétique ?

(iv) Quels formalismes utiliser pour modéliser les dynamiques d'évolution des variables constitutives du rendement énergétique dans la plante ?

Les questions posées en lien avec les différents chapitres de la thèse sont représentées selon le schéma ci-après (Figure 1.10).

Figure 1.10 Contexte, problématique et liens avec les différents chapitres de la thèse



CHAPITRE 2.
MATERIELS & METHODES

CHAPITRE 2. MATERIELS & METHODES

Ce chapitre a pour but de décrire la démarche expérimentale suivie au cours de cette thèse. Notre démarche est basée sur l'expérimentation agronomique qui à travers un plan d'expérience unique nous a permis d'étudier des systèmes de culture selon différentes modalités climatiques et agronomiques (cycle de culture, sites, variétés, méthodes de récolte et âges). Après échantillonnage et mise au point d'une méthode de dosage alternative la première phase consistée en la prédiction de composantes d'intérêts pour l'ensemble de nos échantillons. Une deuxième phase consistait en l'utilisation de ces données pour développer un module de simulation afin de l'intégrer dans le modèle de croissance « Mosicas ».

2.1 PLAN D'EXPERIMENTATIONS

Les expérimentations ont été réalisées au champ, sur trois cultivars de canne à sucre *Saccharum.cv* (R570, R579 et R585) implantés dans quatre sites de l'île de la Réunion (La Mare, Menciol, Etang Salé et Vue Belle) et suivis durant deux cycles de culture consécutifs (plantation ou « vierge » en 2008-2009 et première repousse en 2009-2010). Les cultivars sélectionnés présentent des caractéristiques agronomiques contrastées et notamment des taux de fibre différents à la récolte (R579<R570<R585).

2.1.1 Protocole expérimental

2.1.1.1 Localisation des essais agronomiques

Deux des parcelles expérimentales sont situées sur des zones côtières irriguées du nord-est et du sud-ouest de l'île (La Mare et Etang Salé respectivement). Les deux autres parcelles sont situées sur des zones de moyenne et haute altitudes pluviales respectives de l'est et de l'ouest de l'île (Menciol et Vue belle respectivement). Ces zones contrastées couvrent une large gamme de conditions édaphiques (culture côtière, de moyenne et haute altitudes, conduites irriguée ou pluviale), que l'on rencontre généralement dans les principales zones de production cannières de l'île de la Réunion (Figure 2.1).

2.1.1.2 Description des essais agronomiques

Les essais agronomiques sont constitués de 3 répétitions en blocs randomisés comprenant 3 variétés par bloc soit 9 parcelles élémentaires (Figure 2.2). Chaque parcelle élémentaire est constituée de 9 lignes de 11 m de long espacées par un inter ligne de 1,5 m (Figure 2.3).

La densité de plantation est de 9 œilletons (bourgeons) par mètre linéaire soit 3 boutures de 3 bourgeons par mètre linéaire. A la plantation les essais irrigués (La Mare et Etang Salé) sont équipés d'un système d'arrosage par goutte à goutte qui est enfoui au niveau du sillon. Les 4 essais sont fertilisés à la plantation au niveau du sillon et au cours du cycle avec un apport de surface au niveau du rang. L'apport de surface est réalisé 6 mois après la plantation soit un apport total au cours du cycle de 150 kg, 180 kg et 240 kg de N, P et K ha^{-1} respectivement en accord avec les recommandations de Chabalier et al. (2006).

Figure 2.1 Localisation géographique, altitude et pluviométrie des essais agronomiques

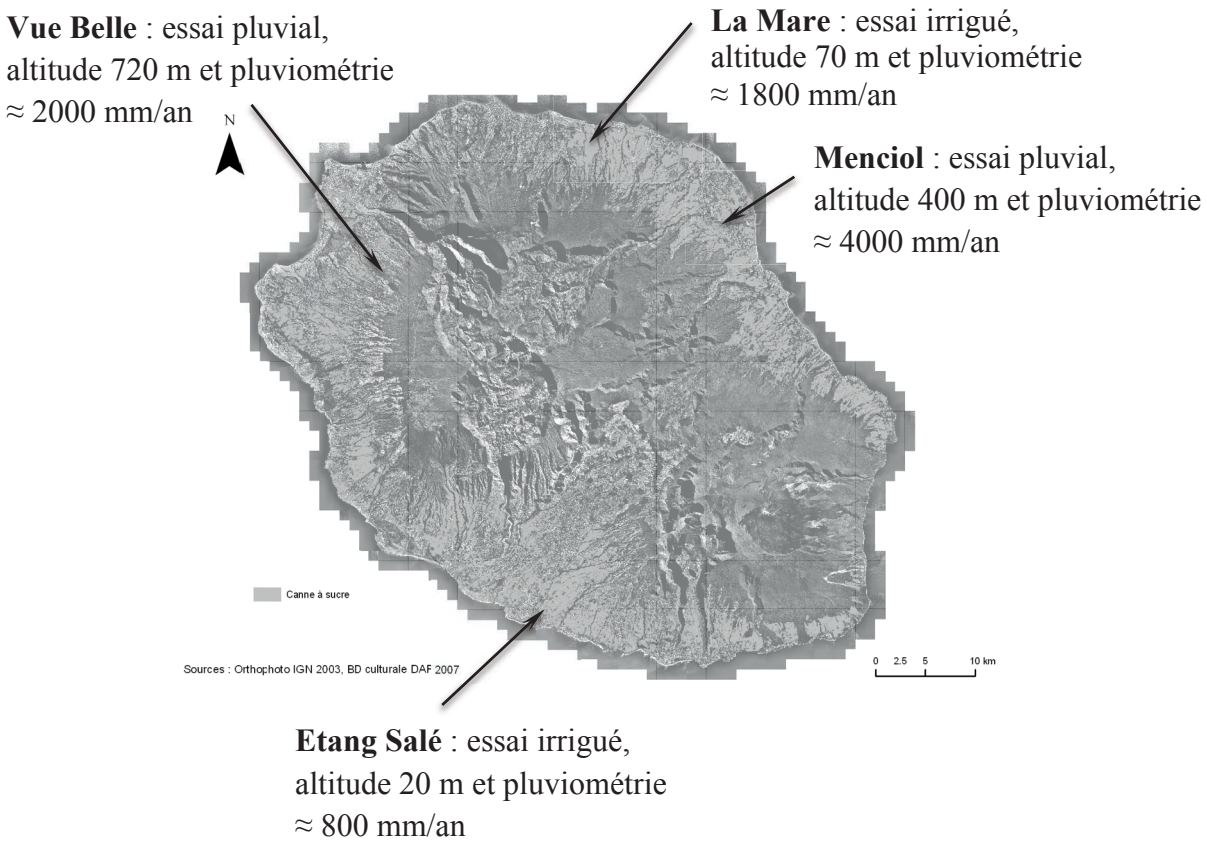


Figure 2.2 Configuration des essais agronomiques

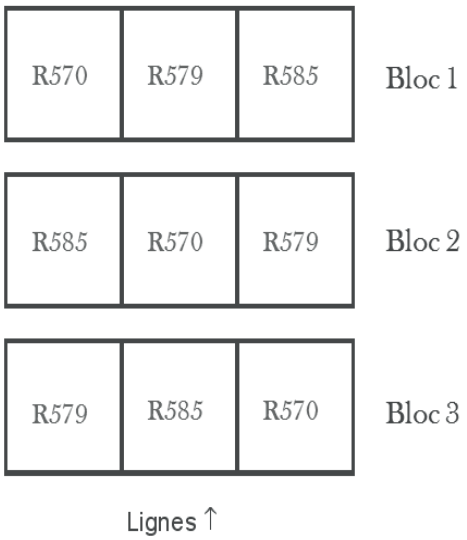
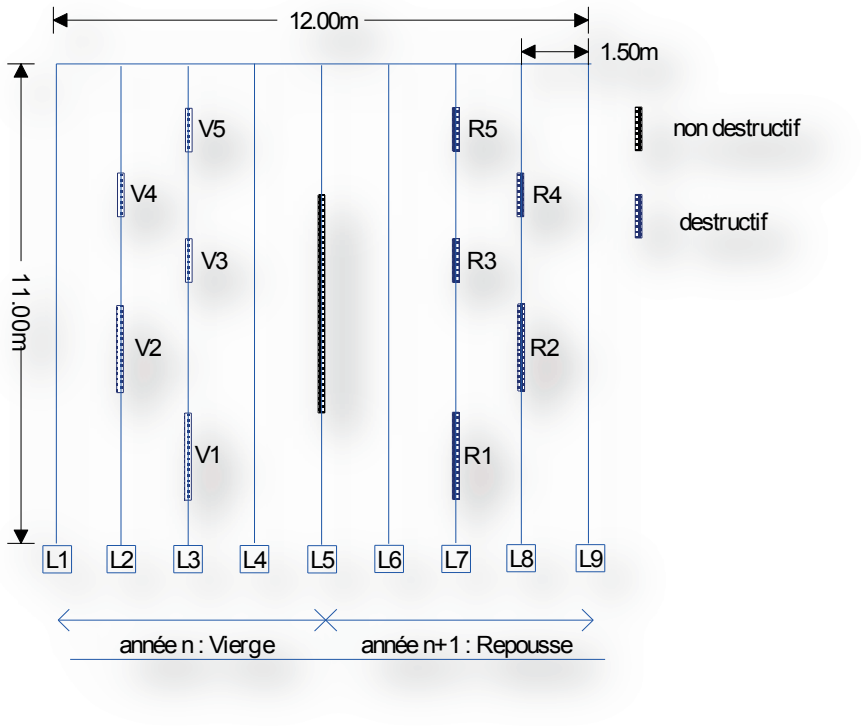


Figure 2.3 Schéma d'une parcelle élémentaire et plan d'échantillonnage



L1 à L9 = lignes de canne, V1 à V5 et R1 à R5 = échantillonnages destructifs réalisés en vierge et première repousse respectivement.

Les essais sont entourés de 3 lignes de bordures et munis d'allées situées entre chaque bloc pour faciliter l'accès aux parcelles élémentaires lors des campagnes d'échantillonnages et de mesures non destructives.

2.1.1.3 Mesures non destructives

Les mesures non destructives sont réalisées sur la ligne L5 au cours des 2 cycles de culture (Figure 2.1). Elles consistent à dénombrer les talles émises depuis la levée jusqu'à la stabilisation du tallage. Après la levée on identifie 5 tiges primaires sur lesquelles on dénombre les feuilles émises et mortes. On mesure également la hauteur de ces 5 tiges du sol jusqu'au dernier ocréa visible (*terminal visible dewlap* = TVD). Les dénombrements et les mesures sont réalisés avant chaque date d'observation et du début jusqu'à la fin du cycle de culture.

2.1.1.4 Echantillonnages destructifs

Les échantillonnages destructifs sont réalisés sur des lignes différentes, selon le cycle de culture (à gauche en vierge et à droite en première repousse), situées de part et d'autre de la ligne L5.

L'année n (vierge ou plantation), les prélèvements de biomasse sont effectués sur les lignes L2 et L3, et l'année n+1 sur les lignes L7 et L8 de chaque parcelle élémentaire (Figure 2.1).

Des placettes, de 2 m linéaires pour la première date d'échantillonnage puis de 1 m linéaire pour les autres dates d'échantillonnages, sont identifiées et récoltées à fréquence régulière (2 mois).

Les prélèvements de biomasse sont réalisés en alternance temporelle et en décalage spatial sur les lignes L2 et L3 en vierge, et L7 et L8 en première repousse. On procède de cette façon pour éviter les effets dus à une plus grande exposition lumineuse (surplus de rayonnement) au niveau des placettes coupées par rapport à l'ensemble de la parcelle.

Les premières placettes échantillonnées en vierge et en première repousse sont localisées dans les lignes L3 et L7 respectivement, et positionnées à environ 1 m du début de la ligne correspondante. Les deuxièmes placettes échantillonnées sont situées dans les lignes L2 et L8 en vierge et en première repousse respectivement, à une distance d'environ 0,5 à 1 m après la placette précédemment récoltée (Figure 2.3).

2.1.1.5 Partition de la biomasse aérienne fraîche en ses composantes anatomiques

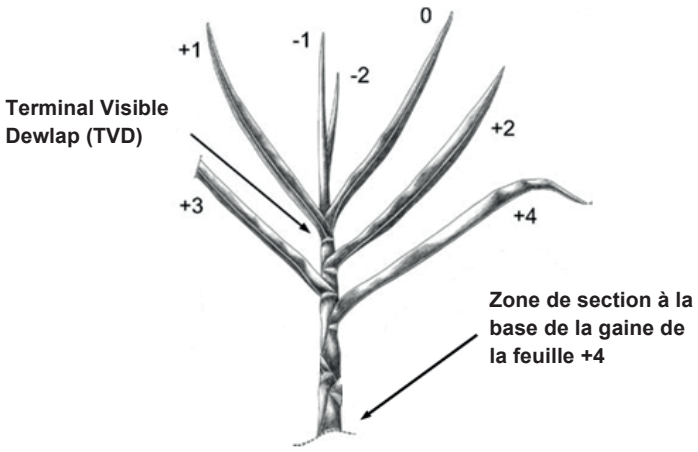
Dans tous nos essais on s'intéressera uniquement à la partition de la biomasse aérienne (biomasse aérienne = biomasse totale – biomasse souterraine). La biomasse aérienne est composée par les parties aériennes des organes de la plante (feuilles et tiges) eux mêmes composés par des fractions anatomiques (feuilles = limbes vivants + gaines + feuilles mortes,

et tiges = tige usinables + tiges sommitales). La biomasse aérienne va donc être partitionnée selon ces 5 composantes anatomiques.

Au champ, on procède de la manière suivante pour récolter et partitionner les échantillons de biomasse provenant de chacune des placettes situées dans les parcelles élémentaires des essais :

- premièrement on prélève les feuilles mortes tombées au sol et on coupe l'ensemble des tiges présentes sur la placette,
- on sépare les tiges des feuilles mortes encore adhérentes à la tige,
- les feuilles mortes adhérentes sont additionnées aux feuilles mortes prélevées au sol,
- les feuilles vivantes adhérentes situées en dessous de la 4ème feuille ligulée (Figure 2.4) sont séparées des tiges,
- la tige usinable (partie inférieure de la tige dont la croissance est achevée) est séparée de la tige sommitale (partie supérieure de la tige toujours en croissance ou méristème) par section. La limite fixée entre la tige usinable et la tige sommitale est le nœud situé à la base de la gaine de la 4ème feuille ligulée (Figure 2.4). Cette limite est déterminée comme étant le point de rupture naturel des tiges ou comme la zone qui détermine la séparation entre les entre-nœuds qui ont achevé leur croissance et ceux encore en croissance (Martiné, 2003 ; Rae et al., 2006).

Figure 2.4 Système de numérotation des feuilles (Kuijper, 1915)

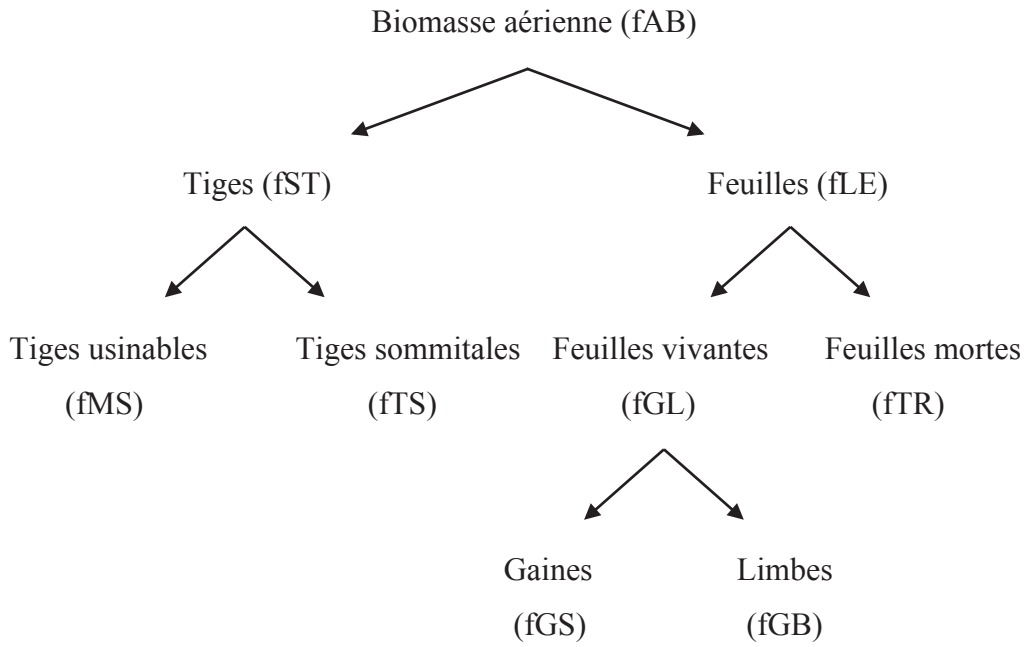


- la tige sommitale est ensuite débarrassée de ses limbes vivants sans hotter les gaines et les feuilles vertes enroulées situées à son extrémité, que l'on appelle communément « fouet »,
- les limbes vivants adhérents prélevés sur la tige sommitale sont incorporés aux feuilles vivantes provenant de la tige usinable,

- les feuilles totales correspondent à la somme des feuilles mortes et des feuilles vivantes,
- on partitionne enfin les feuilles vivantes en gaines et limbes vivants.

La biomasse aérienne a donc été partitionnée en 5 composantes anatomiques (Figure 2.5) qui sont pesées individuellement en frais pour chaque placette.

Figure 2.5 Partition de la biomasse aérienne fraîche (fAB) en ses composantes anatomiques



Tiges (fST) = Tiges usinables (fMS) + Tiges sommitales (fTS), Feuilles (fLE) = Feuilles vivantes (fGL) + Feuilles mortes (fTR) et Feuilles vivantes (fGL) = Limbes (fGB) + gaines (fGS).

2.1.2 Traitement des échantillons

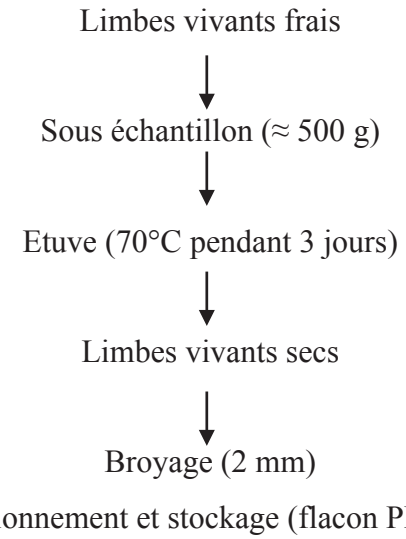
2.1.2.1 La biomasse résiduelle

Les tiges sommitales (fTS) et les feuilles (fLE) sont les composantes anatomiques qui constituent la biomasse résiduelle. Pour chaque composante anatomique de la biomasse résiduelle on prélève un sous échantillon d'environ 500 g qui sera traité selon les étapes décrites ci-après :

- les sous échantillons sont pesés en frais, placés dans une étuve ventilée à 70°C pendant 3 jours et pesés à poids constant,
- ils sont broyés à l'aide d'un broyeur à couteaux (Thomas Willey ®) munit d'une grille de tamisage de porosité 2 mm,

- les broyats sont conditionnés dans des flacons hermétiques en polyéthylène (PE) de 250 ml à double capuchonnage,
- une fois conditionnés les échantillons sont stockés en chambre froide à 4°C avant d'être analysés (Figure 2.6).

Figure 2.6 Chaîne de traitement des échantillons issus des différentes fractions de la biomasse résiduelle de canne à sucre, exemple des limbes vivants.



2.1.2.2 La tige usinable

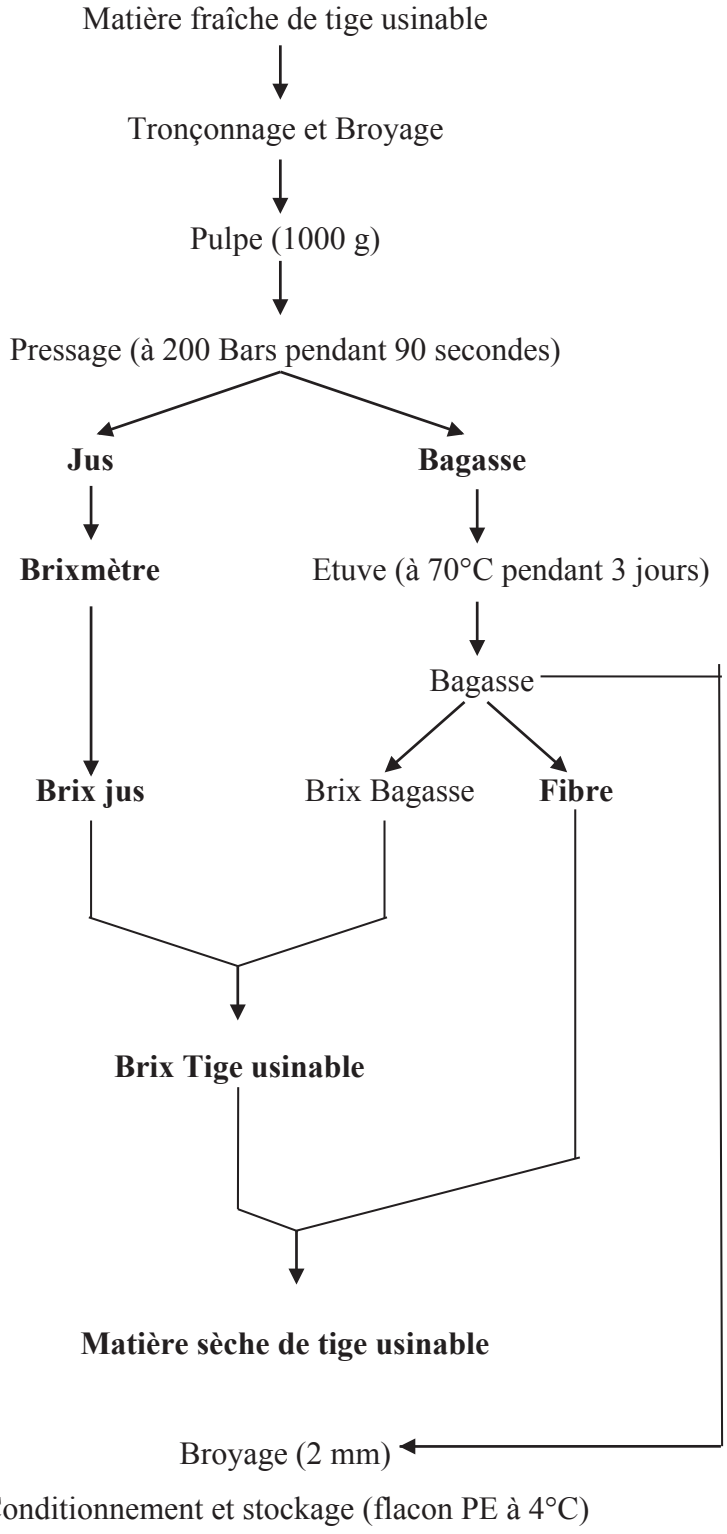
La tige usinable nécessite des étapes de traitement supplémentaires comparativement aux composantes anatomiques constitutives de la biomasse résiduelle. Ces étapes de traitement supplémentaires sont effectuées par le centre de sélection d'eRcane et sont décrites ci-après :

- les tiges usinables sont découpées en tronçons à l'aide d'un « hache canne »,
- elles sont ensuite défibrées à l'aide d'un désintégrateur de type Jeffco ® pour obtenir de la tige broyée que l'on appelle pulpe de canne,
- on prélève un sous échantillon de 1000 g de pulpe de canne,
- le sous échantillon de pulpe de canne est pressé à l'aide d'une presse hydraulique de type Emidecaux® à une pression constante de 200 bars pendant 90 secondes,
- après pressage on obtient séparément du jus et un tourteau de bagasse.

Des analyses pour mesurer le Brix et le Pol, ainsi que d'autres composantes qualitatives (pH, protéines, acides aminés,…) sont réalisées sur le jus. Le Brix ne nous donne qu'une

approximation de la totalité de la fraction soluble de la tige usinable (Berding et al., 2010). En effet, il reste une part du Brix, que contient réellement la tige usinable, dans le tourteau de bagasse (Figure 2.7).

Figure 2.7 Chaîne de traitement des échantillons de tiges usinables



Les étapes de traitement des échantillons de tiges usinables qui suivent sont identiques à celles appliquées aux échantillons de biomasse résiduelle :

- les tourteaux de bagasse sont placés dans une étuve ventilée à 70°C pendant 3 jours et pesés à poids constant,
- ils sont ensuite broyés à l'aide d'un broyeur à couteaux (Thomas Willey ®) à travers une grille de tamisage de porosité 2 mm,
- les broyats sont conditionnés dans des flacons hermétiques en polyéthylène de 250 ml à double capuchonnage,
- les échantillons sont ensuite stockés en chambre froide à 4°C avant d'être analysés (Figure 2.7).

2.2 METHODES ANALYTIQUES

La méthode de référence, développée par van Soest et Wine (1967), et utilisée pour l'analyse de la composition chimique de nos échantillons de canne à sucre est lourde et coûteuse. De plus, elle nécessite l'utilisation de réactifs chimiques nocifs pour l'opérateur et polluants pour l'environnement. Cette méthode n'est donc pas adaptée à l'analyse d'un grand nombre d'échantillons.

Pour pallier cet obstacle analytique, nous avons choisi une méthode d'analyse alternative rapide et non destructive, la spectroscopie de réflexion dans le proche infrarouge (SPIR). Cependant, avant d'être utilisée, la méthode SPIR nécessite une phase de calibration qui passe par l'acquisition de données de référence.

Au cours des deux cycles de cultures consécutifs, les échantillonnages réalisés sur nos parcelles expérimentales nous avons recueilli 1710 échantillons. Parmi la totalité des échantillons nous en avons sélectionné 228 pour être analysés par la méthode de référence développée par van Soest et Wine (1967). Nous avons utilisé cette méthode de référence pour doser des composantes d'intérêts dans le but de créer une base de calibration propre à la canne à sucre. Cette base de calibration nous a ensuite servi à l'étalonnage de la méthode d'analyse par SPIR qui présente les avantages d'une méthode de dosage adaptée à l'analyse d'un grand nombre d'échantillons. Le développement de cette méthode nous a conduits à calibrer et à valider un modèle de prédiction de la composition chimique d'échantillons de biomasse de canne à sucre et nous a ainsi permis de doser l'ensemble de nos échantillons.

2.2.1 Méthode de référence : fractionnement biochimique séquentiel « Van Soest »

La méthode de fractionnement biochimique utilisée pour doser nos échantillons de canne à sucre a été mise au point et décrite par van Soest et Wine (1967) puis reprise et formalisée par Mertens et al., (2002). Cette méthode a été développée et utilisée en premier lieu pour déterminer la valeur alimentaire ainsi que la digestibilité de fourrages destinés à l'alimentation animale. Si nous avons fait ce choix c'est parce que cette méthode a pour principal avantage d'être séquentielle. Par « séquentielle » on entend qu'à partir d'un même échantillon elle permet obtenir l'ensemble des fractions constitutives de la matière sèche d'une matrice végétale (Figure 2.8).

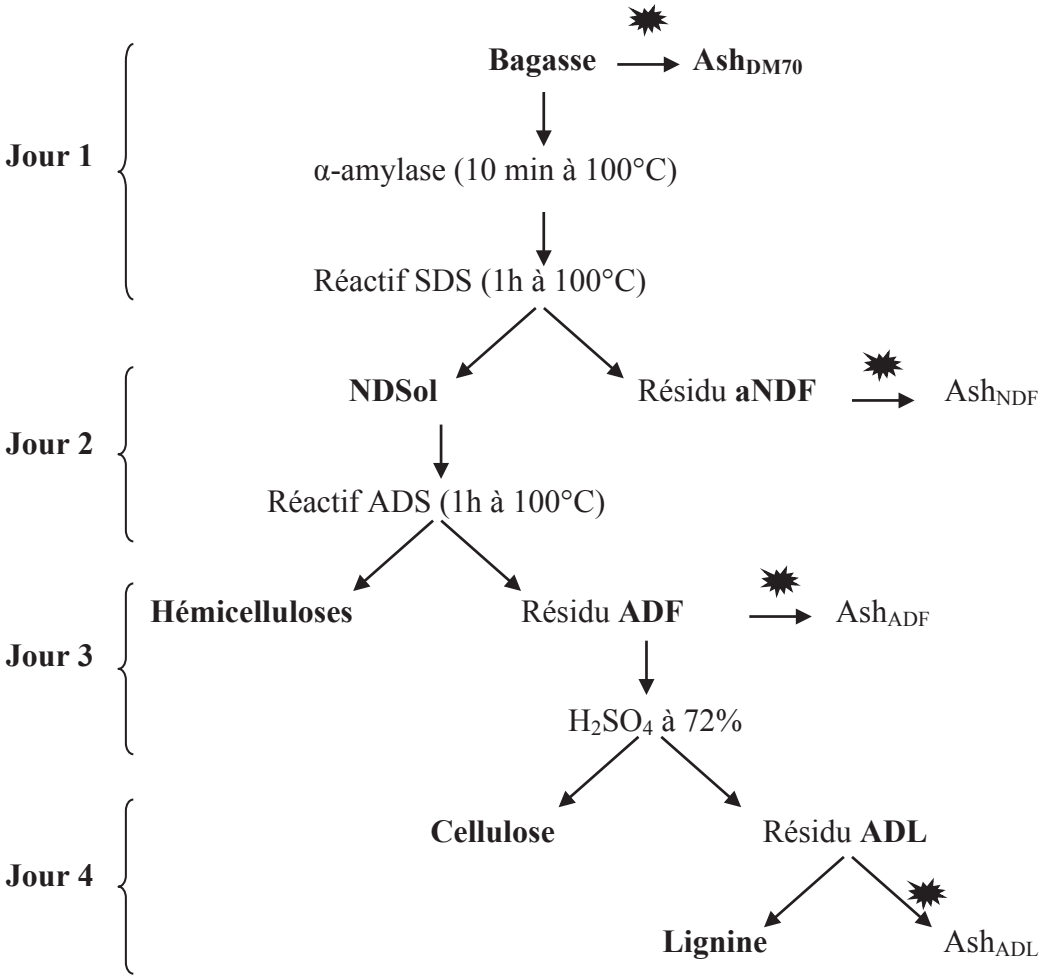
2.2.1.1 Principe de la méthode

La méthode comprend 4 phases faisant intervenir différents réactifs et traitements sur la matrice à fractionner :

- en préalable à la première étape, les échantillons doivent subir un traitement à l'α-amylase ce qui permet de se prémunir de la présence d'amidon pouvant perturber l'analyse. Par convention la dénomination du résidu obtenu après traitement à l'α-amylase sera précédé d'un « a ». La première étape consiste à plonger les échantillons (4 répétitions par échantillon), préalablement séchée à 70°C pendant une nuit (DM_{70}), dans une solution détergente (réactif NDS = Neutral Detergent Soluble) de pH neutre pendant 1 heure à 100°C. Cette première étape permet de solubiliser la fraction métabolique (i.e. contenu cellulaire) que l'on appelle par convention NDSol (Neutral Detergent Solubles). Après un rinçage à l'eau puis à l'acétone et séchage pendant une nuit à 70°C on obtient un résidu non soluble (i.e. polysaccharides structuraux) correspondant aux parois cellulaires (fibres) que l'on appelle par convention résidu aNDF (Neutral Detergent Fiber traité à l'α-amylase).
- l'étape 2 permet de solubiliser les hémicelluloses contenues dans le résidu NDF (3 répétitions par échantillon car une répétition est utilisée pour déterminer la fraction de cendre du résidu aNDF, Ash_{NDF}). Pour cela on plonge le résidu aNDF dans une solution détergente acide (ADS = Acid Detergent Soluble) contenant 12% d'acide sulfurique (H_2SO_4) pendant 1 heure à 100°C. Après un rinçage à l'eau puis à l'acétone et séchage pendant une nuit à 70°C on obtient un résidu appelé par convention ADF (Acid Detergent Fiber) constitué essentiellement de cellulose et de lignine.

- l'étape 3 permet de solubiliser la cellulose contenue dans le résidu ADF (2 répétitions par échantillons car une répétition est utilisée pour déterminer la fraction de cendre du résidu ADF, Ash_{ADF}). Pour cela on plonge le résidu ADF dans une solution d'acide sulfurique concentrée à 78% pendant 3 heures à température ambiante. Après un rinçage à l'eau puis à l'acétone et séchage pendant une nuit à 70°C on obtient un résidu que l'on appelle par convention ADL (Acid Detergent Lignin) constitué essentiellement de lignine.
- la dernière étape va consister à calciner le résidu ADL à 600°C pendant 5 heures (2 répétitions par échantillons). On obtient ainsi les cendres correspondantes au résidu ADL (Ash_{ADL}). En plus de cette dernière étape de calcination nous avons réalisé une calcination sur nos matrices non fractionnées (Ash_{DM70}) (Figure 2.8).

Figure 2.8 Chaîne de traitement des échantillons par fractionnement biochimique séquentiel de type « van Soest », l'exemple de la bagasse.



= Calcination au four à moufle à 600°C pendant 5h

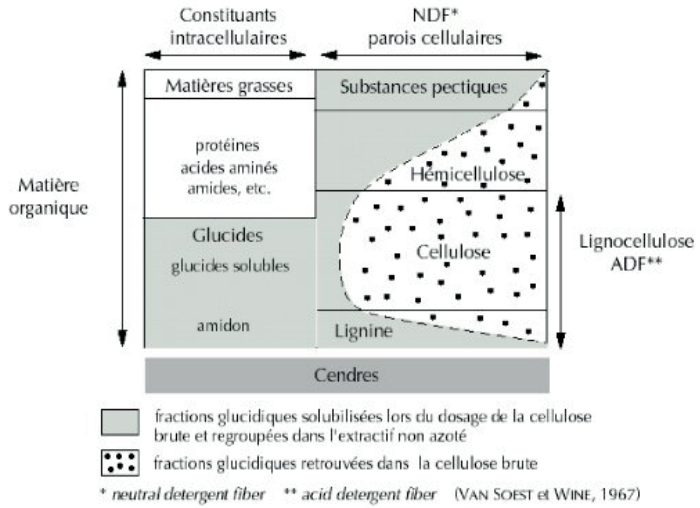
Les différentes fractions biochimiques présentées ci-dessus (Figure 2.8) sont corrigées des cendres et calculées comme suit :

NDSol = (DM_{70} – Ash_{DM70}) – (aNDF – Ash_{NDF})
$aNDF_{om}$ = (aNDF – Ash_{NDF})
ADF_{om} = (ADF – Ash_{ADF})
Hemicellulose = $aNDF_{om}$ – ADF_{om}
Cellulose = ADF_{om} – (ADL – Ash_{ADL})
Lignine = (ADL – Ash_{ADL})

2.2.1.2 Avantage et inconvénients

L'aspect séquentiel de la méthode de fractionnement biochimique de type « van Soest » est le seul avantage à noter. En effet, le protocole expérimental à mettre en œuvre est lourd et couteux en temps et en consommables. Il est possible d'analyser au maximum 30 échantillons par semaine sur la base de 4 répétitions par échantillon. La préparation des réactifs nécessite également l'utilisation de produits chimiques dangereux (corrosifs et toxiques) pour l'opérateur mais également polluants si ils venaient à être rejetés dans l'environnement. De plus, au-delà des aspects purement opératoires, la méthode souffre d'un manque de précision dans le dosage des résidus NDF et ADF, comme le souligne Jung, 1997, dans son étude comparative des principales méthodes de dosage de la fibre et des composantes pariétales.

Figure 2.9 Fractionnement biochimique de la matière organique (van Soest et Wine, 1967)



NDF (neutral detergent fiber) = résidu fibreux non soluble dans les détergents neutres, ADF (acid detergent fiber) = résidu fibreux non soluble dans les détergents acides.

2.2.2 Méthode alternative : spectroscopie de réflexion dans le proche infrarouge (SPIR)

Le développement de méthodes alternatives appliquées à la canne à sucre et la mise au point d'un modèle de prédiction par SPIR ont conduit à l'écriture de deux articles (cf. chapitre 3). Ainsi, dans cette partie nous nous attacherons uniquement à décrire le principe de la méthode SPIR ainsi que les avantages et les inconvénients qu'elle présente.

La SPIR est une technique analytique basée sur le principe d'absorption des rayonnements infrarouges par la matière organique. L'absorption étant liée à la composition chimique des échantillons, on peut estimer cette dernière par la simple mesure de l'absorption de lumière par l'échantillon. Cette mesure se fait avec un spectromètre soit en « transmission » (on mesure la lumière traversant un échantillon de faible épaisseur), soit et c'est notre cas, en « réflexion » (on mesure la lumière réfléchie par un échantillon épais).

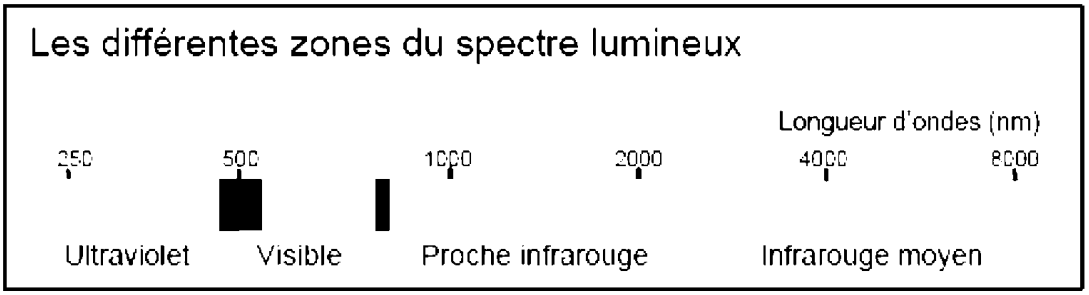
La SPIR nécessite cependant une phase d'étalonnage (ou « calibration ») basée sur des mesures de référence obtenues en laboratoire (e.g. composition chimique) et l'établissement de modèles mathématiques qui permettront de relier le spectre infrarouge aux résultats de ces mesures. Dans cette étude nous l'utilisons pour estimer la teneur en fibre (NDF) et en composantes lignocellulosiques (hémicellulose, cellulose et lignine) d'échantillons pulvérulents provenant de différentes composantes anatomiques de la biomasse de canne à sucre.

2.2.2.1 Principe de la méthode

On appelle « infrarouge » le rayonnement correspondant aux longueurs d'onde directement supérieures à celles du spectre de la lumière visible. Conventionnellement les limites du proche infrarouge se situent entre 800 et 2500 nm. L'absorption des rayonnements par les échantillons dépend de la composition de la matière organique. En effet les liaisons chimiques sont capables d'absorber les rayonnements correspondant à certaines fréquences particulières. C'est cette propriété des liaisons chimiques de la matière organique que va utiliser la spectroscopie dans le proche infrarouge pour établir un lien entre l'absorption de la lumière et la composition de l'échantillon.

Pour faire cette analyse, l'échantillon va être éclairé à différentes longueurs d'onde. L'absorption de la lumière à chacune de ces longueurs d'onde constitue le « spectre » de l'échantillon. Ce spectre peut être constitué de plusieurs centaines de longueurs d'onde ou pour chacune desquelles on a mesuré l'absorption de la lumière. Le spectre est caractéristique d'un échantillon car il regroupe des informations (quantité et caractéristiques) de chacun de ses constituants organiques (fibres, composantes lignocellulosiques, solubles, etc.).

Figure 2.10 zonage du spectre lumineux et longueurs d'ondes correspondantes



2.2.2.2 Avantages et inconvénients

La méthode est rapide car quelques minutes suffisent pour recueillir le spectre d'absorption d'un échantillon qui servira ensuite à la prédiction de sa composition chimique.

Elle est non destructive car l'échantillon est récupéré intact après analyse. Cette propriété est particulièrement importante pour des échantillons très peu abondants ou que l'on doit conserver pour des analyses ultérieures.

Elle ne nécessite pas une grande quantité d'échantillon, 4 à 5 grammes suffisent pour une prise de spectre. La principale limite à la réduction des quantités de prise d'essai est l'obtention d'un échantillon représentatif du produit à analyser.

Elle est peu onéreuse, hormis l'investissement initial dans l'appareil et la constitution des « calibrations » pour chaque produit, le coût de passage des échantillons est très faible. Il est également conseillé de prévoir quelques analyses de référence au laboratoire pour vérifier que la calibration reste correcte au cours du temps et quelle reste adaptée aux échantillons passés en analyse de routine.

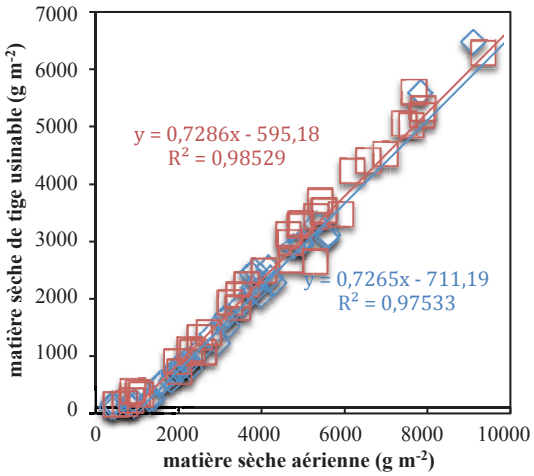
Cependant il faut savoir que la SPIR ne peut généralement pas être utilisée pour estimer les substances minérales, puisqu'elle est basée sur l'absorption du rayonnement par les molécules organiques. Egalement dans la plupart des cas, les substances présentes à l'état de traces ne peuvent pas être prédites par la technique car le signal spectral leur correspondant est trop faible (limite de détection de l'ordre de 1 ppm).

2.3 VALIDATION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

L'expérimentation sur canne à sucre est extrêmement lourde et nécessite une main d'œuvre importante. Pour ces raisons nous avons fait le choix de réaliser nos échantillonnages sur 1 m linéaire. Toutefois, nous voulons nous assurer que notre protocole expérimental et que les mesures d'état du couvert (rendement en biomasse et taux de partition de la biomasse en ces composantes), réalisées sur des échantillons de petites tailles, sont représentatifs en ce qui concerne l'aspect qualitatif (proportion des composantes anatomiques) de l'état du couvert dans nos parcelles.

La validation de notre protocole expérimental est une étape primordiale qu'il convient de réaliser en préalable à l'utilisation des données mesurées pour répondre aux questions d'ordre agronomiques (cf. Chapitre 4.a), physiologiques (cf. Chapitre 4.b) et aux besoins de la modélisation (cf. Chapitre 5). Pour cela, nous avons comparé nos données d'état du couvert observées sur 1 m linéaire (relation entre matière sèche aérienne et matière sèche de tige usinable) à celles observées, lors d'études conduites en agronomie et modélisation, sur de plus grandes placettes (supérieures ou égales à 3 m linéaires). D'après un test statistique de comparaison nous pouvons affirmer que les données mesurées sont significativement similaires (Figure 2.11). Ainsi, nos données de partition mesurées sur un petit échantillon sont représentatives de l'état du couvert de nos parcelles et ne modifie en rien la répartition de la biomasse aérienne entre ses différentes composantes anatomiques.

Figure 2.11 Validation du protocole expérimental par analyse statistique comparative. En bleu données provenant de divers essais (échantillonnages sur placettes supérieures ou égale à 3 m linéaires), en rouge données issues de nos essais (échantillonnages sur placettes de 1 m linéaire).



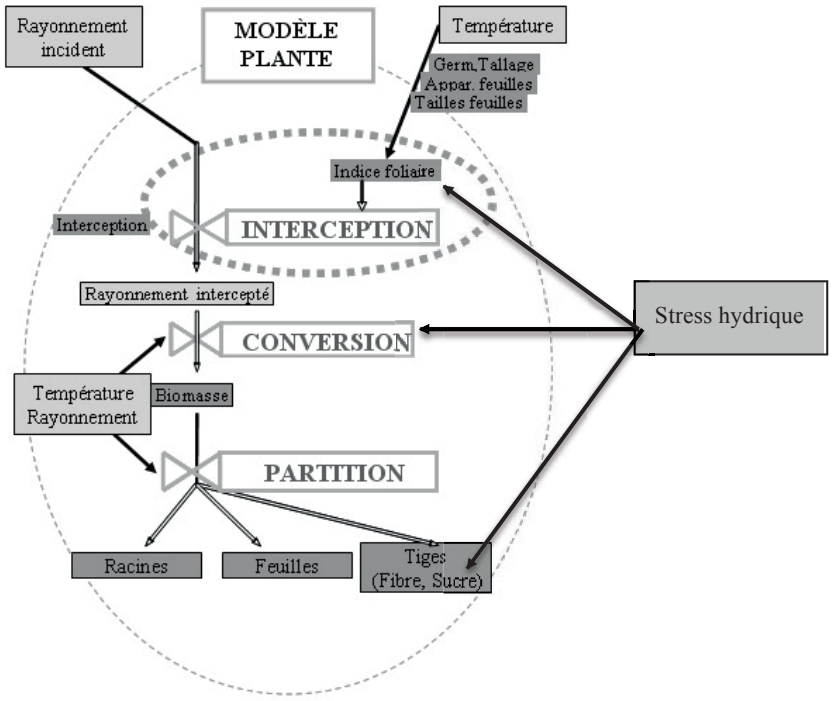
2.4 DESCRIPTION DU MODELE DE CROISSANCE « MOSICAS »

Le modèle de croissance « Mosicas » est composé de 2 modules dynamiques à pas de temps journalier : un module de bilan hydrique et un module de croissance. Le module de croissance est organisé selon trois processus de fonctionnement :

- **interception** (ei) du rayonnement utile incident (PAR) par l'indice foliaire (Lai) permettant de calculer le rayonnement utile intercepté (PARi). Le Lai est modélisé en fonction de la température et du déficit hydrique de croissance,
- **conversion** du rayonnement utile intercepté (PARi) en matière sèche totale puis aérienne (dAB) en utilisant un taux de conversion (RUE max) du rayonnement intercepté en biomasse,
- **partition** de la matière sèche aérienne (dAB) en ses différentes composantes : feuilles, tiges et sucres (Figure 2.12).

Le modèle et son fonctionnement sont décrit plus en détail dans le *proceeding* présenté par Martiné et al., 2002 au *10ème Congrès STASM* et dans la thèse de Martiné (2003).

Figure 2.12 Schéma simplifié décrivant les principaux processus, flux, états et variables de forçage intégrés dans le module de croissance de « Mosicas ».



Le module d'interception du modèle « Mosicas » est de type Big Leaf. Ce qui signifie que les apparitions et croissances d'organes individuels (tiges, limbes) bien qu'implémentées ne servent pas pour calculer le Lai. Le stress hydrique est prit en compte et intervient au niveau (i) du calcul du Lai, (ii) de la conversion, et (iii) de la partition de tige en sucre. La partition de la tige ne va que vers le sucre, la fibre indiquée est constituée de la fibre vraie et des solubles différents du saccharose.

2.5 DESCRIPTION DU MODULE « STRUCTURE & QUALITÉ » INCORPORÉ AU MODÈLE DE CROISSANCE « MOSICAS »

Tableau 2.1 Le module « structure et qualité » : processus, équations, mesures à effectuer et paramètres à déterminer (en italiques). Les définitions des variables et paramètres sont mentionnées dans le glossaire.

PROCESSUS	**EQUATIONS**	**REFERENCES**	**MESURES**	**PARAMETRES** à déterminer
CROISSANCE				
Phénologie	Calcul de l'âge thermique de la culture (TTAB) et de la tige usinable (TTMS) : (1) TTAB = ∑(T° moyenne journalière – T° de base) – *laideb* (2) TTMS = TTAB – *pMS*	Martiné, 2003	TTAB	*pMS* *laideb*
Calcul de l'indice foliaire, interception, conversion et partition de la biomasse totale en biomasse racinaire et aérienne	Calcul de la biomasse aérienne (dAB) : Les 14 équations (7-20) utilisées, sont identiques à celles décrites dans la thèse de Martiné, 2003.	Martiné, 2003	dAB	*ruemax* *laideb* *laicroi*
PARTITION				
Anatomie				
Partition de la dAB vers les tiges usinables	Calcul de la matière sèche de tige usinable (dMS) : (3) MS = dAB*(1- exp(-*MSk* / (10^3)*TTMS)) (4) dMS = dAB*MS	Martiné, 2003	dAB dMS	dAB *MSk*
Partition de la dAB vers les feuilles mortes	Calcul de la matièresèche de feuillemorte : (5) TR = *TRa**TTAB/(*TRb* + TTAB) (6) dTR = TR*dAB		dAB dTR	*TRa* *TRb*
Structure				
Partition de la dMS vers les fibres NDF	Calcul de la matière sèche de fibre dans les tiges usinables : (7) NDFMS= *NDFMSa* + *NDFMSb**exp(-*NDFMSk**TTMS) (8) dNDFMS = NDFMS*dMS		dMS dNDFMS	*NDFMSa* *NDFMSb* *NDFMSk*
Partition de la dTR vers les fibres NDF	Calcul de la matière sèche de fibre dans les feuilles mortes : (9) dNDFTR = *NDFTR**dTR		dTR dNDFTR	*NDFTR*
Partition de la dAB vers les fibres NDF	Calcul de la matière sèche de fibre dans la matière sèche aérienne : (10) NDFAB = *NDFABa* + *NDFABb**exp(-*NDFABk**TTAB) (11) dNDFAB = NDFAB*dAB		dAB dNDFAB	*NDFABa* *NDFABb* *NDFABk*

PROCESSUS	**EQUATIONS**	**REFERENCES**	**MESURES**	**PARAMETRES** à déterminer
Lignocellulose				
Partition de la dNDFMS vers la lignine	Calcul de la matière sèche de lignine dans la fibre de tige usinable : (12) LIGNDFMS = *LIGNDFMSa**exp(-*LIGNDFMSb**(*LIGNDFMSk*^TTMS)) (13) dLIGNDFMS = LIGNDFMS*dNDFMS		dNDFMS dLIGNDFMS	*LIGNDFMSa* *LIGNDFMSb* *LIGNDFMSk*
Partition de la dNDFMS vers l'holocellulose (hémicellulose et cellulose)	Calcul de la matière sèche d'holocellulose dans la fibre de tige usinable : (14) dHOLNDFMS = dNDFMS - dLIGNDFMS		dNDFMS dHOLNDFMS	
Partition de la dNDFTR vers la lignine	Calcul de la matière sèche de lignine dans la fibre de feuille morte : (15) dLIGNDFTR = *LIGNDFTR**dNDFTR		dNDFTR dLIGNDFTR	*LIGNDFTR*
Partition de la dNDFTR vers l'holocellulose(hémicellulose et cellulose)	Calcul de la matière sèche de lignine dans la fibre de feuille morte : (16) dHOLNDFTR = dNDFTR - dLIGNDFTR		dNDFTR dHOLNDFTR	
Partition de la dNDFAB vers la lignine	Calcul de la matière sèche de lignine dans la fibre de la matière sèche aérienne : (17) LIGNDFAB= *LIGNDFABa**exp(-*LIGNDFABb**(*LIGNDFABk*^TTAB)) (18) dLIGNDFAB = LIGNDFAB*dNDFAB		dNDFAB dLIGNDFAB	*LIGNDFABa* *LIGNDFABb* *LIGNDFABk*
Partition de la dNDFAB vers l'holocellulose	Calcul de la matière sèche de lignine dans la fibre de la matière sèche aérienne : (19) dHOLNDFAB = dNDFAB - dLIGNDFAB		dNDFAB dHOLNDFAB	

2.5.1 Phénologie et conversion

2.5.1.1 Age thermique de la tige usinable

L'âge thermique de la tige usinable TTMS correspond à une somme de températures simulée par le modèle « Mosicas » depuis l'apparition de la tige usinable. Dans le modèle « Mosicas », l'apparition de la tige usinable (*pMS*) dépend (i) soit de la quantité de matière sèche aérienne dAB formée à l'apparition de tige usinable (d'après Martiné, (2003) cette quantité est égale à 425 g m^{-2} de matière sèche aérienne), (ii) soit d'une différence de températures entre levée et apparition tige usinable. Dans cette étude l'âge thermique de la tige usinable TTMS utilisé correspond à la différence entre les sommes de température (en base 12, température de base du phyllochrone) entre la levée TTAB et apparition tige usinable (*pMS*). La différence de température entre levée et apparition tige usinable est le paramètre de calage *pMS* (éq. 1 et 2 Tableau 2.1).

2.5.1.2 Rendement matière sèche aérienne

Le calcul de la biomasse aérienne (dAB) nécessite 14 équations présentes dans le module de croissance de « Mosicas » (Martiné, 2003 p. 40-41, Tableau 2, équations 7 à 20). Les équations utilisées pour simuler la quantité de dAB, sont identiques à celles décrites par Martiné, (2003).

2.5.2 Partition de la biomasse aérienne en composantes anatomiques

2.5.2.1 Partition de la matière sèche aérienne vers la tige usinable

La formation de la tige usinable débute lorsque la somme de température TTMS devient positive ou que TTAB ≥ *pMS*. La fraction de dAB allouée à la tige usinable MS est une fonction asymptotique de la somme de température TTMS (éq. 3 et 4 du tableau 2.1). Nous avons choisi le même type de fonction que Martiné, 2003.

2.5.2.2 Partition de la matière sèche aérienne vers les feuilles mortes

L'apparition des feuilles mortes a lieu dès la levée ou dès l'apparition de biomasse aérienne. La fraction de dAB allouée aux feuilles mortes TR est une fonction asymptotique de la somme des températures depuis la levée ou l'apparition de biomasse aérienne TTAB (éq. 5 et 6 du tableau 2.1).

2.5.3 Partition des composantes anatomiques de la biomasse aérienne en fibre

2.5.3.1 Partition des tiges usinables vers les fibres

La biomasse de tiges usinables est répartie entre ses structures (NDFibre ou polysaccharides structuraux) et la totalité de la matière sèche soluble du jus (Brix), les solubles présent dans la bagasse après pressage (NDSolubles bagasse) et les minéraux (Ash bagasse). Dans cette partie nous ne traiterons que du formalisme correspondant aux structures des tiges usinables.

La fraction de dMS allouée aux structures NDFMS est une fonction asymptotique de la somme des températures atteinte depuis l'initiation de la tige usinable TTMS (éq. 7 et 8 du tableau 2.1). Le formalisme décrivant la partition de la tige usinable vers les structures est différent de celui utilisé dans la version de « Mosicas » présentée par Martiné (2003). En effet, dans la précédente version du modèle les structures sont constituées par la fibre, les sucres réducteurs et les minéraux ce qui est différent des structures réelles. Toutefois, la précédente version du modèle prend en compte deux paramètres, l'état hydrique du couvert et une température seuil d'élongation (environ 20 °C), que nous n'avons pas implémenté dans le nouveau module de partition inclut dans « Mosicas ». Nonobstant l'utilité de ces deux paramètres pour coller au plus proche de la réalité de l'état du couvert et des conditions climatiques, ceci nécessite un modèle à incrément dynamique journalier. Or, notre formalisme n'opère, pour le moment, qu'en cumulatif et n'offre donc pas la possibilité de tenir compte des variabilités journalières de satisfaction hydrique du couvert et de fluctuation thermique.

2.5.3.2 Partition des feuilles mortes vers les fibres

Comme pour la tige usinable nous ne traiterons que du formalisme correspondant aux structures des feuilles mortes. La fraction de dTR allouée à la fibre NDFTR est une fonction linéaire de dTR (éq. 9 du tableau 2.1).

2.5.3.3 Partition de la matière sèche aérienne vers les fibres

Là encore comme pour la tige usinable nous ne traiterons que du formalisme correspondant aux structures de la matière sèche aérienne. La fraction de dAB allouée aux structures NDFAB est une fonction asymptotique de la somme des températures depuis la levée TTAB (éq. 10 et 11 du tableau 2.1).

2.5.4 Partition des fibres en composantes lignocellulosiques

Les structures des tiges usinables, des feuilles mortes et de la matière sèche aérienne sont réparties entre deux principales composantes lignocellulosiques, l'holocellulose (i.e. hémicellulose + cellulose) et la lignine.

2.5.4.1 Partition des fibres de tige usinable vers les composantes lignocellulosiques

La fraction de dNDFMS allouée à la lignine LIGNDFMS est une fonction asymptotique de la somme des températures atteintes depuis l'initiation de la tige usinable TTMS (éq. 12 et 13 du tableau 2.1). La somme des fractions des composantes lignocellulosiques allouées aux structures de tiges usinable est obligatoirement égale à 1. Ainsi, même si la fraction de la dNDFMS allouée à l'holocellulose a été mesurée, la masse sèche d'holocellulose des tiges usinables dHOLNDFMS est calculée par simple différence entre dNDFMS et dLIGNDFMS (éq. 14 du tableau 2.1).

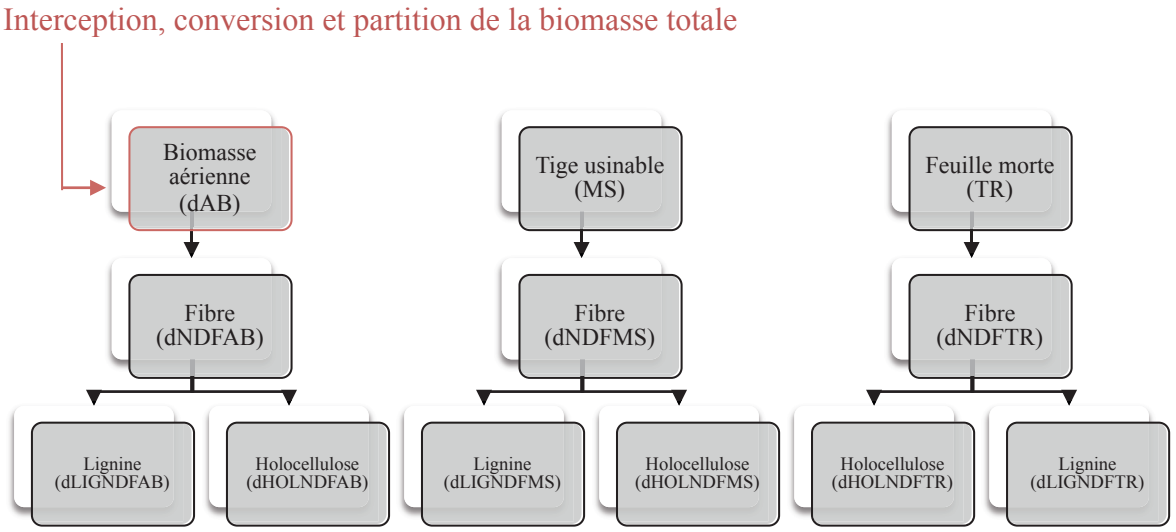
2.5.4.2 Partition des fibres des feuilles mortes vers les composantes lignocellulosiques

La fraction de dNDFTR allouée à la lignine LIGNDFTR est une fonction linéaire de dNDFTR (éq. 15 du tableau 2.1). La somme des fractions allouées aux composantes lignocellulosiques des feuilles mortes est obligatoirement égale à 1. Ainsi, la masse sèche d'holocellulose des feuilles mortes dHOLNDFTR est calculée par simple différence entre dNDFTR et dLIGNDFTR (éq. 16 du tableau 2.1).

2.5.4.3 Partition de la matière sèche aérienne vers les composantes lignocellulosiques

La fraction de dNDFAB allouée à la lignine LIGNDFAB est une fonction asymptotique de la somme des températures depuis la levée TTAB (éq. 17 et 18 du tableau 2.1). La somme des fractions des composantes lignocellulosiques allouées aux structures de la matière sèche aérienne est obligatoirement égale à 1. Ainsi, la masse sèche d'holocellulose de la matière sèche aérienne dHOLNDFAB est calculée par simple différence entre dNDFAB et dLIGNDFAB (éq. 19 du tableau 2.1).

Figure 2.13 Schéma simplifié décrivant la partition des composantes de la biomasse aérienne du nouveau module « structure et qualité » intégrés dans le module de croissance de « Mosicas ». En rouge formalisme déjà présent dans la précédente version de « Mosicas ».



CHAPITRE 3.
DOSAGE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA BIOMASSE DE CANNE À SUCRE PAR SPECTROSCOPIE DE RÉFLEXTION DANS LE PROCHE INFRAROUGE

3A. QUALITÉ DE LA PRÉDICTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA BIOMASSE DE CANNE À SUCRE PAR SPECTROSCOPIE DE RÉFLEXION DANS LE PROCHE INFRAROUGE : INFLUENCE DE LA TAILLE DES PARTICULES D'ÉCHANTILLONS PULVÉRULENTS

Ce chapitre correspond à l'article publié dans la revue *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, intitulé « *Near Infrared Reflectance calibration optimization to predict lignocellulosic compounds in sugarcane samples with coarse particle size* ». L'objectif de cet article étant de présenter une méthode qui permette d'optimiser la calibration de modèle de prédiction de la composition chimique d'échantillons pulvérulents de biomasse de canne à sucre par spectroscopie de réflexion dans le proche infrarouge. Cette optimisation de la calibration est possible en évaluant statistiquement la meilleure combinaison entre traitement mathématique et correction de la réflexion spéculaire.

Cette partie est primordiale dans le déroulée de cette thèse. Elle a permit d'éviter une étape de broyage supplémentaire (traitement lourd et fastidieux) pour la quasi totalité de nos 1710 échantillons avant leur analyse. C'est une avancée méthodologique qui permettra à bon nombre de spectroscopiste un gain de temps considérable d'autant que c'est un problème récurent dans la mise au point de modèle proche infrarouge de prédiction.

Near Infrared Reflectance calibration optimization to predict lignocellulosic compounds in sugarcane samples with coarse particle size

Damien Sabatier[a,§], Pierre Dardenne[b] and Laurent Thuriès[c]

[a]CIRAD, UPR SCA, F-97494 Sainte-Clotilde, La Réunion, France
[b]CRA-W, Quality of Agricultural Products Department, Chaussée de Namur n°24, 5030 Gembloux, Belgium
[c]CIRAD, UPR Recyclage et Risque, F-97408 Saint-Denis, La Réunion, France

[§]email: damien.sabatier@cirad.fr

Summary:

Frequent variations in spectral intensity due to particle size and/or of particle size distribution are observed in plant products processed in powder form and scanned with near infrared reflectance (NIR). In this study, two grinders, with differences in time consumption, practicality and providing homogenates with different particle size range and distribution, were tested to evaluate their effects on NIR spectra. Optimization of NIR calibration was necessary before predicting lignocellulosic compounds in sugarcane (*Saccharum spp.*) samples with coarse particle size to supply a pre-existing ecophysiological growth model. Sixty samples from three varieties grown in four contrasted pedoclimatic areas and from five anatomical parts were scanned and analyzed by biochemical fractionation. Different calibration methods resulting in a combination of multiple linear regression (MLR) technique applied to three calibration sets (fine, coarse and mixed particle sizes) treated with six data pretreatments, first derivative (D), second derivative (D²), multiplicative scatter correction (MSC), standard normal variate and detrend (SNVD), standard normal variate and detrend successively followed by first derivative (SNVD-D) or second derivative (SNVD-D²) were investigated. Best NIR model statistical values were obtained by calibration developed on a mixed calibration set treated by SNVD-D². Results confirmed that NIR spectroscopy could be an accurate and efficient method to predict lignocellulosic compounds in different botanical parts of sugarcane samples to supply an ecophysiological growth model.

Keywords:

near infrared spectroscopy, calibration, spectral pretreatment, grinding methods, particle size, chemical composition, sugarcane

3.1. INTRODUCTION

Near infrared reflectance (NIR) spectroscopy is currently used for the rapid determination of chemical compounds in granular or powdered samples.[1] However, for products scanned in powder form, the optical thickness cannot be controlled by the operator; it depends on the granular distribution of the particles of the ground matrix. Moreover, samples with coarser particle size appear to have a more intense spectrum, primarily due to specular reflection.[2] Blanco et al[3] reported that there is a decrease in spectral reproducibility with an increase in the particle size of the sample. Williams and Thompson[4] have demonstrated that the most important factors affecting the accuracy of NIRS in the analysis of hard red spring wheat were mean particle size and particle size distribution. Osborne et al[5] reported that the effects of particle size and particle size distribution were quantitatively the most important factors in NIR spectra. Dhanoa et al[6] showed that the diversity of material particle size affected scattering and was a major source of variation in NIR spectra.

Significant number of studies conducted on the effect of particle size over recent years underlined that Barnes et al[7] have pointed out as a long-standing problem, continues to be a problem during NIR calibration. These studies can be divided into two broad categories: those linked to the development of NIR models for the determination of physical characteristics such as particle size[8-11] ; and others focused on the effect of particle size on spectral data acquisition.[12-20] NIR calibration involves maximizing the desired signal and minimizing the unwanted signal.[1] In our study, the effect of particle size was considered to be an unwanted signal because it may mask the chemical information contained in raw NIR spectra. Norris and Williams[12] reported that normalized second derivative treatment of spectral data best predicted the protein content of samples with widely varying particle size. These authors also demonstrated that including particle size variation in the calibration samples improved predictions. In fact, different methods of normalizing or "correcting" (i.e. pretreatment of) spectra are used in NIR calibration to remove physical information such as the particle size of products in powder form.[5-7,12,21-24] To date no study has been conducted on sugarcane and no model of prediction of lignocellulosic compounds in sugarcane samples from different botanical parts has been developed. The primary aim of this study was to investigate two different grinding methods both for their advantages, and to evaluate their effects on NIR spectra. The second aim was to develop an optimum calibration by combination of multivariate analysis, data pretreatments and calibration sets, to predict lignocellulosic compounds of sugarcane samples with a wide range in particle size. Finally, we wanted to know if we could predict, without loss of accuracy, lignocellulosic compounds in different

botanical parts of sugarcane samples prepared using a faster and convenient grinding method resulting in coarser particle size to use them to supply a sugarcane growth model[25].

3.2. MATERIALS AND METHODS

3.2.1. Experimental sugarcane samples

The study was based on 60 samples of three sugarcane varieties (*Saccharum spp.*) from Reunion Island (R570, R579 and R585). These three varieties are highly variable in their agronomic characteristics. They were grown in four different areas of La Reunion Island and harvested at different physiological ages (200 to 298 days after planting). After harvesting, the whole plants were separated into five anatomical fractions (millable stalk, top of the stalk, green leaf blade, green leaf sheath and trash) that increased the variability of the samples (Table 1). It results from these sampling campaigns 60 samples = 3 varieties * 4 sites * 5 anatomical fractions.

After separation, approximately 15 kg of millable stalk were roughly crushed with a cutter grinder (JEFFCO Cutter Grinders, model L118C, JEFFRESS Engineering Pty Ltd, Dry Creek, Australia) to obtain sugarcane pulp. A subsample of 1000 g of sugarcane pulp was weighed and pressed for 1.5 minutes at 200 bars with a hydraulic press (Pinette Emidecau press model OB-103, Pinette Emidecau Industries, Chalon sur Saone, France). After crushing and pressing, a filter press cake of bagasse was obtained. The other anatomical parts were simply chopped to facilitate drying. The whole filter press cake of bagasse and a 500 g subsample of each of the other anatomical parts were dried for 3 days at 70 °C in a ventilated incubator to obtain dry matter at a constant weight (DM).

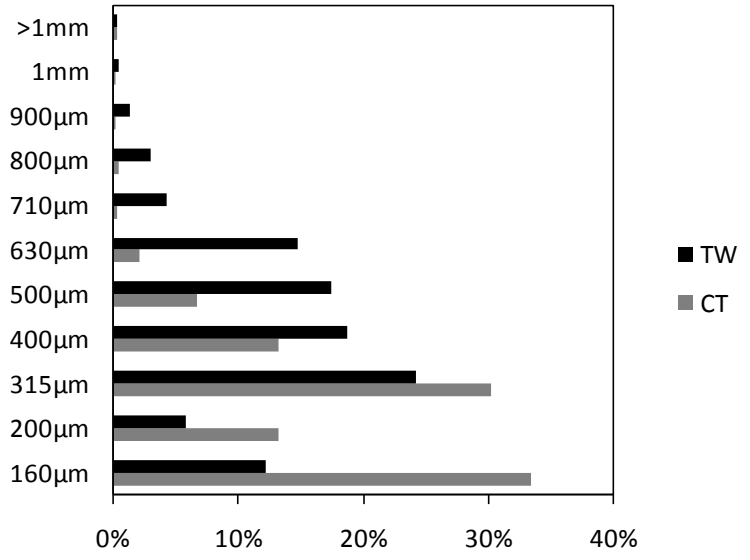
3.2.2. Grinding methods

Once the samples were dried, they were first ground with a Thomas Willey™ (TW) knife crusher (Swedesboro, NJ, USA) to pass through a 2 mm screen and then a subsample of each samples ground with TW were ground with a Foss - cyclone crusher Cyclotec™ (CT; Nanterre, France) through a 1 mm screen as recommended for subsequent fiber analyses by Van Soest and Wine[26]. Grinding time was 1 min for both methods. Mean particle size of the TW and CT samples were respectively 428 and 286 µm. The elementary particles of TW samples were mainly coarse and of varying size, ranging from up to 1 mm to 160 µm ; and CT samples varied in a more narrow range of size, from 630 µm to 160 µm (Figure 3.1).

3.2.3. Chemical analysis

Only CT samples were analyzed according to the method reported by Van Soest et al[27] and reviewed by Mertens et al[28]. CT samples were successively extracted for neutral detergent fiber (NDF) with alpha amylase, acid detergent fiber (ADF), and acid detergent lignin (ADL). To remove residual humidity before and at each extraction step, the raw matrix and the products obtained were dried at 70 °C overnight and weighed. Then the raw matrix and each product was ignited gradually by raising the temperature to 525 °C and maintaining it for five hours to measure ash content (Ash, Ash_{NDF}, Ash_{ADF} and Ash_{ADL} respectively) in order to calculate ash free lignocellulosic fractions (NDF_{om}, ADF_{om} and Lig).

Figure 3.1. Particle size distribution of sugarcane samples ground by using different grinding methods. TW = Thomas Willey™ knife crusher through a 2 mm screen and CT = Cyclone crusher Cyclotec™ through a 1 mm screen



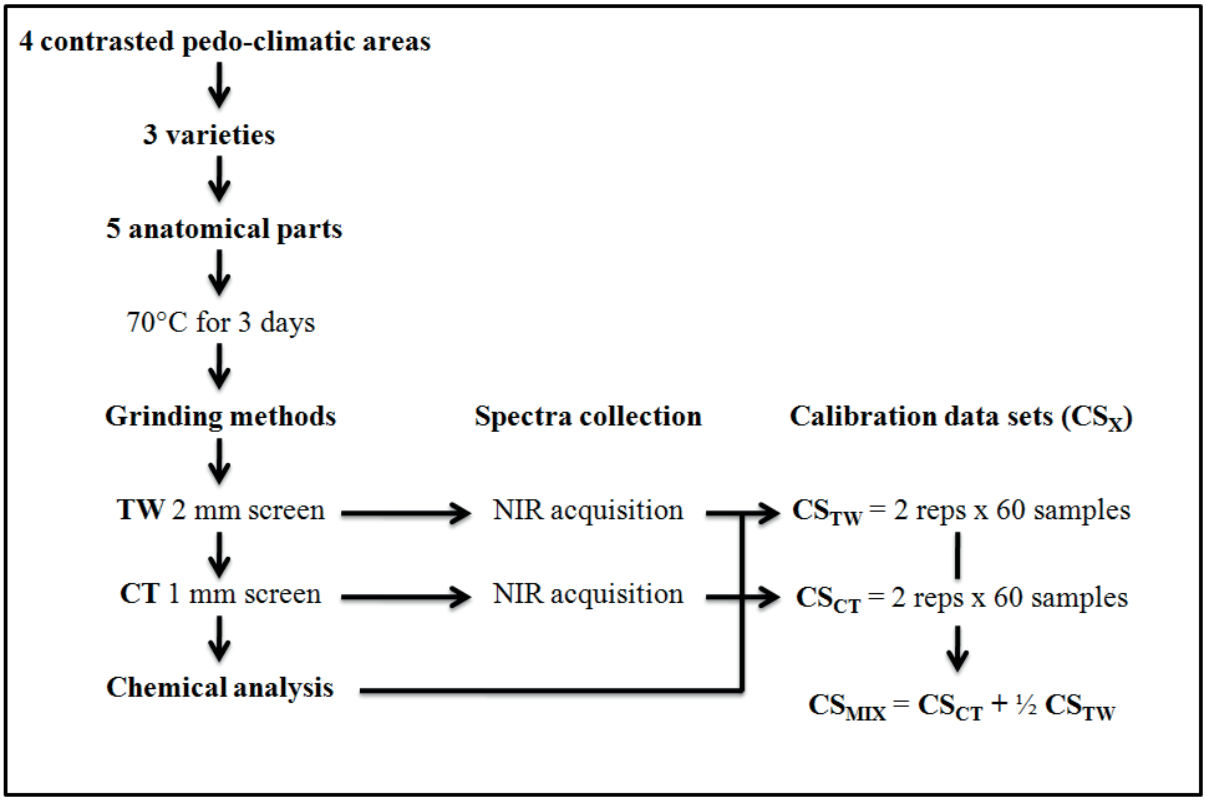
3.2.4. Spectra collection

Two replicates of TW and CT samples were packed into circular cups (50 mm in diameter) closed with a cardboard lid, then scanned in reflectance mode on a monochromator spectrometer (NIRS XDS, Silver Spring, MD, USA). Spectra were obtained for each replicate at 2 nm intervals over the 400-2498 nm wavelength. The spectra were recorded as log 1/reflectance (log 1/R). Each sample was scanned twice (two different cup fillings) and spectra were averaged for each sample and saved in a different file for each grinding method (TW and CT sets). TW and CT sets were used in the calibration sets CS_{TW} and CS_{CT}

respectively (Figure 3.2). A third calibration set (CS_{MIX}) was made by mixing the CS_{CT} with 30 samples chosen at random in CS_{TW} to include wide variations in particle size in CS_{CT} (ratio 2CT:1TW).

Principal components (PC) were computed on TW and CT sets to define the optical properties of the samples, and the Mahalanobis distance of each spectrum was calculated with respect to the average spectra. The aim of this analysis is to evaluate population structuring, and in the present study it was used as a preliminary way to see whether the grinding methods had a segregating effect on the spectra of the sugarcane samples.

Figure 3.2. Flowchart of experimental procedures used for each sample, spectra collection and calibration sets (CS_X).



3.2.5. Optimization of calibration method

3.2.5.1 Data pretreatment

At the first step of optimization six pretreatments were tested: first derivative (D), second derivative (D^2), multiplicative scatter correction (MSC), standard normal variate and detrend (SNVD)[7], standard normal variate and detrend successively followed by first derivative (SNVD-D) or second derivative (SNVD-D^2). Spectral pretreatment and multiple linear regression (MLR) were performed with the WIN-ISI 3 software (Infrasoft International, Port

Matilda, PA, USA) package. Seven MLR calibrations with same number of terms were developed on CS_{CT} without pretreatment and treated with the above 6 pretreatments. The standard error of calibration (SEC), the coefficient of determination of calibration (R^2_C), the predicted error sum of squares (PRESS), the coefficient of determination of cross-validation (R^2_{CV}) and the ratio performance to deviation for cross-validation ($RPD_{CV} = (1/\sqrt{(1- R^2_{CV})})$ as described by Dardenne[29] were used to evaluate the performance of each MLR calibration. The method described by Fearn[30] was used to evaluate which pretreatment method(s) led to the significantly lowest overall SEC.

3.2.5.2 Calibration sets

The second step of optimization consists in the comparison of statistical values from calibration models ($Model_{CT}$, $Model_{TW}$ and $Model_{MIX}$) developed on each calibration set (CS_{CT}, CS_{TW} and CS_{MIX} respectively) pretreated with the most effective pretreatment determined at the first step of optimization. Relationships were developed by regressing the observed chemical values against the three calibration sets using the MLR regression technique. The accuracy of each calibration with same number of terms was assessed by, SEC, R^2_C, PRESS, R^2_{CV} and RPD_{CV}.

3.2.6. Validation of calibration method

The last step consists in an independent validation of the 3 calibration models ($Model_{CT}$, $Model_{TW}$ and $Model_{MIX}$) developed at the second step on 3 validation sets (VS_{CT}, VS_{TW} and VS_{MIX}). Each validation set was made of 20 sugarcane samples not used for calibration, chosen at random and collected on the same experimental sites at a different harvest time (Table 1). Validation set VS_{MIX} was obtained by mixing 10 samples randomly chosen in VS_{CT} and VS_{TW} respectively. These three calibration models were evaluated, as recommended by Dardenne[29], by using prediction parameters such as the standard error of prediction (SEP), coefficient of determination of prediction (R^2_P), bias (Bias) and average global H (Av. GH).

3.3. RESULTS AND DISCUSSION

Preparing samples, in particular using fine grinding, is costly and time consuming. We propose an optimum calibration method by using a faster treatment of samples used for NIRS analysis. We first present the results of a small economic study to compare the two grinding methods. At the experimental station, sugarcane samples are routinely ground with the coarse-grinding TW because of its convenience and rapidity to process a large number of samples

(the treatment of each sample takes about five minutes). Even though the CT is very efficient in providing homogeneous samples, it is still necessary to pre-grind the samples with the TW, which is time consuming (using the fine-grinding CT, the treatment of each sample takes about 10 minutes). A high number of samples underlined the need for NIR calibration optimization to predict lignocellulosic compounds in sugarcane samples prepared using a faster method resulting in a wider and coarser particle size.

3.3.1. Chemical composition of sugarcane samples

Table 1 shows the characteristics of the 60 samples from different anatomical fractions of the sugarcane plant. Samples originated from (i) 3 contrasted varieties, (ii) planted in 4 pedoclimatic environments and (iii) harvested at different times. These factors contribute to a wide range of chemical compositions in the resultant database.

Chemical composition analysis of sugarcane has particularly focused on sugarcane bagasse[31-37] and few studies[38] have dealt with other anatomical parts. Results presented by others[31-37] are closer to those presented in Table 3.1. An average of 34% and 45% were measured in sugarcane bagasse against ranges from 23 to 32% and from 32 to 58% for hemicellulose (hemicellulose = NDF_{om} – ADF) and cellulose (cellulose = ADF_{om} – ADL) respectively. The lignin content (Lig) of our sugarcane bagasse samples was lower (4.6% to 7.0%, average 5.5%) than values reported in the literature[31-37] (18% to 28%). Table 1 shows wide variations in chemical composition between different anatomical parts. Sharma et al[38] also reported that between the stalk and leaf sheath. However, these authors[39] found lower NDF, ADF and Lig contents than ours in the leaf sheath. Differences in the chemical composition of the same anatomical parts may be caused by (i) natural variability between varieties, ages or pedo-climatic growth conditions, (ii) variations in the characteristics of the sample (e.g. between industrially processed bagasse and sugarcane stalk prepared in the laboratory) and (iii) problems due to the method used (different protocols or difficulties in separating lignocellulosic compounds without spoiling them).

Table 3.1. Description and chemical composition of the experimental sugarcane (*Saccharum sp.*) samples from 4 contrasted pedoclimatic areas of Reunion Island collected in 2009 including both calibration and validation sets

Sugarcane samples				Chemical composition %DM							
Botanical parts	Varieties			NDF_{om}		ADF_{om}		Lig		Ash	
	R570	R579	R585	Mean ± SD	Range	Mean ± SD	Range	Mean ± SD	Range	Mean ± SD	Range
Calibration Set											
Trash	4	4	4	73.9 ± 4.0	64.3-78.8	41.4 ± 2.4	35.8-45.1	4.5 ± 0.6	3.2-5.5	9.4 ± 4.1	4.0-17.4
Green leaf blade	4	4	4	73.5 ± 1.8	70.6-76.3	38.9 ± 1.3	36.2-41.0	3.6 ± 0.4	2.9-4.1	6.3 ± 1.4	4.4-8.5
Green leaf sheath	4	4	4	75.1 ± 3.4	69.7-80.3	41.9 ± 2.3	38.1-46.7	5.8 ± 1.2	4.1-7.8	8.0 ± 2.5	4.7-13.7
Bagasse	4	4	4	84.6 ± 3.1	78.1-88.8	50.7 ± 3.3	46.5-55.1	5.5 ± 0.8	4.6-7.0	1.8 ± 0.5	1.1-2.8
Top of the stalk	4	4	4	64.3 ± 4.6	55.9-69.1	36.2 ± 2.5	31.7-39.3	3.0 ± 1.0	1.2-4.1	9.2 ± 1.4	5.9-10.7
Validation Set											
Trash	2	2	2	74.0 ± 1.8	70.7-76.0	41.9 ± 1.9	39.7-45.1	4.4 ± 0.4	4.0-4.9	9.9 ± 3.0	4.0-12.0
Green leaf blade	2	1	1	72.9 ± 2.3	70.6-75.8	38.3 ± 1.5	36.2-39.7	3.4 ± 0.6	2.9-4.1	6.0 ± 1.1	5.0-7.4
Green leaf sheath	2	1	-	73.6 ± 3.4	69.7-75.7	41.7 ± 2.8	39.3-44.7	5.7 ± 1.0	4.8-6.7	8.6 ± 1.2	7.2-9.4
Bagasse	2	-	-	87.6 ± 1.8	86.3-88.8	53.9 ± 1.0	53.2-54.7	6.8 ± 0.3	6.6-7.0	1.8 ± 0.6	1.4-2.2
Top of the stalk	1	-	4	65.1 ± 4.6	58.6-69.1	37.0 ± 2.2	34.1-39.3	3.1 ± 1.0	1.5-4.0	9.3 ± 1.5	6.8-10.5

NDF_{om} = neutral detergent fiber, ADF_{om} = acid detergent fiber, Lig = lignin-like, Ash = total ashes, SD = standard deviation.

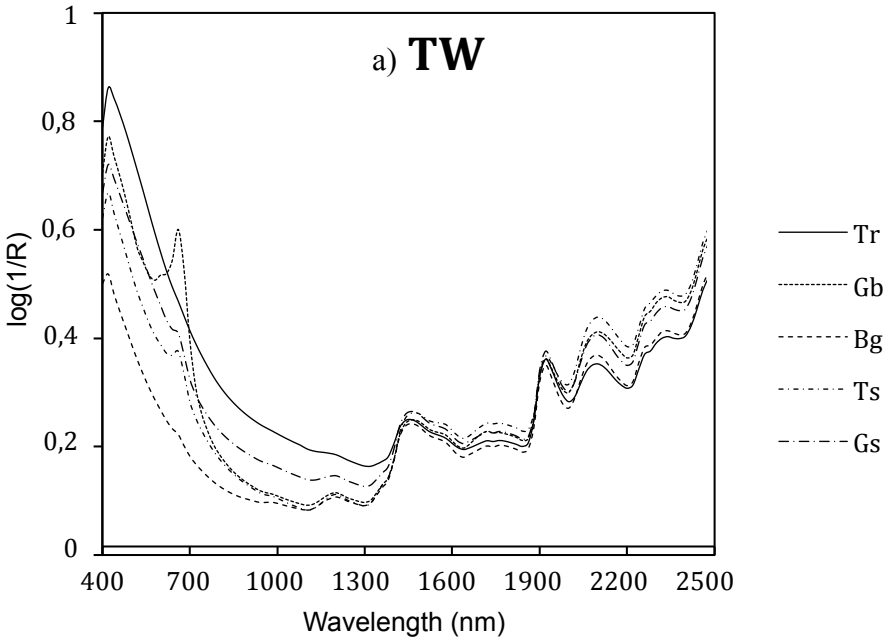
3.3.2. Spectral variability

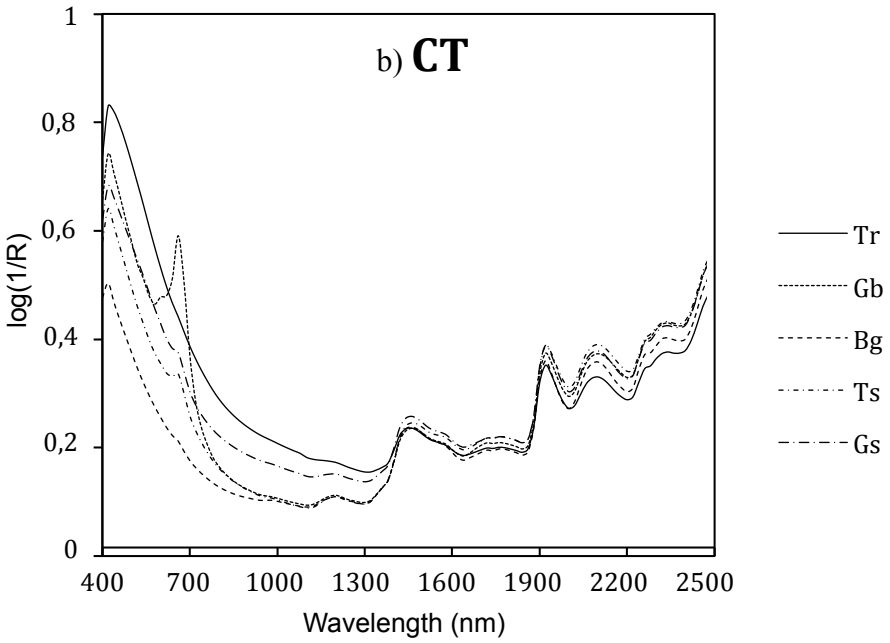
Figures 3.3a and 3.3b show the raw NIR spectra of TW and CT sets respectively. Variations in spectral intensity are clearly apparent in the two figures. To make these variations more readable, the raw NIR spectra of TW and CT sets were averaged (Figure 3.3c). TW set spectra presented more variations in spectral intensity than CT set spectra as reported by Bertrand et al[2]. However Figure 3.3c shows that variation due to grinding method is low with regard to variation due to different anatomical parts and their agro-climatic characteristics.

Figure 3.4 shows the first 2 principal components of TW and CT sets as a function of the first PC score. The samples are clearly separated according to the grinding method used. For example, samples of green leaf blade (Gb) from TW and CT sets are circled by a dotted line (Gb TW) and a solid line (Gb CT) respectively, in so doing demonstrating the effect of the grinding method on the spectral features. However, samples tended to cluster according to the anatomical part concerned. This indicates that the chemical information contained in the raw NIR spectra can be masked or modified by physical information, however anatomical and growth characteristics of samples are the main sources of variation.

Figure 3.3. Raw log 1/reflectance spectra of sugarcane samples ground using two different methods: a) TW = samples ground with a Thomas Willey^{TM} through a 2 mm screen, b) CT =

samples ground with a Cyclotec^{TM} through a 1 mm screen and c) Both = log 1/reflectance mean spectra for both methods.





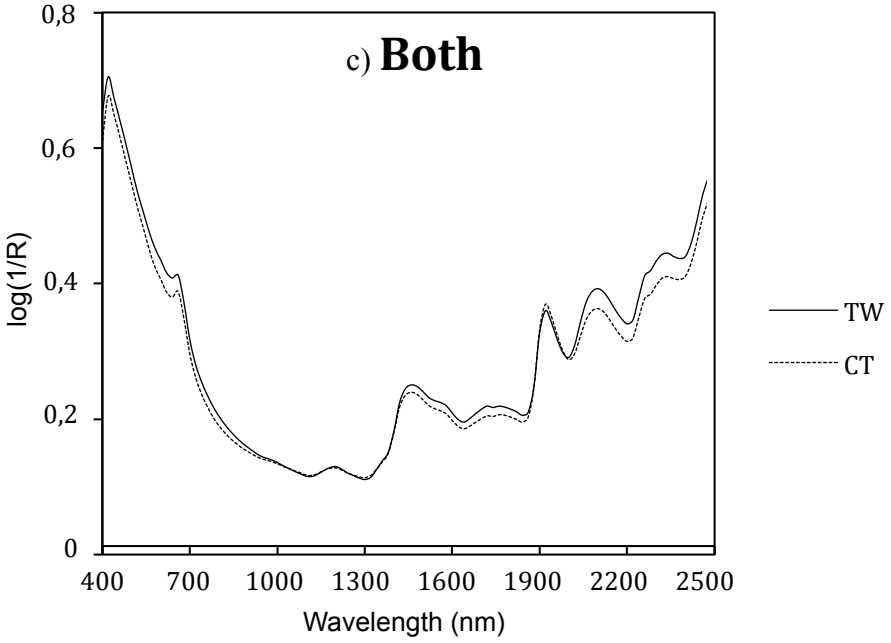
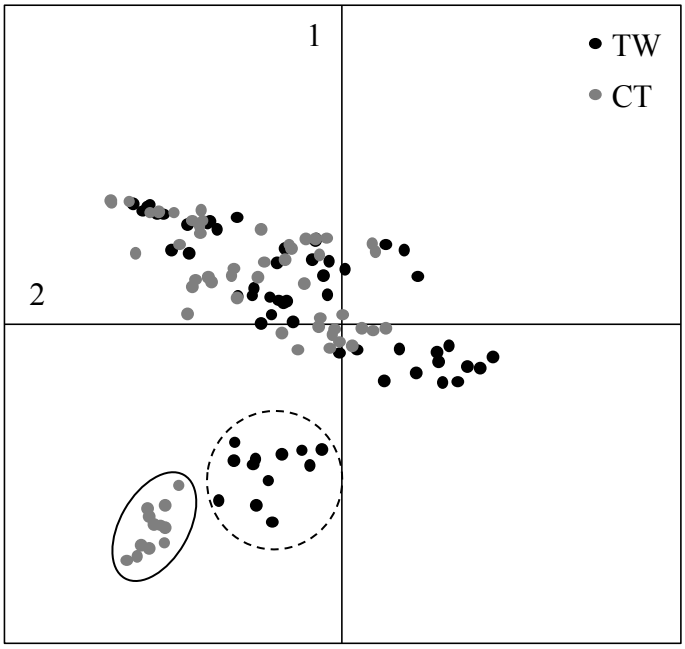


Figure 3.4. PCA of raw spectra of sugarcane samples subjected to different grinding methods: ● TW (Thomas Willey^{TM} through a 2 mm screen) and ● CT (Cyclotec^{TM} through a 1 mm screen). Samples are plotted according to the scores of PC 1 (vertical), PC 2 (horizontal). Samples of sugarcane green leaf blade (Gb) ground with TW and CT were circled by a dashed line (Gb TW) and a solid line (Gb CT) respectively to illustrate spectral dissimilarity between treatments.



3.3.3. Optimization of calibration method

3.3.3.1. Data pretreatment

Table 2 shows statistical values from the calibration and the full (leave-one-out) cross-validation parameters of a MLR model developed on the raw and pretreated CS_{CT}. To compare these statistical values we performed a paired t-test[30] which evaluates the significant differences among the six pretreatments we investigated. Significant differences were found ($P < 0.05$) between models developed on the raw and pretreated spectra for each constituent, ADF_{om} excepted. These results suggest that performance ranking of each pretreatment depends on constituent considered. However, in comparison with all pretreatment methods, SNVD-D² pretreatment produced the best calibration and cross-validation parameters for at least three out of the four variables to be predicted. These results are in agreement with results in both older and recent publications[7,12,20,22,24,39] showing that the pretreatments (SNV, Detrend and D², or their combination) performed well in calibration. So, a combination of these three pretreatments, resulting in a well known pretreatment called SNVD-D², was shown to be the most powerful pretreatment among those tested in the present study. In parallel, we obtained higher R^2_{CV} (0.95 and 0.98 for Lig and Ash respectively) than others[24] for the same variables measured on comparable plant matrix (corn and switchgrass): values ranging from 0.44 to 0.90 and from 0.62 to 0.92 for Lig and Ash respectively. Even though Liu et al[24]'s laboratory analyses resulted in a wide range of Lig and Ash contents, they had access to fewer samples with a smaller range than us, which was probably why they found lower R^2_{CV}. Besides, contrary to Liu et al[24], calibration developed on raw spectra was not always significantly different from those calibrations developed on treated spectra.

Consequently, as other authors on different matrix[20,22], we believe that the SNVD-D² pretreatment has the greatest potential for removing physical interferences in the spectra acquired on samples in powder form.

3.3.3.2. Calibration sets

Strained by the reference method[26], NIR model had to be developed using chemical data acquired on finely ground samples (CT) in order to make predictions using coarsely ground samples (TW). Table 3 shows good calibration statistics and the values obtained were better and comparable, in spite of fewer numbers of samples and narrow range, with those reported by others[39]. As expected, $Model_{CT}$ always showed higher R^2_C, R^2_{CV} and RPD_{CV}, and lower SEC and PRESS than $Model_{TW}$ (excepted for Lig). This seems logical given that the correlation level between spectral and chemical data was optimized when chemical and

spectral data were acquired on samples with the same particle size. The converse is also true excepted for Lig. We also shows that $Model_{MIX}$ improved the calibration and cross-validation parameters for two out of four variables, for example RPD_{CV} raise from 4.1 to 4.7 and from 3.3 to 4.0 for NDF_{om} and ADF_{om} respectively. However, it is not the case for Lig and Ash. These results confirmed that inclusion of samples with wide variations in particle size in calibration set improved the performance of data pretreatment as demonstrated by Norris and Williams[12]. Nevertheless, results show that calibration improvement also depends on the constituent considered.

Table 3.2. Statistical values of NIRS calibrations developed on calibration set CS_{CT} without pretreatment and treated with 6 pretreatments depending on the chemical composition of the sugarcane sample analyzed

Chemical composition %DM	**NDF_{om}**							**ADF_{om}**						
Mean	74.3							41.8						
Range	52.3-96.2							25.4-58.2						
SD	7.3							5.5						
Pretreatment	**Terms**	**SEC**	**R^2_C**	**PRESS**	**R^2_{CV}**	**RPD_{CV}**	**Rank**	**Terms**	**SEC**	**R^2_C**	**PRESS**	**R^2_{CV}**	**RPD_{CV}**	**Rank**
No pretreatment	6	1.7	0.95	1.8	0.94	4.0	bc	6	1.4	0.94	1.5	0.93	3.7	a
D	6	1.7	0.94	1.9	0.93	3.9	ab	6	1.4	0.93	1.5	0.92	3.6	a
D^2	6	1.6	0.95	1.7	0.95	4.3	bc	6	1.2	0.95	1.3	0.94	4.1	a
MSC	6	1.6	0.95	1.7	0.94	4.2	bc	6	1.2	0.95	1.4	0.94	4.0	a
SNVD	6	1.5	0.96	1.6	0.95	4.4	bc	6	1.3	0.94	1.4	0.94	4.0	a
SNVD + D	6	1.4	0.96	1.5	0.96	4.8	c	6	1.3	0.94	1.5	0.93	3.7	a
SNVD + D^2	6	1.5	0.96	1.7	0.95	4.4	bc	6	1.2	0.95	1.3	0.94	4.1	a
Chemical composition %DM	**Lig**							**Ash**						
Mean	4.5							6.9						
Range	0.4-8.6							0.0-17.8						
SD	1.4							3.6						
Pretreatment	**Terms**	**SEC**	**R^2_C**	**PRESS**	**R^2_{CV}**	**RPD_{CV}**	**Rank**	**Terms**	**SEC**	**R^2_C**	**PRESS**	**R^2_{CV}**	**RPD_{CV}**	**Rank**
No pretreatment	6	0.6	0.83	0.6	0.80	2.2	a	6	0.7	0.96	0.7	0.96	4.9	b
D	6	0.4	0.93	0.4	0.91	3.4	c	6	0.6	0.97	0.6	0.97	5.5	bc
D^2	6	0.3	0.94	0.3	0.94	4.0	cd	6	0.6	0.98	0.6	0.97	5.9	bc
MSC	6	0.3	0.95	0.3	0.94	4.0	cd	6	0.9	0.94	1.0	0.93	3.8	a
SNVD	6	0.4	0.92	0.4	0.91	3.3	b	6	0.8	0.95	0.9	0.94	4.1	a
SNVD + D	6	0.3	0.95	0.3	0.94	4.1	cd	6	0.5	0.98	0.6	0.98	6.4	c
SNVD + D^2	6	0.3	0.96	0.3	0.95	4.5	d	6	0.5	0.98	0.5	0.98	7.0	c

NDF_{om} = neutral detergent fiber, ADF_{om} = acid detergent fiber, Lig = lignin-like, Ash = total ashes, SD = standard deviation, D = derivative, D^2 = second derivative, MSC = multiplicative scatter correction and SNVD = standard normal variate and detrend, Terms = number of terms, SEC = standard error of calibration, R^2_C = correlation coefficient for calibration, PRESS = predicted error sum of squares, R^2_{CV} = correlation coefficient for cross-validation, RPD_{CV} = ratio performance to deviation for cross-validation, Rank = performance ranking of pretreatments.

Table 3.3. Statistical values of 3 NIRS calibration models ($Model_X$) developed according to a combination of 3 calibration sets (CS_{TW}, CS_{CT} and CS_{MIX}) treated with standard normal variate and detrend followed by second derivative (SNVD + D^2) and multiple linear regression (MLR) technique

$Model_x$	Constituent %DM	N	Outliers	Mean	Range	SD	Terms	SEC	R^2_C	PRESS	R^2_{CV}	RPD_{CV}
$Model_{TW}$	NDF_{om}	60	0	74.3	52.3-96.2	7.3	6	1.7	0.95	1.8	0.94	4.1
	ADF_{om}	60	0	41.8	25.4-58.2	5.5	6	1.5	0.93	1.6	0.91	3.3
	Lig	60	0	4.5	0.4-8.6	1.4	6	0.3	0.96	0.3	0.96	4.9
	Ash	60	0	6.9	0-17.8	3.6	6	0.5	0.98	0.5	0.98	6.6
$Model_{CT}$	NDF_{om}	60	0	74.3	52.3-96.2	7.3	6	1.5	0.96	1.7	0.95	4.4
	ADF_{om}	60	0	41.8	25.4-58.2	5.5	6	1.2	0.95	1.3	0.94	4.1
	Lig	60	0	4.5	0.4-8.6	1.4	6	0.3	0.96	0.3	0.95	4.5
	Ash	60	0	6.9	0-17.8	3.6	6	0.5	0.98	0.5	0.98	7.0
$Model_{MIX}$	NDF_{om}	90	0	73.7	51.0-96.4	7.6	6	1.6	0.96	1.6	0.95	4.7
	ADF_{om}	90	0	41.5	24.8-58.2	5.6	6	1.3	0.94	1.4	0.94	4.0
	Lig	90	0	4.4	0.1-8.7	1.4	6	0.3	0.96	0.3	0.96	4.7
	Ash	90	0	7.1	0-17.7	3.5	6	0.7	0.96	0.7	0.96	4.9

NDF_{om} = neutral detergent fiber, ADF_{om} = acid detergent fiber, Lig = lignin-like, Ash = total ashes, N = number of samples in calibration set, SD = standard deviation, Terms = number of terms, SEC = standard error of calibration, R^2_C = correlation coefficient for calibration, PRESS = predicted error sum of squares, R^2_{CV} = correlation coefficient for cross-validation, RPD_{CV} = ratio performance to deviation for cross-validation.

3.3.4. Validation of calibration method

Globally, Table 3.4 shows better statistical values for predictions when we considered each model independently versus its associated validation set (see grey tone compartments). As expected, $Model_{MIX}$ performs well across both VS_{TW} and VS_{CT} with regard to the others models. Moreover, inclusion of maximum variations in particle size allowed decrease in biases and better representation of the variation in particle size. In fact, we show lower biases for $Model_{MIX}$ for three out of four variables than $Model_{TW}$ and much closer Av. GH between both. On the other hand, $Model_{CT}$ fails to perform well on VS_{TW} especially in respect of ADF_{om}, Lig and Ash fractions which show elevated biases and Av. GH statistics. This suggests that samples are not represented in calibration set[29] and approaching spectral outlier status brought about by grind differences. $Model_{TW}$ presents equal and higher SEPs than $Model_{MIX}$, for Lig, NDF_{om} and ADF_{om}, respectively. R^2_P of $Model_{TW}$ are smaller than those of $Model_{MIX}$ for two out of four variables and equal for Lig. R^2_P of both models were better for NDF_{om} and Ash but smaller for ADF_{om} than those observed by Cozzolino et al[39] on maize, although our SEPs were lowest than those except for Ash. The results show that including samples with variations in particle size in calibration sets improved the prediction of

lignocellulosic compounds of sugarcane samples with coarser and wider particle size. It confirms the result of Norris and Williams[12]. Even though we tested only two grinders, our sample sets had a wider range of particle size (from 160 µm to up to 1mm) than their[12] (from 150 to 335 µm) as well as different variables to predict in different matrices. Indeed, we confirmed that improvement in prediction accuracy depends on inclusion of samples with variations in particle size in calibration sets. We also demonstrated that improvement depends on the constituent we considered which is especially true for Lig. We affirmed that $Model_{MIX}$ proved to be the best calibration model to predict lignocellulosic compounds of sugarcane samples with the coarse particle size (VS_{TW}) we investigated.

Table 3.4. Statistical values of NIRS validations according to 3 calibration models ($Model_{TW}$, $Model_{CT}$ and $Model_{MIX}$), developed on 3 calibration sets (CS_{TW}, CS_{CT} and CS_{MIX} respectively) treated with standard normal variate and detrend followed by second derivative (SNVD + D^2), tested on 3 validation sets (VS_{TW}, VS_{CT} and VS_{MIX})

	VS_X	VS_{TW}				VS_{CT}				VS_{MIX}			
$Model_X$	Chemical	NDF_{om}	ADF_{om}	Lig	Ash	NDF_{om}	ADF_{om}	Lig	Ash	NDF_{om}	ADF_{om}	Lig	Ash
$Model_{TW}$	N	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	Outliers	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mean	72.9	41.1	4.3	8.0	72.9	41.1	4.3	8.0	72.8	40.9	4.4	8.6
	Range	58.6-88.8	34.1-54.7	1.5-7.0	1.4-12.0	58.6-88.8	34.1-54.7	1.5-7.0	1.4-12.0	58.6-86.4	34.1-53.2	1.5-7.0	1.4-12.0
	SD	6.8	5.2	1.4	3.1	6.8	5.2	1.4	3.1	7.0	5.3	1.7	3.2
	SEL	0.4	0.3	0.1	0.2	0.4	0.3	0.1	0.2	0.4	0.3	0.2	0.3
	SEP	1.4	1.6	0.2	0.4	2.9	2.5	0.5	0.9	1.7	1.6	0.4	0.7
	R^2P	0.96	0.91	0.98	0.99	0.82	0.79	0.87	0.92	0.94	0.93	0.95	0.96
	Bias	0.4	0.7	0.1	-0.1	0.9	-0.2	0.1	0.4	0.7	-0.1	0.1	0.1
	Av. GH	1.0	1.0	1.0	1.1	1.6	1.4	1.8	1.9	1.2	1.0	1.2	1.2
$Model_{CT}$	N	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	Outliers	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mean	72.9	41.1	4.3	8.0	72.9	41.1	4.3	8.0	72.8	40.9	4.4	8.6
	Range	58.6-88.8	34.1-54.7	1.5-7.0	1.4-12.0	58.6-88.8	34.1-54.7	1.5-7.0	1.4-12.0	58.6-86.4	34.1-53.2	1.5-7.0	1.4-12.0
	SD	6.8	5.2	1.4	3.1	6.8	5.2	1.4	3.1	7.0	5.3	1.7	3.2
	SEL	0.4	0.3	0.1	0.2	0.4	0.3	0.1	0.2	0.4	0.3	0.2	0.3
	SEP	2.1	1.8	0.7	2.7	1.7	1.1	0.3	0.4	1.8	1.8	0.7	2.8
	R^2P	0.92	0.88	0.76	0.62	0.95	0.96	0.97	0.99	0.94	0.89	0.82	0.67
	Bias	0.1	-2.1	-0.9	3.9	0.0	0.1	0.0	0.0	-0.1	-1.0	-0.5	1.9
	Av. GH	1.5	1.9	3.2	2.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.1	1.4	1.9	1.4
$Model_{MIX}$	N	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	Outliers	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mean	72.9	41.1	4.3	8.0	72.9	41.1	4.3	8.0	72.8	40.9	4.4	8.6
	Range	58.6-88.8	34.1-54.7	1.5-7.0	1.4-12.0	58.6-88.8	34.1-54.7	1.5-7.0	1.4-12.0	58.6-86.4	34.1-53.2	1.5-7.0	1.4-12.0
	SD	6.8	5.2	1.4	3.1	6.8	5.2	1.4	3.1	7.0	5.3	1.7	3.2
	SEL	0.4	0.3	0.1	0.2	0.4	0.3	0.1	0.2	0.4	0.3	0.2	0.3
	SEP	**1.3**	**1.1**	**0.2**	**0.6**	1.9	0.9	0.2	0.7	1.0	0.8	0.3	0.7
	R^2P	**0.97**	**0.96**	**0.98**	**0.97**	0.94	0.97	0.97	0.95	0.98	0.98	0.98	0.96
	Bias	-0.2	0.1	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	-0.1	-0.2	0.2	0.0	0.0
	Av. GH	1.2	1.2	1.2	1.2	0.8	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1

NDF_{om} = neutral detergent fiber, ADF_{om} = acid detergent fiber, Lig = lignin-like, Ash = total ashes, N = number of samples in validation set, SD = standard deviation, Terms = number of terms, SEL = standard error of laboratory, SEP = standard error of prediction, R^2_P = correlation coefficient for prediction, Av. GH = average global H (Mahalanobis distance of the PLS score space from the average spectrum).

3.4. CONCLUSIONS

The SNVD-D² pretreatment enabled a significant reduction in variations in spectral intensity observed on NIR spectra of sugarcane samples caused by the grinding method. We showed that the calibration method developed on a mixed calibration set improved the prediction of lignocellulosic compounds in sugarcane samples with coarse and wide range in particle size. We also showed that improvement in prediction depends of the variable we considered. In conclusion, we confirmed that it is possible to predict - without loss of accuracy - lignocellulosic compounds in samples of all parts of the sugarcane prepared using a faster method resulting in coarse particle size. Results of this study should give NIR analysts confidence to avoid time consuming fine grinding of sugarcane samples. Moreover, NIRS on coarse-sized samples becomes an alternative technique in characterization of all parts of the sugarcane plant in ecophysiology research and growth models development[25]. With more representative calibration sets, including more samples with wider characteristics and new variables especially hemicellulose and cellulose, robust and accurate NIR models can be developed to predict lignocellulosic compounds of sugarcane for biomass quantification.

Acknowledgements:
Special thanks to the technical staff of "eRcane" experimental station for the treatment of sugarcane stalk samples. The authors would also like to thank Dr F. Chiroleu and Dr P. Letourmy for statistical advices.

Les references bibliographiques correspondant à cet article (chapitre 3A) sont présentées dans la partie bibliographie du document de these.

3B. MISE AU POINT D'UN MODÈLE DE PRÉDICTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA BIOMASSE DE CANNE À SUCRE PAR SPECTROSCOPIE DE REFLEXION DANS LE PROCHE INFRAROUGE : COMPARAISON DE MÉTHODES DE VALIDATIONS CROISÉES CLASSIQUE ET INDEPENDANTE

Ce chapitre correspond à l'article publié dans la revue *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, intitulé « *Rapid prediction of the chemical composition of sugarcane biomass by near infrared reflectance spectroscopy: comparing classical and independent cross-validation* ». L'objectif de cet article est de présenter la mise au point de notre modèle de prédiction de la composition chimique de la biomasse de canne à sucre. En plus du développement du modèle, une comparaison des méthodes de validation croisées couramment utilisées en spectroscopie de réflexion dans le proche infrarouge est proposée.

La conception de ce modèle est la deuxième avancée méthodologique importante de cette thèse. Ce modèle a permit le dosage de l'ensemble des échantillons recueillis au cours des trois années d'expérimentations. Il rend donc possible le dosage rapide et efficace d'un grand nombre d'échantillons que suppose l'étude de l'évolution des composantes du rendement énergétique de la biomasse de canne à sucre.

Rapid prediction of the chemical composition of sugarcane biomass by near infrared reflectance spectroscopy: comparing classical and independent cross-validation

Damien Sabatier[a,*], Laurent Thuriès[b], Denis Bastianelli[c] and Pierre Dardenne[d]

[a]*CIRAD, UPR102 Systèmes de culture Annuels, Station de la Bretagne, BP 20, F-97408 Saint-Denis cedex 9, La Réunion, France*
[b]*CIRAD, UPR78 Recyclage et Risque, Station de la Bretagne, BP 20, F-97408 Saint-Denis cedex 9, La Réunion, France*
[c]*CIRAD, UMR SELMET Laboratory of Animal Nutrition, TA/30A, F-34398 Montpellier Cedex 5, France*
[d]*CRA-W, Quality of Agricultural Products Department, Chaussée de Namur n°24, 5030 Gembloux, Belgium*

[*]*email: damien.sabatier@cirad.fr*

Summary:

Among cultivated tropical C4 Poaceae, sugarcane is certainly the plant with the highest potential for energy production mainly thanks to its agronomic traits. Modeling is the best way to match an ideotype with industrial demand and to simulate the effects of a huge number of climate change scenarios. Both require quality assessment using efficient and robust analytical methods to determine biomass characteristics and/or to adjust processes. In this study, NIRS was assessed for the prediction of the chemical composition of sugarcane biomass. A total of 228 samples were taken from three genotypes grown at four contrasted locations in Reunion Island (SW Indian Ocean) and harvested at three ages during one plant crop cycle. The field samples were separated into five anatomical parts and ground using two different methods. Finally, 456 powders were scanned using a NIRS XDS monochromator. Modified partial least square (MPLS) regression was applied on spectra scatter-corrected with standard normal variate and detrend followed by second derivative (SNVD-D²). Four calibration models were developed from leave-one-out location calibration data sets. To avoid overoptimistic results, independent validation was carried out at each location. This original validation method demonstrated the actual potential of our NIR model to predict the chemical composition of independent sugarcane samples. At the same time, the performance of the NIR model will enable the supply of chemical values for use in ecophysiological growth models.

Keywords: near infrared spectroscopy, chemical composition, sugarcane, biomass, independent cross-validation

3.5. INTRODUCTION

Sugarcane is claimed to be the ideal energy crop to overcome environmental challenges thanks to its agronomic traits, its potential as a renewable source of energy but also because it can be used as human food and animal feed with no antagonistic effects. Sugarcane has one of the most efficient plant photosynthetic mechanisms enabling a high coefficient of CO_2 fixation. In addition, to improve the economic prospects of sugar companies and ensure good environmental health diversifying the end uses of sugarcane co- and by-products is feasible.[1] Describing the chemical composition of biomass is a key feature in determining potential uses for, and hence the value of, a specific biomass resource.[2] Wet chemical analysis can provide precise data, but because this type of analysis is tedious, time-consuming and requires the use of hazardous substances that are dangerous not only for the health of the technical staff but also of the environment, there is an increasing need to develop rapid spectroscopic methods to simplify and speed up the analysis of chemical constituents once the method is properly calibrated.[3-4] Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) has been extensively used in lignocellulose analysis of forage crops and should thus also be useful in predicting the chemical composition of biomass feedstocks.[5-13] Some applications have already been developed in the current context of replacing conventional analysis methods[14] and on-line shredded cane analysis[15-18] in the sugar industry, as well as the analysis of sugarcane in clonal evaluation trials[19] by NIRS. However, the latter studies[15-19] consisted only in measuring the quality components of fresh fibered or shredded sugarcane. Other studies[2,7,17], conducted only on sugarcane bagasse, used NIRS to measure chemical composition in the laboratory (extractives, ash, lignin, glucan, xylan, etc.) and on-line (dry matter, moisture, fiber, ash and pol). To our knowledge, no study reports using NIRS to measure the biochemical fractions in organic matter originating from different anatomical parts of sugarcane (*Saccharum spp.*) biomass, which could be useful for several reasons.

With the aim of reusing the whole plant, sugarcane by-products are increasingly sought after as animal feed, as a source of bio-energy, energy cogeneration, bio-fuel, etc.[20-24] Their rapid and efficient characterization could be a key to the valorization of a crop based biomass. Assessment of the quality profile of the feedstock would enable identification of the best economic and most environmentally friendly way of using it. However, it should also be kept in mind that the agronomic potential of sugarcane by-products are at least as important for maintaining soil fertility and productivity.[25-27]

One of most important potential applications of the method presented in this paper is for basic research. For example NIRS analysis could provide data for use in pre-existing ecophysiological growth models like "Mosicas"[28]. Many existing sugarcane growth models allow the prediction of crop yield in terms of organs and compartments.[29] But collecting data for the design of new growth models is time and labor consuming. Added to the enormous number of samples to be analyzed, this implies a huge investment in time and money, whereas NIRS could easily analyze large numbers of samples at low cost and with sufficient precision if the instrument is correctly calibrated.[4] The two main objectives of the present study were thus (i) to use NIRS to predict the chemical composition of dried and powdered samples of coarse particle size from different anatomical parts of sugarcane biomass and (ii) to asses the power of our NIR model to predict independent samples with an acceptable accuracy and low cost using an original validation approach and comparing it with standard chemical analysis. In this way resulting predictions could later be used as input data for an existing sugarcane growth model such as "Mosicas"[28].

3.6. MATERIALS AND METHODS

3.6.1. Experimental sugarcane samples

3.6.1.1. Sampling

The study was based on 228 samples from five anatomical parts of the cane (millable stalk, top of the stalk, green leaf blade, green leaf sheath and trash) in three sugarcane varieties (R570, R579 and R585) grown on Reunion Island. The three varieties were highly contrasted in their agronomic characteristics and described detailed description can be found in a previous study[30].

Samples were collected during four agronomic trials of planted cane superincumbent in contrasted areas of Reunion Island. Two of the four trials were located in coastal irrigated areas with a water deficit (at Le Gol in the southwest) or moderately dry conditions (at La Mare in the north-east). One of the other trials took place at Menciol in the east of Reunion Island at an altitude of 400 m with > 2400 mm rainfall per year, and the last trial was located at Vue Belle in the west of the island on land at the sugarcane growing limit at an altitude of 850 m with < 1000 mm rainfall per year. Two agronomic trials were planted in March 2008 (La Mare and Menciol) and one in July 2008 (Le Gol). The 4th agronomic trial was planted in January 2009 (Vue Belle).

Sampling was conducted at different harvest times for each variety in each trial during the growing season. The first harvests were done 6 to 10 months after planting, depending on the location of the trials because sugarcane grows more slowly at higher altitudes than in coastal areas mainly due to lower temperatures and lower solar radiation. Then samples were taken at successive harvests at 4-month intervals (i.e. 6 to 10, 10 to 14 and 14 to 18 months after planting, respectively). The millable stalks harvested at the second and third harvest dates were divided into three parts. The top corresponds in the upper part of the millable stalk (i.e. the top 40 cm) and the remaining part was divided into two equal parts, the middle and the bottom parts. As a result, our database containing sugarcane samples with highly contrasted agronomic, physiological, and soil and climatic characteristics combined with different anatomical parts represented a huge range of variability. The characteristics of the sugarcane samples are listed in Table 3.1.

3.6.1.2. Treatment of samples

At each sampling date, after the anatomical parts had been separated, approximately 15 kg of sugarcane millable stalk or stalk parts (top, middle and bottom parts) were roughly crushed with a cutter grinder (JEFFCO Cutter Grinders, model L118C, JEFFRESS Engineering Pty Ltd, Dry Creek, Australia) to obtain sugarcane pulp. A subsample of 1 000 g of sugarcane pulp was weighed and pressed for 1.5 minutes at 200 bars with a hydraulic press (Pinette Emidecau press model OB-103, Pinette Emidecau Industries, Chalon sur Saone, France). After crushing and pressing, a filter press cake called bagasse (Bg) was obtained. The other anatomical parts, top of the stalk (Ts), green leaf blade (Gb), green leaf sheath (Gs) and trash (Tr) were chopped with a knife into pieces about 10 cm in length to facilitate drying. The whole filter press cake and a 500 g subsample of each of the other anatomical parts were oven-dried for three days at 70 °C to obtain dry matter (DM) at constant weight.

Once the samples were dried, they were ground, first with a Thomas Willey™ (Swedesboro, NJ, USA) knife crusher to pass through a 2 mm screen (samples TW), and then a subsample of each sample was ground with a Foss - Cyclone crusher Cyclotec™ (Nanterre, France) to pass through a 1 mm screen (samples CT). Including particle size variability in our database using two different crushers improved the accuracy of prediction of lignocellulosic compounds in coarse sugarcane samples as demonstrated in a previous study.[30]

3.6.1.3. Biochemical fractionation

The CT (raw matrix) samples were analyzed using the FiberBag™ technique (Ankom Technology, Macedon, NY, USA) and according to the sequential method reported by Van Soest et al.[31] and reviewed by Mertens et al.[32]. The samples were successively subjected to neutral detergent fiber extraction using alpha amylase (aNDF), acid detergent fiber (ADF) extraction, and acid detergent lignin (ADL) extraction. To remove residual humidity in the raw matrix before extraction (DM_{70}) and at each extraction step, the raw matrix and the residue of extraction were dried at 70 °C in a forced air circulation oven (Memmert universal incubator model ULM400 53L, Bremen, Germany) until constant weight, and then ignited gradually by raising the temperature to 525 °C (Model BWF 11-13, Carbolite Company, Parsons Lane, Hope, Hope Valley, S33 6RB, UK) and maintaining it for 5 h to measure ash content (Ash_{DM70}, Ash_{NDF}, Ash_{ADF} and Ash_{ADL} respectively). The different organic fractions or ash free lignocellulosic fractions investigated in this study were calculated as follows:

NDSol (neutral detergent soluble) = $(DM_{70} - Ash_{DM70}) - (aNDF - Ash_{NDF})$

$aNDF_{om} = (aNDF - Ash_{NDF})$

$ADF_{om} = (ADF - Ash_{ADF})$

Hem (hemicellulose-like) = $aNDF_{om} - ADF_{om}$

Cel (cellulose-like) = $ADF_{om} - (ADL - Ash_{ADL})$

Lig (lignin-like) = $(ADL - Ash_{ADL})$

3.6.1.4. NIR spectra acquisition

Two replicates of each sample ground with the TW and CT were packed into circular cups (50 mm in diameter) closed with a cardboard lid and then scanned in reflectance mode on a monochromator spectrometer (NIRSystems XDS, Inc. 7703 Montpelier Road, Suite 1, Laurel, MD 20723, USA) respectively. Spectra were obtained for each replicate at 2 nm intervals over the 400-2498 nm wavelength. The spectra (average of 32 scans) were recorded as log 1/reflectance (log 1/R). Each sample was scanned twice (two different cup fillings) and the spectra were averaged.

3.6.1.5. Chemometrics

Mathematical treatment of the spectral data was performed with WIN-ISI 3 software (Infrasoft International LLC, 1362 South Atherton St. State College, PA 16801, USA). Six pretreatments currently used in normalization processes were investigated here and in

previous studies[5,30,33-35]: first derivative (D), second derivative (D²), multiplicative scatter correction (MSC), standard normal variate and detrend (SNVD) and followed with first (SNVD-D) or second derivative (SNVD-D²). The derivatives were calculated with gap and smoothing segments of five data points. After comparison of statistical calibration values (data not shown), the most efficient pretreatment to avoid interference due to the effect of particle size on sugarcane samples was shown to be SNVD-D², as described in Sabatier et al.,[30]. Consequently in the present study, we used SNVD-D² calculated and smoothed on five data points (2,5,5). Another pretreatment used in a more recent study by Liu et al.,[35] showed that EMSC had the highest potential for removing physical interference in biomass spectral sampling, and for improving the correlation between spectral and chemical information. It was also the only method that consistently gave the best prediction performance. However we were unable to compare this pretreatment with those we investigated, as EMSC is not available in the software version we used (WIN-ISI 3).

The regression technique used to develop the calibration equations of the parameters we studied was the modified partial least square (MPLS). To prevent over-fitting, the MPLS regression technique requires cross-validation during development of the calibration equation.[6] Cross-validation is a method based on the prediction of sub-groups formed with randomly chosen spectra, sequentially or in blocks, one after the other, by equations developed on the rest of the data base. Calibration and cross-validation statistics included the standard error of calibration (*SEC*), the coefficient of determination of calibration (R^2_C), the standard error of cross-validation (*SECV*) and the coefficient of determination of cross-validation (R^2_{CV}). The ratio of performance to deviation (RPD_{CV}) allows comparison of the resulting equations independent of the units and is more discriminating than R^2_{CV} especially when high R² is close to one.[36] RPD_{CV} was used to demonstrate how well the calibration model developed for each parameter performed in predicting the reference data[37] and thus to determine the future potential uses of the calibration models for qualitative or quantitative analysis. RPD_{CV} is currently used by spectroscopists, and a number of authors have reported that values greater than 3.0 are adequate for analytical purposes in most NIR applications for agricultural products.[38,39] However in a recent study by Bellon-Maurel et al.,[40] the use of RPD_{CV} as an estimator of NIR model performance assessment was questioned. Particular attention was also paid to the comparison between *SEC* and *SECV* (the closer the better), and *SECV* with regard to the mean (the smaller the better) because these two parameters allow primary assessment of the accuracy of the model.

3.6.1.6. NIR data sets

TW and CT sets were used in two calibration sets (CS_{TW} and CS_{CT}). No sample was removed from any calibration set because it was a spectral or compositional outlier. Nevertheless, spectral outliers were identified in each set based on Mahalanobis distance (*H*) from the average spectrum in the principal component analysis (PCA) established with a maximum standardized *H* distance of 3.0. Seven spectral outliers were identified in each calibration set five samples of which were identical in both calibration sets. *H* values of outliers ranged from 3.02 to 5.99. These spectral outliers included one trash, two green leaf blades, three green leaf sheaths and three tops of the stalk. Five out of nine samples were taken at the last harvest date and the other four samples were at the first harvest date. We observed that samples that were classified as spectral outliers included samples with extreme concentrations. For each parameter used for calibration, spectral outliers based on PCA contained samples with compositional values located at the boundaries of the range of the calibration sub-set. This means that the PCA identified samples as being both spectral and compositional outliers. The optical properties of these samples in the three-dimensional plot defined by any of the first three principal component scores were clearly isolated from the others. However, we decided to keep all the samples to develop our calibrations and these outliers were considered as extreme samples and thus as the most important for modeling.[41]

The TW and CT sets (n = 228 each) were split into a calibration sub-set (CAL_X) and a validation sub-set (VAL_X). Each set contained 57 samples from four agronomic trials (57 * 4 locations). Samples from each location were alternately used as four different and independent VAL_X (i.e. VAL_{TW} and VAL_{CT}) for use in the validation of the leave-one-out location group. The remaining 171 samples from each set and from the remaining three locations were used alternately to make up four different CAL_X (i.e. CAL_{TW} and CAL_{CT}). The last calibration sub-set CAL_{MIX} (n = 342, (57 CT + 57 TW) * 3 locations) used to compute our equations was a mix of samples from CAL_{CT} and CAL_{TW}. We then mixed all the calibration sets in order to include maximum variations due to particle size in CAL_{MIX}.[4] The fourth independent validation sub-set (VAL_{TW}) with samples not included in its corresponding calibration set was predicted. We proceeded in the same way for each location in order to evaluate the ability of each calibration equation to predict independent samples of coarse particle size originating from locations that were unknown to the models. The bias-corrected standard error of prediction (*SEP*), the coefficient of determination of prediction (R^2_P), and the Mahalanobis distance (*Av.GH*) were estimated with the VAL_{TW} sub-set and the RPD_P was calculated as RPD_P = SD of CAL_X / *SEP*.

Next, a pooled validation was calculated by merging the results of the validation made at four separate locations. The *SEP* and the root mean square error for prediction (*RMSEP*) were calculated by computing respectively the standard deviation and the root mean square of the residues (i.e. the difference between measured and predicted values) of all the validation results. The R^2_P, the *Slope*, the *Bias* (i.e. the difference between measured and predicted means) were calculated by regressing measured vs. predicted values (i.e. by scatter plots).

3.7. RESULTS AND DISCUSSION

3.7.1. Sugarcane samples

3.7.1.1. Biochemical characteristics

Table 3.1 shows the sampling plan and the biochemical characteristics of different anatomical parts of our samples of sugarcane plant. Table 3.2 shows the correlation between the different biochemical fractions, in the whole data containing all anatomical parts. High correlations between biochemical fractions $aNDF_{om}$ and ADF_{om} (0.93) and between both and Cel (0.90 and 0.94 respectively) were found among samples. Correlations between ADF_{om} and Lig (0.72) were also high. The complex (fiber) biochemical fraction $aNDF_{om}$ was also correlated with its simple (structural polymer) biochemical fractions (Hem and Lig), but to a lesser extent. In fact, each simple fraction was correlated with the complex fraction that contained it.

3.7.1.2. NIR spectra

Figure 3.1 shows the log 1/R mean spectra of different anatomical parts of the whole sugarcane plant. As reported by other authors[10] for a comparable matrix (whole maize plants) the mean spectrum of the green leaf blade (Gb) showed absorption bands from 600 to 700 nm in the visible region corresponding to the absorption of chlorophylls.[42] The mean spectra of the different anatomical parts of sugarcane varied considerably in intensity in the 400 to 1300 nm region. In fact each anatomical part is a different color (trash is brown, the leaf blade is green, and bagasse is light yellow) and the anatomical parts also differ in color depending on the variety and age of the plant (especially the green leaf sheath which varies from brown to purple). This wide color range may be the cause of these variations in intensity, which, incidentally, have also been observed by other authors[43] on a different matrix. To remedy this problem and to improve the stability of their model (i.e. minimizing the gap between *SEC* and *SECV*), these authors recommended discarding the region from 400 to 1100 nm. However, in

our case using trimmed spectra (1100-2498 nm) did not improve the performance of the model (data not shown).

Table 3.5 Description of samples and biochemical characteristics (%DM) of the whole data set (n = 228) and of the anatomical sub-sets of 3 varieties of sugarcane (*Saccharum sp.*) grown in Reunion Island in 4 contrasted soil-climatic areas, and collected at 3 harvest times in 2009-2010.

Data set	Whole	Trash	Green leaf blade	Green leaf sheath	Bagasse	Top of the stalk
n	228	36	36	36	84	36
	aNDFom					
Mean ± *SD*	75.5 ± 6.7	75.8 ± 3.4	71.9 ± 2.8	74.7 ± 4.0	81.3 ± 4.2	66.0 ± 5.0
Range	54.8 - 91.8	64.3 - 82.2	64.5 - 78.0	62.7 - 82.4	70.0 - 91.8	54.8 - 75.4
	ADFom					
Mean ± *SD*	43.6 ± 6.3	43.2 ± 2.7	37.8 ± 2.0	42.0 ± 3.5	50.1 ± 3.5	36.3 ± 3.4
Range	27.9 - 57.1	35.8 - 48.7	33.1 – 41.0	32.1 - 48.9	42.1 - 57.1	27.9 - 42.9
	NDSol					
Mean ± *SD*	20.3 ± 5.1	18.0 ± 2.5	22.7 ± 2.9	19.0 ± 4.0	18.0 ± 4.1	26.8 ± 5.5
Range	7.6 - 41.1	13.4 - 25.7	18.0 - 30.3	13.2 - 32.5	7.6 - 28.9	18.1 - 41.1
	Hem					
Mean ± *SD*	31.5 ± 2.5	31.9 ± 2.4	33.7 ± 1.4	32.3 ± 2.1	31.0 ± 2.3	29.3 ± 2.3
Range	23.9 - 37.7	24.7 - 35.9	31.3 - 36.7	29.5 - 37.7	26.1 - 36.5	23.9 - 33.6
	Cel					
Mean ± *SD*	36.3 ± 4.9	35.5 ± 2.3	32.6 ± 2.4	34.2 ± 2.7	41.2 ± 3.6	31.7 ± 3.0
Range	24.4 - 50.4	28.9 - 39.9	27.6 - 37.4	27.1 - 40.1	30.6 - 50.4	24.4 - 36.7
	Lig					
Mean ± *SD*	6.5 ± 2.4	6.3 ± 1.8	4.4 ± 1.3	6.9 ± 1.8	8.2 ± 1.9	4.2 ± 1.5
Range	1.2 - 12.2	3.2 - 9.7	2.9 - 7.8	4.1 - 11.1	4.6 - 12.2	1.2 - 8.3
	Ash					
Mean ± *SD*	5.4 ± 3.4	8.3 ± 3.1	6.6 ± 1.5	7.6 ± 2.2	1.7 ± 0.4	8.1 ± 1.9
Range	0.8 - 17.4	4.0 - 17.4	4.1 - 8.8	4.1 - 13.7	0.8 - 2.8	4.8 - 10.9

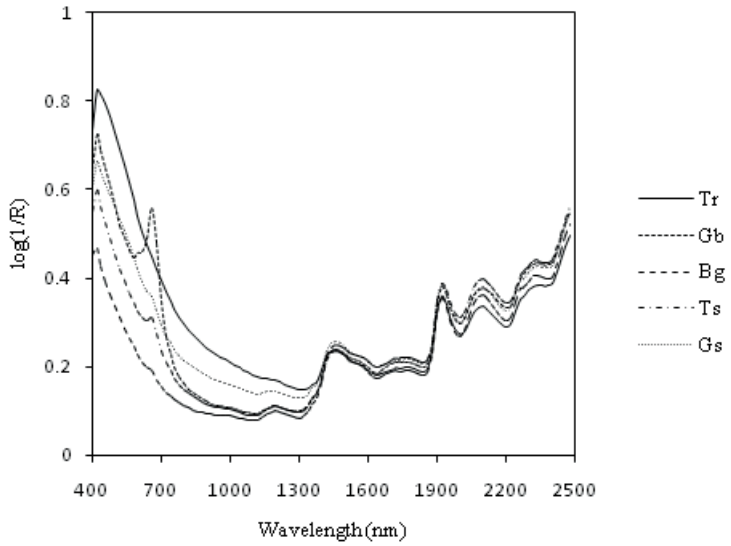
$aNDF_{om}$ = neutral detergent fiber with alpha amylase, ADF_{om} = acid detergent fiber, NDSol = neutral detergent soluble, Hem = hemicellulose-like, Cel = cellulose-like, Lig = lignin-like, Ash = total ash, n = number of samples, *SD* = standard deviation.

Table 3.6 Correlation coefficients between biochemical fractions in different anatomical parts of sugarcane plant samples

	ADF_{om}	NDSol	Hem	Cel	Lig	Ash
$aNDF_{om}$	0.926	-0.899	0.341	0.903	0.592	-0.611
ADF_{om}		-0.782	-0.036	0.940	0.717	-0.647
NDSol			-0.407	-0.770	-0.443	0.215
Hem				0.040	-0.167	-0.071
Cel					0.448	-0.621
Lig						-0.547

$aNDF_{om}$ = neutral detergent fiber with alpha amylase, ADF_{om} = acid detergent fiber, NDSol = neutral detergent soluble, Hem = hemicellulose-like, Cel = cellulose-like, Lig = lignin-like, Ash = total ash.

Figure 3.5 Log (1/R) mean spectra of different anatomical parts of sugarcane samples



Tr = Trash; Gb = Green leaf blade; Bg = Bagasse; Ts = Top of the stalk and Gs = Green leaf sheath.

3.7.2. Calibration and cross-validation

3.7.2.1. Whole data set

Table 3.3 lists NIRS calibration and cross-validation statistics (4 *CV*) for the biochemical characteristics of different anatomical parts of all the pooled experimental samples of sugarcane. The values obtained are comparable with those reported by other authors on

similar plant matrices (corn stover and switchgrass).[35] When new samples were included in the data base used to develop calibrations in a previous study[30] the calibration statistics (*SECV*) of Ash were improved, but ADF_{om} remained almost identical and $aNDF_{om}$ and Lig increased. NIRS calibration statistics were poor for Hem and Lig content in the global data base and their RPD_{CV} (1.9 for both) were lower than would be expected from efficient and accurate quantitative analysis.

Hemicellulose content had the poorest calibration statistics. However for hemicellulose content in whole maize plant, Cozzolino et al.,[10] obtained a R^2_C (0.72) close to ours. Even though these authors used more samples with a comparable range of hemicellulose content, their *SEC* (1.22) was close to ours. In the study conducted by Naydenova et al.,[8] on the hemicellulose content of perennial forage grasses, the *SECV* (1.52) of the best predictive model (out of 60 global MPLS equations) was close to our result. However, these authors[8] used a different pretreatment than ours. As we demonstrated in a previous study[30], SNVD-D2,5,5 was the best combination of scatter correction and mathematical treatment in our case (data not shown). One possible explanation for the poor Hem calibration statistics could be that the calculation of hemicellulose content suffers from limitations on $aNDF_{om}$ and ADF_{om} measurements.[44] Conversely, in the study by Jin and Chen[45] on rice straw, the *SECV* (1.11) for hemicellulose content they found was even lower than ours, and like us, they used the reference method described by Van Soest et al.,[31]. In the study by Thuriès et al.,[12] on plant raw materials and crop residues, the calibration set was based on fewer samples (n = 146) with a wider range of hemicellulose content (from 0.04 to 48.9) and, even though these authors used the same reference method, they found a higher *SECV* (3.20) than ours. These results show that although a wide range of chemical composition of samples increases the R^2, it most often leads to an increase in both *SEC* and *SECV*. Another explanation for the poor Hem calibration statistics, in addition to low variability, could be that the spectral signature of hemicellulose is not clearly defined. Indeed hemicelluloses include several molecules (e.g. xylan, arabinan, etc.) that cause this parameter to be badly biochemically defined.

The second parameter with poor calibration statistics was "calculated hemicellulose" (Hem_C = $aNDF_{om}$-ADF_{om}). Here we wanted to know if a predicted parameter calculated from two predicted vectors would give better statistics than direct prediction. Calibration statistics for Hem_C were the poorest and even worse than for Hem, showing that it is better to calibrate the calculated parameter directly than to calculate it from the predicted values of its two constituents.

In a previous study[30], we obtained a better *SEC* (0.30) for Lig than in the present study. In that case, the calibration model was developed on fewer samples (n = 60) of the same matrix (sugarcane) with a smaller range of lignin content (0.1-8.7) and using the multiple linear regression technique (MLR). Other authors[8,12,45,46] found either higher (3.57)[12], or lower (0.52[8], 0.76[46] and 0.81[45]) *SECV*s than in the present study. The highest *SECV*[12] was obtained from a calibration developed on a smaller samples set originating from very different plants with a wide range (3.4-63.9) of lignin contents and by using the same combination of scatter correction, mathematical treatment (SNVD-D2,5,5), and regression technique (MPLS) as in the present study. The best *SECV*s[8,45,46] were all obtained from calibrations developed on samples pretreated with different combinations of scatter correction and mathematical treatment. In our case, SNVD-D2,5,5 was the pretreatment that improved calibration the most. Like for Hem, calculation of Lig also suffered from limitations of ADF_{om} measurements[43] although the samples in previous studies[8,45,46] were all analyzed using the same method[31].

3.7.2.2. Leave-one-out location data set

The NIR model developed in the present study was then used as an analytical tool to predict numerous sugarcane samples to supply an existing sugarcane growth model[28] with input data. To guarantee the ability of the NIR model to satisfactorily predict the chemical composition of sugarcane samples, a validation was carried out on four independent validation sub-sets. Table 3.4 lists the biochemical characteristics (%DM) of the four calibration sub-sets (CAL_X, n = 342, (57 CT + 57 TW) * 3 locations) and its associated fourth independent validation sub-set (VAL_X, n = 57 TW). Each validation sub-set (VAL_{VB}, VAL_{LG}, VAL_{LM} and VAL_{ME}) came from a different location and comprised samples that were not included in its corresponding CAL_X (CAL_{VB}, CAL_{LG}, CAL_{LM} and CAL_{ME}). The mean and range of each calibration and validation sub-set varied slightly as a function of the location compared to the global values listed in Table 3.3.

Table 3.6 Calibration and cross-validation statistics for the biochemical characteristics (%DM) of all the sugarcane samples (*n* = 228 CT + 228 WT = 456) using modified PLS regression after standard normal variate and detrend and second derivative calculated on 5 data points and smoothed on 5 data points (SNVD2,5,5)

%DM	*n*	*T*	*SEC*	R^2_C	*SECV*	R^2_{CV}	RPD_{CV}
NDF_{om}	456	12	1.70	0.94	1.94	0.92	2.6
ADF_{om}	456	13	1.24	0.96	1.40	0.95	5.0
NDSol	456	12	1.58	0.91	1.82	0.87	3.8
Hem	456	14	1.28	0.75	1.53	0.63	1.9
Cel	456	13	1.41	0.92	1.54	0.90	4.2
Lig	456	14	0.94	0.84	1.06	0.80	1.9
Ash	456	14	0.40	0.99	0.47	0.98	5.6
Hem_C	456	13	1.30	0.74	1.58	0.61	1.8

$aNDF_{om}$ = neutral detergent fiber with alpha amylase, ADF_{om} = acid detergent fiber, NDSol = neutral detergent soluble, Hem = hemicellulose-like, Cel = cellulose-like, Lig = lignin-like, Ash = total ash, Hem_C = hemicellulose computed from predicted values ($aNDF_{om}$ - ADF_{om}), *n* = number of spectra in calibration, *T* = number of terms, *SEC* = standard error of calibration, R^2_C = coefficient of determination of correlation, *SECV* = standard error of cross-validation, R^2_{CV} = coefficient of determination of cross-validation, RPD_{CV} = ratio performance to deviation of cross-validation, CT = Cyclotec™ grinder, TW = Thomas Wiley™ grinder.

Table 3.5 lists the calibration and cross-validation statistics for biochemical characteristics (%DM) of different anatomical parts of sugarcane plant. Four new calibration models were developed from each $CAL_{\mathbf{X}}$ sub-set (*n* = 171 CT + 171 TW = 342 samples from three locations), which were then used to predict its corresponding $VAL_{\mathbf{X}}$ sub-set (*n* = 57, selection of 57 TW samples from a single location). Not surprisingly, most of the statistics of calibrations developed on each CAL_X sub-set were in the range of the calibration and cross-validation statistics of the whole data set. This confirms that no sub-set dramatically influenced the overall calibration. In addition, when the validation sub-set range was not included in the range of the calibration sub-set, there was a deterioration in the performance of the calibration model for the parameter concerned. For example, Lig content, the calibration developed on CAL_{VB} showed a net improvement over the R^2_{CV} and *SECV*. This

confirmed the fact that the origin of the samples influenced the performance of the calibration model differently and also varied with the parameter.

Table 3.7 Biochemical characteristics (% DM) of the sub-sets of sugarcane samples (CAL_X, *n* = 342, (57 CT + 57 TW) * 3 locations; VAL_X, *n* = 57 TW from one location not included in corresponding CAL_X)

%DM	NDF_{om}	ADF_{om}	NDSol	Hem	Cel	Lig	Ash	Hem_C
	Calibration set without "Vue Belle" (*n* = 342, 171 TW + 171 CT) CAL_{VB}							
n	342	342	342	342	342	342	342	342
Mean ± *SD*	75.5 ± 6.7	43.8 ± 6.5	20.3 ± 5.1	31.3 ± 2.6	36.6 ± 4.8	6.2 ± 2.2	5.6 ± 3.6	31.7 ± 2.5
Range	54.8 - 88.8	27.9 - 56.8	10.1 - 41.1	23.9 - 37	24.4 - 48.6	1.2 - 11.5	0.8 - 17.4	24.3 - 37.4
	"Vue Belle" validation set (*n* = 57 TW) VAL_{VB}							
n	57	57	57	57	57	57	57	57
Mean ± *SD*	75.5 ± 6.6	43.1 ± 5.7	20.3 ± 5.2	32.1 ± 2.4	35.4 ± 5.1	7.2 ± 2.7	5.0 ± 2.9	32.4 ± 2.5
Range	59.9 - 91.8	32.4 - 57.1	7.6 - 34.8	27.2 - 37.7	25 - 50.4	2.9 - 12.2	1.1 - 10.9	26.8 - 38.1
	Calibration set without "Le Gol" (*n* = 342, 171 TW + 171 CT) CAL_{LG}							
n	342	342	342	342	342	342	342	342
Mean ± *SD*	76.1 ± 6.2	44.0 ± 6.0	19.8 ± 4.7	31.8 ± 2.6	36.6 ± 4.7	6.7 ± 2.4	5.1 ± 3.2	32.1 ± 2.6
Range	55.9 - 91.8	31.6 - 57.1	7.6 - 35.5	23.9 - 37.7	25.0 - 50.4	1.2 - 12.2	0.8 - 12	24.3 - 38.1
	"Le Gol" validation set (*n* = 57 TW) VAL_{LG}							
n	57	57	57	57	57	57	57	57
Mean ± *SD*	73.6 ± 7.7	42.5 ± 7.1	21.7 ± 6.2	30.5 ± 2.3	35.4 ± 5.5	6.0 ± 2.1	6.4 ± 4	31.1 ± 2.1
Range	54.8 - 87.7	27.9 - 55.3	11.8 - 41.1	24.7 - 34.5	24.4 - 48.6	2.5 - 10.6	1.1 - 17.4	25.4 - 34.8
	Calibration set without "La Mare" (*n* = 342, 171 TW + 171 CT) CAL_{LM}							
n	342	342	342	342	342	342	342	342
Mean ± *SD*	75.1 ± 6.9	43.1 ± 6.3	20.9 ± 5.4	31.6 ± 2.6	35.9 ± 5.0	6.4 ± 2.4	5.1 ± 3.3	32.0 ± 2.6
Range	54.8 - 91.8	27.9 - 57.1	7.6 - 41.1	23.9 - 37.7	24.4 - 50.4	1.2 - 12.2	0.8 - 17.4	24.3 - 38.1
	"La Mare" validation set (*n* = 57 TW) VAL_{VB}							
n	57	57	57	57	57	57	57	57
Mean ± *SD*	76.6 ± 5.8	45.1 ± 6.2	18.4 ± 3.6	31.2 ± 2.2	37.5 ± 4.5	6.6 ± 2.3	6.4 ± 3.6	31.6 ± 2.3
Range	64.0 - 88.8	34.8 - 56.8	10.1 - 27.4	26.1 - 36.4	31.3 - 47.3	2.9 - 11.5	1.3 - 12	26.5 - 36.8
	Calibration set without "Menciol" (*n* = 342, 171 TW + 171 CT) CAL_{ME}							
n	342	342	342	342	342	342	342	342
Mean ± *SD*	75.2 ± 6.8	43.6 ± 6.4	20.1 ± 5.2	31.3 ± 2.4	36.1 ± 5.1	6.6 ± 2.4	5.9 ± 3.6	31.7 ± 2.4
Range	54.8 - 91.8	27.9 - 57.1	7.6 - 41.1	24.7 - 37.7	24.4 - 50.4	2.5 - 12.2	1.1 - 17.4	25.4 - 38.1
	"Menciol" validation set (*n* = 57 TW) VAL_{VB}							
n	57	57	57	57	57	57	57	57
Mean ± *SD*	76.2 ± 6.3	43.8 ± 6.0	20.7 ± 4.8	32.1 ± 2.9	37.0 ± 4.3	6.2 ± 2.2	4.0 ± 2.4	32.5 ± 2.9
Range	55.9 - 86.5	31.6 - 55.8	12.7 - 35.5	23.9 - 37.0	29.6 - 47.3	1.2 - 10.1	0.8 - 10.5	24.3 - 37.4

$aNDF_{om}$ = neutral detergent fiber with alpha amylase, ADF_{om} = acid detergent fiber, NDSol = neutral detergent soluble, Hem = hemicellulose-like, Cel = cellulose-like, Lig = lignin-like, Ash = total ash, Hem_C = hemicellulose computed from predicted values ($aNDF_{om}$ - ADF_{om}), *n* = number of samples, *SD* = standard deviation, CT = Cyclotec™ grinder, TW = Thomas Wiley™ grinder, "Vue Belle", "Le Gol", "La Mare" and "Menciol" = locations of trials.

Table 3.8 Calibration, cross-validation (CAL_X sub-set), prediction and manual validation (VAL_X sub-sets) statistics for biochemical characteristics (%DM) of samples taken from different anatomical parts of the sugarcane plant using modified PLS regression technique and second derivative and standard normal variate and detrend calculated on five data points and smoothed on five data points (SNVD2,5,5)

%DM	NDF_{om}	ADF_{om}	NDSol	Hem	Cel	Lig	Ash	Hem_C
	Calibration without "Vue Belle" (*n* = 342, 171 TW + 171 CT) CAL_{VB}							
SEC	1.51	1.14	1.43	1.18	0.94	0.57	0.36	1.19
R^2_C	0.95	0.97	0.92	0.79	0.96	0.93	0.99	0.78
SECV	1.68	1.30	1.64	1.38	1.07	0.65	0.42	1.38
R^2_{CV}	0.94	0.96	0.90	0.71	0.95	0.91	0.99	0.70
RPD_{CV}	4.0	5.0	3.1	1.9	4.5	3.4	8.5	1.8
	Prediction for "Vue Belle" (*n* = 57 TW) VAL_{VB}							
SEP	2.94	1.89	2.58	2.03	2.76	2.07	0.62	2.29
RMSEP	3.05	2.03	2.64	2.01	3.33	2.40	0.63	2.28
R^2_P	0.80	0.91	0.75	0.39	0.72	0.41	0.96	0.30
RPD_P	2.3	3.3	2.0	1.3	1.8	1.1	5.5	1.1
Bias	-0.89	-0.77	0.68	-0.08	-1.90	1.24	0.14	-0.27
Av.GH	1.28	0.93	1.24	1.17	1.11	1.14	1.01	1.17
	Calibration without "Le Gol" (*n* = 342, 171 TW + 171 CT) CAL_{LG}							
SEC	1.71	1.21	1.58	1.12	1.40	0.92	0.35	1.22
R^2_C	0.92	0.96	0.89	0.81	0.91	0.85	0.99	0.78
SECV	1.99	1.43	1.86	1.38	1.61	1.10	0.42	1.46
R^2_{CV}	0.90	0.94	0.84	0.71	0.88	0.79	0.98	0.68
RPD_{CV}	3.1	4.2	2.5	1.9	2.9	2.2	7.5	1.8
	Prediction for "Le Gol" (*n* = 57 TW) VAL_{LG}							
SEP	2.69	2.06	2.91	1.99	2.53	1.41	0.70	1.90
RMSEP	2.74	2.04	2.91	2.01	2.55	1.40	0.74	1.94
R^2_P	0.90	0.92	0.88	0.44	0.87	0.65	0.97	0.47
RPD_P	2.5	3.1	1.8	1.3	1.9	1.7	4.9	1.3

Bias	0.64	0.12	-0.43	0.40	0.43	0.11	0.26	0.44
Av.GH	1.66	1.69	1.64	1.65	1.66	1.66	1.43	1.64
	Calibration without "La Mare" (n = 342, 171 TW + 171 CT) CAL_{LM}							
SEC	1.72	1.15	1.57	1.22	1.40	0.92	0.38	1.31
R^2_C	0.94	0.97	0.92	0.79	0.92	0.85	0.99	0.75
SECV	1.92	1.30	1.83	1.50	1.56	1.06	0.46	1.58
R^2_{CV}	0.92	0.96	0.88	0.67	0.90	0.80	0.98	0.64
RPD_{CV}	3.6	4.8	2.9	1.8	3.2	2.3	7.2	1.7
	Prediction for "La Mare" (n = 57 TW) VAL_{LM}							
SEP	2.05	1.05	2.06	1.83	1.60	1.55	0.54	1.78
RMSEP	2.25	2.06	2.19	1.82	2.05	1.66	0.56	1.77
R^2_P	0.88	0.90	0.68	0.36	0.89	0.56	0.98	0.40
RPD_P	3.3	6.0	2.5	1.4	3.1	1.5	6.4	1.4
Bias	0.99	0.71	-0.79	0.14	1.30	-0.63	-0.18	0.18
Av.GH	0.97	0.95	0.95	1.00	0.92	0.99	1.09	0.99
	Calibration without "Menciol" (n = 342, 171 TW + 171 CT) CAL_{ME}							
SEC	1.73	1.13	1.63	1.25	1.28	0.90	0.41	1.27
R^2_C	0.94	0.97	0.90	0.72	0.94	0.86	0.99	0.71
SECV	1.99	1.29	1.92	1.50	1.48	1.03	0.47	1.50
R^2_{CV}	0.91	0.96	0.87	0.60	0.92	0.82	0.98	0.60
RPD_{CV}	3.4	5.0	2.7	1.6	3.5	2.3	7.6	1.6
	Prediction for "Menciol" (n = 57 TW) VAL_{ME}							
SEP	2.18	1.80	1.86	1.90	1.96	1.27	0.48	2.05
RMSEP	2.24	1.82	1.86	2.10	2.15	1.90	0.50	2.32
R^2_P	0.89	0.91	0.86	0.58	0.81	0.73	0.97	0.51
RPD_P	3.1	3.5	2.8	1.3	2.5	1.9	7.2	1.2
Bias	0.59	-0.35	-0.24	0.94	0.92	-1.43	-0.17	1.10
Av.GH	1.18	1.03	1.29	1.08	1.18	1.21	1.22	1.09
	Validation on whole data set (n = 228 TW) VAL_{ALL}							
SEP	2.58	1.26	1.34	1.37	1.16	1.26	0.62	1.40
RMSEP	2.59	1.99	2.43	1.99	2.57	1.88	0.62	2.09
R^2_P	0.86	0.90	0.80	0.45	0.77	0.44	0.97	0.40
RPD_P	2.6	5.0	3.8	1.9	4.2	1.9	5.6	1.8
Slope	0.90	0.94	0.85	0.75	0.81	0.72	1.00	0.71
Bias	0.33	-0.07	-0.19	0.35	0.19	-0.18	0.01	0.36
Av.GH	0.33	-0.07	-0.19	0.35	0.19	-0.18	0.01	0.36
$\%RMSEP_I$	33.5	42.1	33.5	30.1	66.9	77.4	31.9	32.3

$aNDF_{om}$ = neutral detergent fiber with alpha amylase, ADF_{om} = acid detergent fiber, NDSol = neutral detergent soluble, Hem = hemicellulose-like, Cel = cellulose-like, Lig = lignin-like, Ash = total ash, Hem_C = hemicellulose computed from predicted values ($aNDF_{om}$ - ADF_{om}), *n* = number of samples, *T* = number of terms, *SEC* = standard error of calibration, R^2_C = coefficient of determination of correlation, *SECV* = standard error of cross-validation, R^2_{CV} = coefficient of determination of cross-validation, RPD_{CV} = ratio performance to deviation of cross-validation, *RMSEP* = root mean square error for prediction, *SEP* = standard error of prediction, R^2_P = coefficient of determination of prediction, RPD_P = ratio of performance to deviation of prediction, *Av.GH* = global H (Mahalanobis distance of the PLS score space from the average spectrum), $\%RMSEP_I$ = increase in percentage between classical *SECV* and *RMSEP*.

3.7.3. Validation

3.7.3.1. By location

Table 3.5 lists the statistical values of each independent validation obtained from the prediction of each VAL sub-set. The R^2_P and *SEP* of $aNDF_{om}$ in the present study were comparable with those reported in the whole maize plant[10] 0.83 (2.43 g $100g^{-1}$) and better than those reported in European compound rabbit feed[47] 0.50 (3.20 g $100g^{-1}$). In our study, the standard error of prediction (*SEP*) of ADF_{om} was lower in some cases but close to that reported in European compound rabbit feed[47] (1.40 g $100g^{-1}$) and in the whole maize plant[10] (1.85 g $100g^{-1}$). Conversely, in our study, the R^2_P of ADF_{om} was lower than that reported in the whole maize plant[10] (0.98). However, with a similar number of samples in both validation sets, $aNDF_{om}$ and ADF_{om} content was predicted better than in previous studies[10,47]. In our study, the *SEP* of Hem and Cel was lower than that reported in studies on plant raw material[12] (3.86 and 2.92 g $100g^{-1}$ respectively) and higher than that of rice straw[45] (1.70 and 1.10 g $100g^{-1}$ respectively). In our study, the *SEP* of Lig was higher than that found in different biomass feedstocks[7] (0.64 g $100g^{-1}$) and lower than that found in plant raw material[12] (2.80 g $100g^{-1}$) and of rice straw[45] (2.10 g $100g^{-1}$). In our study, the *SEP* of Ash was comparable with that found in different biomass feedstocks[7] (0.58g $100g^{-1}$), and always lower than that found in plant raw material[12] (2.14 g $100g^{-1}$) and rice straw[45] (0.8 g $100g^{-1}$). However in the present study, the *SEP* of Ash was higher than that of the whole maize plant[10] (0.38 g $100g^{-1}$). This indicates that, especially for Ash but also for Hem and Cel contents, the prediction capacities of NIR models were better when calibrations were developed on single materials.[8] However, a comparable range with a larger number of samples used to develop a calibration could also

explain the lower *SEP*. Except for Lig content, this was not the case in the present study. In fact the wide range in Lig content of samples described in previous studies[7,12], which was mainly due to the variability of the materials originally included in the data base, allowed good prediction of Lig content.

RPDp varied from 1.1 for Lig to 7.2 for Ash. The predictive power of the models was poor for Hem and Lig. However given the results reported in the literature, it should be possible to improve the performance of our model for the prediction of Hem and Lig contents. In the study by Thuriès et al.,[12] *RPDp* was 2.1 and 6.1 for Hem and Lig respectively. In a previous study on different biomass feedstock, Sanderson et al.[7] found an even higher *RPDp* for Lig (R^2p = 0.98 so *RPDp* = 6.9). These results confirm the fact that, at least for Lig, variability of the materials and a wide range of lignin content in the calibration set could be important in improving prediction.

3.7.3.2. On the whole data set

Table 3.5 lists the statistical values of the validation calculated from all the independent VAL sub-sets pooled. Except for Ash, the *RMSEP* of Cel, Hem, Lig and Ash obtained in the present study were higher than those (compared to SNV+2nd treatment only) found by Liu et al.,[35] in switchgrass (0.93, 0.69, 0.80 and 0.68 g 100g^{-1}) and corn stover (1.02, 1.15, 1.02 and 1.09 g 100g^{-1}). One possible explanation could be that in their study the concentration of cellulose, hemicellulose and lignin was measured using different methods (HPLC and UV-visible spectrophotometry), while a similar method to ours was used for ash. As mentioned above, the calculation of some parameters suffers from limitations of measurements suggesting that measurement of parameters using a more accurate reference method would allow better correlations to be established between spectral and chemical data. This observation is important in as far as these authors[35] performed an independent validation.

Concerning the following comparisons, several authors[7,8,10,12,45,47] performed random validations without taking the provenance of the samples into account. In the present study, the *SEP* of simple biochemical fractions (fiber parameters) NDSol, Hem, Cel and Lig were clearly lower than those found in plant raw material from the organic industry and in crop residues from tropical agrosystems[12] (3.02, 3.86, 2.92 and 2.80 g 100g^{-1} respectively). We found lower *SEP* for Hem and Lig than in rice straw[45] (1.70 and 2.10 g 100g^{-1}). We also found the same, lower and higher *SEP* for Hem, Cel and Lig respectively than that found in perennial forage grasses[8] (1.37, 1.36 and 0.86 g 100g^{-1} respectively). Nevertheless, regarding

the *SEP* for Lig reported in the study on different biomass feedstocks[7] (0.64 g $100g^{-1}$) there appears to be ample opportunity to improve the predictive power of our model.

The *SEP* of complex biochemical fractions $aNDF_{om}$ and ADF_{om} were respectively similar to and lower than those found in whole maize plant (2.43 and 1.85 g $100g^{-1}$), respectively lower than and similar to those found in European compound rabbit feed[47] (3.2 and 1.4 g $100g^{-1}$), and respectively higher and lower than those found in forage perennial grasses[8] (1.58 and 1.54 g $100g^{-1}$).

In the present study, the *SEP* for Ash was higher than that reported in different biomass feedstocks[7] (0.58 g $100g^{-1}$) and in whole maize plant[10] (0.38 g $100g^{-1}$). However our *SEP* for Ash was lower than that found in plant raw material from the organic industry and in crop residues from tropical agrosystems[12] (2.14 g $100g^{-1}$) and in rice straw[45] (0.80 g $100g^{-1}$).

RPDp ranged from 1.3 for Lig to 5.6 for Ash. Compared to *RPDp* reported by others[12] (2.1 and 6.1 respectively), except for Hem and Lig, the predictive power of the model we developed was reasonably good. Nevertheless focusing on the *RMSEP,* we best predicted all the parameters taken together. The *Av.GH*s were low and ranged from 1.15 for ADF_{om} to 1.28 for NDSol. These results confirmed that all the samples were well represented in each CAL_X sub-set and that this was also true for all the parameters. Including extreme samples (outliers) in our data base was thus a good decision.

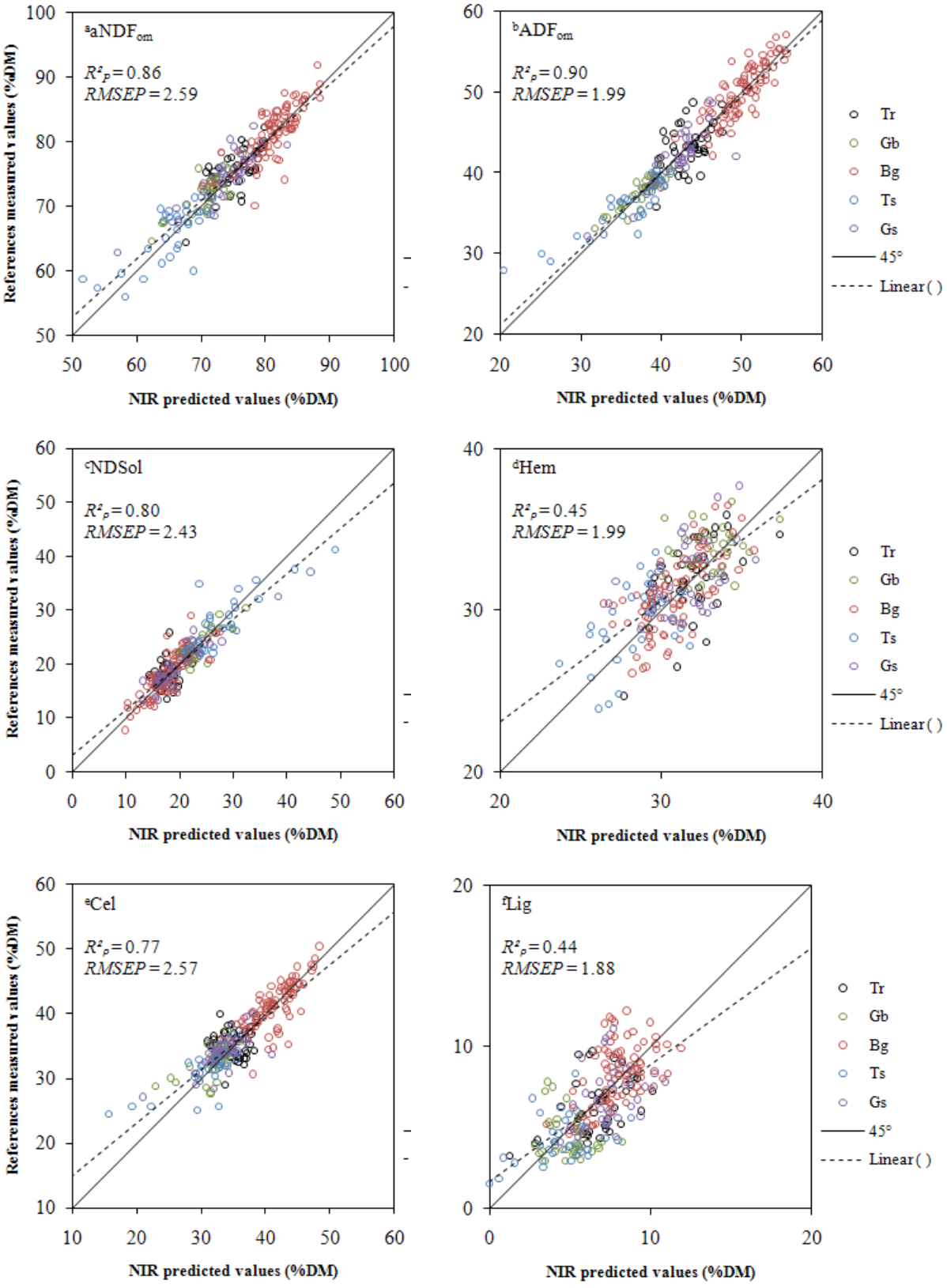
In all of the previous studies, the samples came from different locations and were even harvested in different years. That is because this is the best way to (i) include variations in sample chemical characteristics, to (ii) make sampling profitable and to recover the cost of running a trial. Paradoxically very few authors used independent validation, which requires that validation samples come from different experiments, harvest dates or batches. So, with the aim of determining the true prediction capacity of our model, we compared results from the independent validations conducted at each location (Table 3.5) with random validation from the pooled calibration cross-validations (Table 3.3). The comparison between these two validation approaches showed that the *RMSEP* for Hem increased by 23% and for Lig by 44% with respect to *SECV*. These results show that if random validation does not account for the origin of the samples, this may lead to approximations and to overestimation of the prediction power and accuracy of an NIR model. The last line in Table 5 shows the increase in the percentage between "classical" *SECV* (Table 3.3) and *RMSEP* ($\%RMSEP_I$ = (*RMSEP-SECV*)*100/*SCEV*) with an increase in error of between 30% and 75%. We thus suggest that most of the "classical" *SECV* should be re-evaluated to obtain an actual estimate of performance. If we take to the extreme the reasoning, random validations could be considered

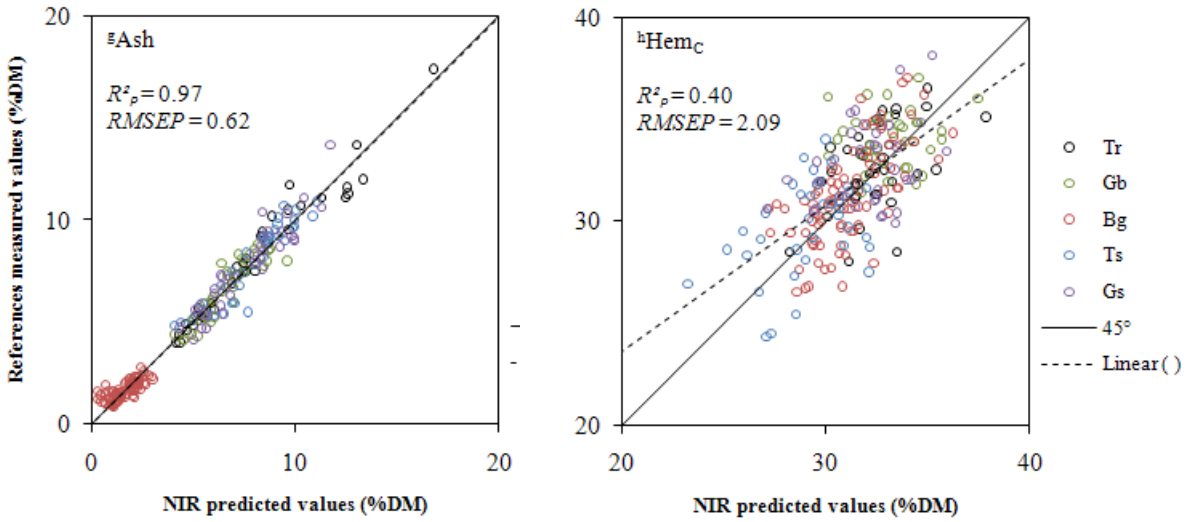
as a “classical” cross-validation and by extension as an overoptimistic assessment of the power prediction of a NIR model.

The results of the pooled validation are also shown in the form of scatter plots (Figure 3.2). For the majority of parameters, the predictions were satisfactory for most of the samples independent of the location and of the anatomical part concerned. Samples from each anatomical part were well distributed over the range for each parameter except for Ash. Bagasse ash content (red circles) clearly differs from the other anatomical parts of sugarcane. Yet Ash was the most accurately predicted parameter. Paradoxically, it is well known that ashes are transparent to near-infrared rays. One possible explanation is that Ash content tallied with the reverse of the organic matter (i.e. organic matter = $DM_{HR70} - Ash_{DM70}$), and we already know that NIRS satisfactorily predicts organic matter content.

Figure 3.3 shows a comparison between the standard error of the reference laboratory data (laboratory repeatability, *SEL*) and the *SEP*. The *SEL* of each parameter was calculated using 228 samples analyzed in duplicate for Cel, Lig and Ash, in triplicate for ADF_{om} and Hem and with four replicates for $aNDF_{om}$ and NDSol. The *RMSEP*:*SEL* ratio ranged from 7.1 for Lig to 1.8 for Hem. The model showed the poorest prediction capability for Lig but, surprisingly, the *RMSEP* for Hem was the closest to *SEL*. Given the variability between blocks in field experiments, these results are encouraging, and the differences observed are more than acceptable with respect to the mean and range of each parameter. Moreover considering the use of hazardous reagents, and the costly and time-consuming procedure needed to measure lignocellulosic compounds, their predictions by NIRS appear to be sufficiently accurate and very useful for our modeling requirements. Indeed the *RMSEP*:*Mean* ratio never exceeded 12% except for Lig (29%) because of its low mean value. The *RMSEP*:*Range* ratio ranged from 4% for Ash to 17% for Lig. Considering its relatively good prediction accuracy, we consider that NIRS can be used to predict the chemical composition of samples from different anatomical parts of sugarcane plant as well as used as input data to develop an ecophysiological growth model. Nevertheless efforts are required to improve the accuracy of the model, especially for lignin prediction.

Figure 3.6 Scatter plots of NIR predicted values versus reference measured values (% DM) for four validation sets based on different anatomical parts of the sugarcane plant





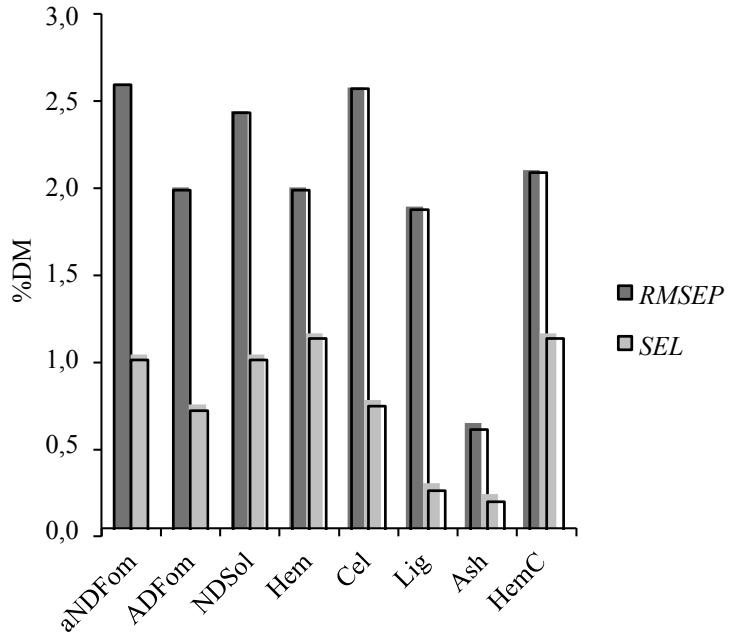
[a]aNDF$_{om}$ = neutral detergent fiber with alpha amylase, [b]ADF$_{om}$ = acid detergent fiber, [c]NDSol = neutral detergent soluble, [d]Hem = hemicellulose-like, [e]Cel = cellulose-like, [f]Lig = lignin-like, [g]Ash = total ash, [h]Hem$_C$ = hemicellulose computed from predicted values (aNDF$_{om}$ - ADF$_{om}$), R^2_{CV} = coefficient of determination of cross-validation, *RMSEP* = root mean square error for prediction, black circles, Tr = Trash; green circles, Gb = Green leaf blade; red circles, Bg = Bagasse; blue circles, Ts = Top of the stalk and purple circles, Gs = Green leaf sheath.

3.8. CONCLUSIONS

This paper describes the real capability of our model to predict the chemical composition of sugarcane biomass and confirms that we can produce data with acceptable accuracy compared with the biochemical fractionation method. Thus predictions from our NIR model can reasonably be used as input data for the "Mosicas" ecophysiological growth model[28]. In addition, we present a unique sampling and experimental design that intentionally introduces maximal variability in genotype, age, growth location, anatomical part of the plant and particle size. Combined with an original validation approach, the power of our NIR model to predict independent samples in comparison with other NIR models evaluated by classical random validation is clearly demonstrated. Due to sampling constraints, gathering field data is time and labor consuming. Added to the cost of the treatment and chemical analysis of the samples, it is almost inconceivable to build a mechanistic model describing changes in the partitioning of lignocellulosic compounds in each anatomical part of the whole plant. However ecophysiological growth models are the best tools to match an ideotype with industrial demand and to design future climate scenario. Indeed based on our results, we

expect that not only researchers but also the sugar industry will see the advantage of rapid prediction of the chemical composition of contrasted sugarcane biomass using NIRS. Now further experiments and a large number of samples with more contrasted agronomic traits are required to anticipate changes in cultural systems and to enlarge the calibration data set for more robust and accurate predictions.

Figure 3.7 *SEP*, standard error of prediction (bias corrected) and *SEL*, standard error of laboratory or of reference data, in percentage dry matter (%DM)



$aNDF_{om}$ = neutral detergent fiber with alpha amylase, ADF_{om} = acid detergent fiber, NDSol = neutral detergent soluble, Hem = hemicellulose-like, Cel = cellulose-like, Lig = lignin-like, Ash = total ash, Hem_C = hemicellulose computed from predicted values ($aNDF_{om}$ - ADF_{om}).

Acknowledgements:
Special thanks to the technical staff of "eRcane" experimental station for the treatment of sugarcane stalk samples.

Les references bibliographiques correspondant à cet article (chapitre 3B) sont présentées dans la partie bibliographie du document de these.

CHAPITRE 4.
ÉLABORATION DES RENDEMENTS ENERGÉTIQUE ET SUCRIER DE LA BIOMASSE DE CANNE À SUCRE EN CONDITIONS CLIMATIQUES ET CULTURALES CONTRASTÉES

4A. DÉFINITION ET ESTIMATION DES VARIABLES CONSTITUTIVES DU RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE DE LA BIOMASSE DE CANNE À SUCRE ET LEUR VARIABILITE À LA RÉCOLTE

Ce chapitre correspond à l'article soumis dans la revue *Biomass & Bioenergy*, intitulé « *Dry matter partitioning and low heating value of the aboveground biomass components of sugarcane genotypes growth in contrasted areas of the Reunion Island: which factors affect energetic potential of sugarcane ?* ». L'objectif de cette article est (i) la définition et l'estimation des variables constitutives du rendement énergétique de la biomasse de canne à sucre et (ii) l'étude de la variabilité entre composantes anatomiques sous l'effet de facteurs de variations agro-climatiques à la récolte.

Les résultats de cette article constituent une étape essentielle dans le déroulée de cette thèse car ils ont permis d'une part de formaliser le rendement énergétique de la production et d'autre part d'identifier quels sont *in fine* les facteurs de variations important agissant sur ce rendement.

Dry matter partitioning and low heating value of the aboveground biomass components of sugarcane genotypes growth in contrasted areas of the Reunion Island: which factors affect energetic potential of sugarcane?

Damien Sabatier[a*], Jean-François Martiné[a], Frédéric Chiroleu[b], Camille Roussel[c], Philippe Letourmy[d] and Bertrand Ney[e].

*email: damien.sabatier@cirad.fr

Summary

Energy production from sugarcane biomass has a real economic impact for producing country. Sugarcane cropping systems require optimization for multi-uses production with both focusing on sucrose and energetic valuation of sugarcane aboveground biomass. The first objective of this work was to examine aboveground biomass partitioning and low heating value (LHV) of biomass components for 3 cultivars *Saccharum cv.* (R570, R579 and R585) in field experiments during two consecutive crop cycles (plant crop and first ratoon) in 4 locations of Reunion Island with contrasted climatological conditions and cropping systems. The second aim was to assess energetic potential of biomass in order to define which factors affect energy production. Millable stalk represents the main fraction of dry aboveground biomass at harvest (range was 61,5 to 75,6%). Energetic potential could be rise of 57 % from millable stalk to whole green cane. Energetic potential of residual biomass (aboveground biomass – millable stalk) represent roughly 50 % of the annual energetic potential of sugarcane biomass. Fraction of biomass harvested increase to 16% from millable stalk to whole green cane. Fractions of biomass harvested fiber in cellulose, lignin and hemicellulose increase slightly to 2%, to 1% and decrease to 2% respectively from millable stalk to whole green cane. Dry aboveground biomass explains 97 % of the variance of sugarcane biomass energetic potential.

Keywords: aboveground biomass, fiber, hemicellulose, cellulose, lignin, low heating value, energetic potential, sugarcane

4.1. INTRODUCTION

World energy consumption is forecasted to increase by 53 % until 2035. In parallel renewables is the world's fastest-growing energy source (Gruenspecht, 2011). Biomass is considered as the renewable energy source with the highest potential to contribute to the energy needs of modern society for both industrialized and developing countries worldwide (Demirbas et al., 2009). Besides, global interest in sugarcane (*Saccharum* spp.) has increased significantly in recent years due to its economic impact on sustainable energy production (Cheavegatti et al, 2011).

Sugarcane is well known as a high potential energy crop because it has positive energy balance, photosynthetic efficiency and biomass yield greater than others crops under tropical climate (Goldemberg et al., 2008; Waclalovsky et al., 2010). Furthermore from cane harvest and processing, 8 products and by-products can potentially be used as renewable raw materials in human and animal feeding, for the extractive, chemical and biochemical industry or still to supply renewable energy industry (Almazan et al.,1998). Nevertheless biomass from sugarcane crops is underused (Eggleston et al., 2009) and it is currently estimates that more than 50 % is non-recovered (Pouzet, 2011). While residual biomass could be an appreciable source of renewable energy and played an important part in sugar industry sustainability. However, retention of residual biomass in sugarcane cropping systems for its long-term benefits and its uses as a source of energy for cogeneration of electricity ask question (Hassuani et al., 2005; Pankhurst, 2005).

In Reunion Island – following the world trend – the exogenous primary energy consumption never stopped growing up during last decade. This French overseas department posted in 2009 a penetration rate of renewable energy of 32.5% (only electric energy). Biomass provides 60% of the renewable electric production and contributes to toward 11% of total electric power consumption of the island (www.arer.re). An ambitious project called Green Energy Revolution Reunion Island (GERRI) has been started in 2007 for assessing self-sufficiency of the island by 2030 (transport, electricity and storage) (www.gerri.com). Based on a turnover of the whole sugarcane crop (the two mains cultivars planted are R570 and R579) by a new cultivar R585 with high yield and fiber concentration (20 and 32% more than control cultivar R579 respectively, data not shown), Reunion Island count on a rising of bagasse production of about 60% to the year 2020 (Dupre, 2011). By 2030, bioenergy from biomass will have to provide about 50 % of total electric power consumption, i.e. roughly as fifth as much of the current production. Hereof it ensues that to reach this production level a

combination of those following three options is required (i) deployment of news crop surfaces (e.g. fallow and high lands), (ii) increasing of energetic potential per area (selection of and using of new cultivars) and (iii) increasing rate of biomass conversion process (combined cycle boiler, gasification). In Reunion Island, biomass used for electricity is essentially stemming from sugarcane processing (bagasse). Two thermal power plants use combustion to convert biomass to bioenergy and to provide heat, steam and electricity at the two sugar mills throughout the harvesting season and the surplus of electricity supply the grid. Regarding on the local context and a short term, discussions in the current paper were focused on how we could maximize energy production per area.

Among the quality characteristics of aboveground biomass, harvest index is important for energetic potential and agronomic impacts (Braunbeck et al., 1999). Equally, fiber is penalizing for sugar extraction process (Glaz et al., 2011), lignocellulosic compounds and extractives are important for energy conversion technology or upgrading (Burner et al., 2008; Boudet et al., 2003) and low heating value (LHV), variables previously defined and ash content are crucial in combustion (Rhén, 2004). Besides, it is well known that variations of quality characteristics of aboveground biomass, especially lignocellulosic compounds, depend on genotypes, environment, age and the part of the plant harvested (Han et al., 2007). Several studies conducted on sugarcane confirmed that quality characteristics of aboveground biomass could be modulated by cropping practices (Pouzet, 2011; Banda and Valdez, 1976; Godoy and Elliot, 1981; Kevelenge et al., 1983; Mislevy et al., 1995; 22 De Andrade, 2003; 23 Fernandes et al., 2003; Andrade et al., 2004). However and to our knowledge no study has been conducted in different sites. Tested effects were genotypes, cycles and ages, and studies concerning mainly nutritive value of production for animal feeding but on no account for energetic potential. Thus, more knowledge on how both climate and practices affect the quality characteristics of the aboveground biomass is needed for making decisions and optimizing cropping system for multi-uses production with a focusing on an energetic valuation of the sugarcane industry fibrous by-products (i.e. bagasse and residual biomass).

The objectives of this study are (i) to compare cultivars and sites for aboveground biomass, partitioning in components, fiber, lignocellulosic compounds and LHV at harvest time for 2 crop cycles and (ii) to assess energetic potential of sugarcane crop according to several combinations of climate and practices (crop cycles, sites, cultivars and methods of harvest) in order to define which variables affects energy production.

4.2. MATERIALS AND METHODS

4.2.1. Field experiment

Field experiments were located in four contrasted areas of Reunion Island. Near-shore areas experiments, La Mare and Etang Salé sites, were planted respectively in the north (20°54'S, 55°31'E, 70 m altitude) and south west (21°15'S, 55°22'E, 20 m altitude) of the island on nitisol dystric (25 FAO, 2007). Medium high, Menciol and high, Vue Belle ground areas experiments were planted respectively in the north east (20°58'S, 55°36'E, 400 m altitude) and the west (21°05'S, 55°17'E, 720 m altitude) of the island on andosol dystric and andic cambisol (25 FAO, 2007) respectively.

The climatological data were collected near from the experimental sites of Menciol, Etang Salé and Vue Belle and at the experimental site of La Mare. Data were recorded at 5 s intervals and averaged per day from 1 January 2008 to 30 November 2010 using an Enerco 408 weather station (CIMEL Electronic). Air temperature and rainfall were measured with resistance probe and a self-tipping gauge respectively both located 1.5 m above ground.

Three out of four experiments were planted in 2008, at the end of the rainfall season (Menciol, 21/3 and La Mare, 22/4) and in the middle of the dry and cold season (Etang Salé, 28/7). The Vue Belle experiment was planted in 2009 during the rainy and warm season (27/1). On each experiment, 3 cultivars R570, R579 and R585 were planted in randomized sub-plots constituted of 9 lines of 11 m spaced from 1.5 m within 3 replicate blocks. All the trials were well fertilized annually with 150 kg, 180 kg and 240 kg of N, P and K ha^{-1} respectively, in accordance with recommendations of Chabalier et al., 2006 (28). Fertilizer was applied in the furrow and later as a top dressing to provide optimal N, P and K intake during growth season. LM and ES were irrigated while ME and VB were rainfed.

The experiments of La Mare, Etang Salé and Menciol were monitored during two crop cycles, plant cane (PC during 2008-2009) and first ratoon (R1 during 2009-2010). Vue Belle experiment was just monitored during PC (2009-2010). La Mare, Etang Salé and Menciol PC were all harvested in close period (October 29th, 2009, November 2nd, 2009 and October 23rd, 2009 respectively) at 18, 16 and 19 month after plantation respectively (Table 4.1). Vue Belle was harvested during September 2010, 20 month after plantation. R1 crops were harvested in November 2010 about 13 months after PC harvesting.

Figure 4.1 Climatologic conditions and irrigation for 3 years of experiments (2008-2010) in 4 contrasted sites of la Reunion island (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle).

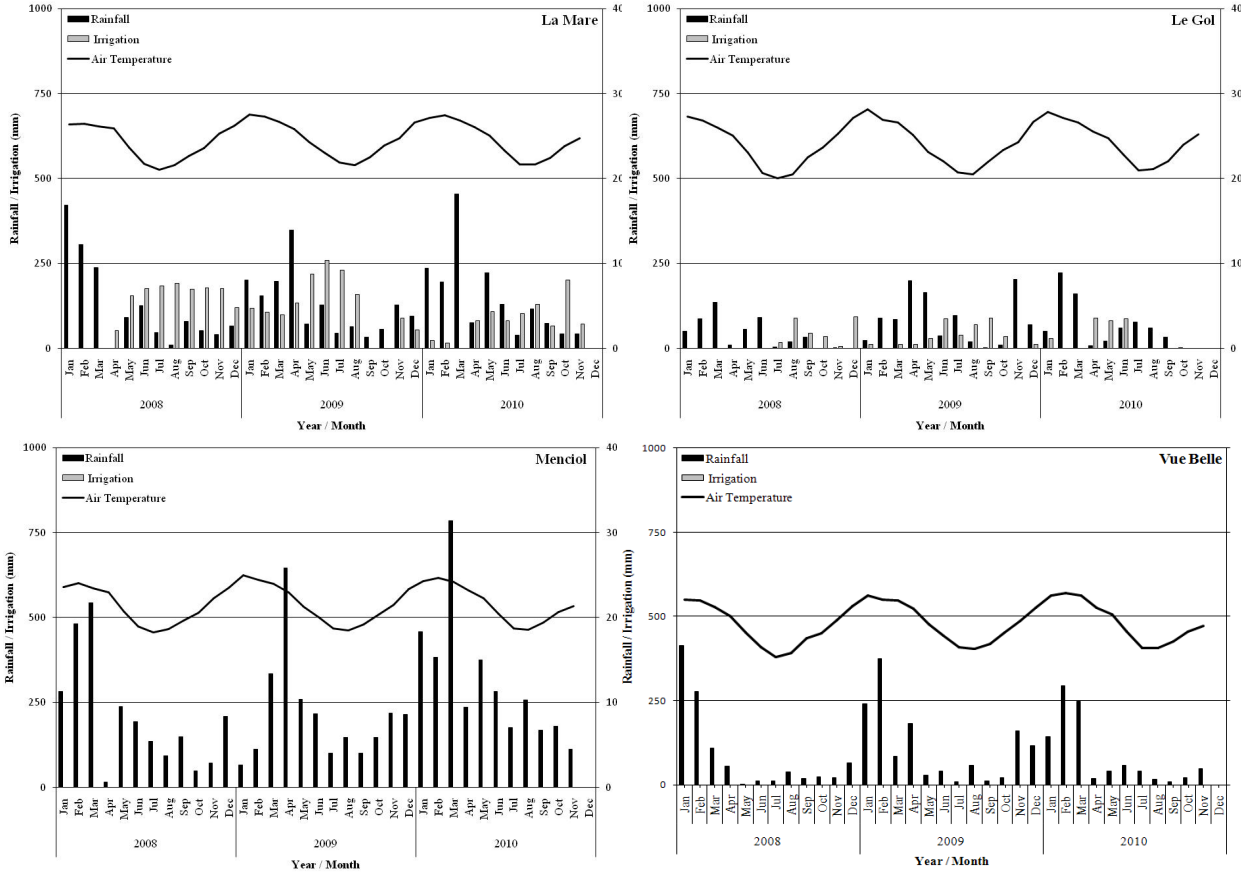


Table 4.1 Crop cycles, crop start date and duration, daily mean air temperature and radiation, cumulative rainfall, irrigation and ETP for 3 years of experiments (2008-2010) in 4 contrasted sites of la Reunion island (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle).

Sites	Crop cycles	CSD[a] (d/m/y)	Duration (month)	Altitude (m)	Radiation (MJ m^{-2})	Air Temperature (°C)	Rainfall (mm)	Irrigation (mm)	ETP[b] (mm)
La Mare	Plant crop	22/4/8	18	70	19.4	23.9	1813	2734	2136
	First ratoon	29/10/9	13		19.0	24.7	1849	1025	1559
Etang Salé	Plant crop	28/7/8	16	20	17.3	23.8	779	669	1684
	First ratoon	2/11/9	13		17.0	24.5	981	300	1393
Menciol	Plant crop	21/3/8	19	400	15.5	21.1	3325	0	1883
	First ratoon	23/10/9	13		15.7	21.7	3977	0	1332
Vue Belle	Plant crop	27/1/9	20	720	13.0	19.5	1953	0	1504
	First ratoon	-/9/10	NA		NA	NA	NA	NA	NA

[a]CSD = crop start date

[b]ETP = potential evapotranspiration

4.2.2. Sampling and treatment

The following part is inspired from operating procedure described by Inman-Bamber, (Inman-Bamber et al., 2002). Five destructive samplings were conducted on each sub-plot of each PC experiment starting around 6 to 10 month after plantation and at 8 weeks intervals thereafter. Each sub-plot of each R1 experiment was sampled on six occasions starting at around 3 months after PC harvesting and at 8 weeks intervals thereafter.

For each sampling date, samples were taken from pre-planned grid positions in alternate rows in each sub-plot. Destructive samplings conducted during PC experiments were carried out on left hand side of each sub-plot in alternate rows 2 and 3, and during R1 experiments on right hand side of each sub-plot in alternate rows 7 and 8. A sample plot of 1 m was cut at ground level at each sampling position and removed together with the associated dead leaves on the ground and stalk material. All samples were partitioned into five components: green leaf blade (GB), green leaf sheath (GS), meristem (TS), millable stalk (MS) and trash (TR). "Meristem" was the portion of stalk and leaf sheaths above the internode carrying the fourth leaf under terminal visible dewlap (TVD = 1). Sugarcane leaves are numbered from top to bottom starting with the uppermost leaf showing a visible dewlap designated as leaf +1 (Martiné, 2003; Rae e al., 2006).

The fractions of ith components fCi (GB, GS, TS, MS and TR) were weighted fresh (g m^{-2}). All components except MS were chopped manually into pieces about 50 mm long. Approximately 15 kg of precutting MS were roughly crushed with a cutter grinder (JEFFCO Cutter Grinders, model L118C, JEFFRESS Engineering Pty Ltd, Dry Creek, Australia) to obtain sugarcane pulp. A subsample of 1000 g of sugarcane pulp was weighed and pressed for 1.5 minutes at 200 bars with a hydraulic press Model OB-103 (Pinette Emidecau Industries, Chalon sur Saone, France). After crushing and pressing, a filter press cake called bagasse was obtained.

Finally, bagasse and sub-samples of the chopped components were weighted fresh and then dried 3 days at 70 °C in a ventilated incubator (Lequeux, Paris, France) to avoid N volatilization and to obtain dry matter content of the ith components DMi (g g^{-1}).

4.2.3. Biochemical fractionation and prediction by NIRS

Dry samples were ground in a Thomas Willey™ (Swedesboro, NJ, USA) knife crusher to pass through a 2 mm screen. Among 1710 samples from the biomass experiment, 228 samples with a wide variation in their characteristics (genotype, growing site, age, anatomical part) were reground with a Cyclone crusher Cyclotec™ (Foss, Nanterre, France) through a 1 mm

screen and then analyzed according to the sequential method reported by Van Soest (Van Soest et al., 1991) and reviewed by Mertens (Mertens et al., 2002). Non-structural carbohydrates (NDSol), fiber (NDF), hemicellulose, cellulose, lignin and ash were determined by mass loss during sequential treatment of samples and combustion as described by Sabatier et al. (Sabatier et al., 2011).

Results of biochemical fractionation (moisture free and ash free) were used as a reference data for near infrared reflectance (NIR) model calibration. After validation, the NIR model (Sabatier et al., 2012) was used to predict chemical composition (NDSol, NDF, hemicellulose, cellulose, lignine and ash) of all sugarcane samples. Therefore, fractions of the ith components in NDSoli, NDFi and Ashi (g $100g^{-1}$), and fractions of NDFi in the jth lignocellulosic compounds (hemicellulose, cellulose and lignine) LCCij (g $100g^{-1}$) were calculated.

4.2.4. Calculation of energetic potential

Dry aboveground biomass (g m^{-2}) is classically simulated by sugarcane growth models. Resulting from conversion process of intercepted photosynthetic active radiation (PARi) into dry biomass, dry aboveground biomass is a most important value to assess production. To determine factors affecting energetic potential of production, it is important to identify variables used to formalize energetic potential. Energetic potential of production correspond to the product of the harvested or harvestable biomass (harvest index) by heating value of harvested biomass (Pouzet, 2011). Harvest index mainly depends on method of harvest and heating value depends on quality characteristics of harvested biomass. Classically sugarcane crops can be harvested by hand labour or mechanically (Waclawovsky et al., 2010) and these methods of harvest lead define two extreme types of material hauled to the mill: millable stalk (hand labour harvest) and whole green cane (mechanical harvest). Whole green cane (WGC) dry matter equals the sum of the components MS, TS, GB and GS dry matter. Thus, we need to determine fractions of dry aboveground biomass (dAB) in the ith components (dCi) to assess quality characteristics of harvested biomass:

$$(1)\quad dAB = \sum (fCi \times DMi)$$

$$(2)\quad dCi = (fCi \times DMi) / dAB$$

If we consider now the quality characteristics of harvested biomass with the NDFi (g $100g^{-1}$), the fractions of NDFi in the jth lignocellulosic compounds LCCij (g $100g^{-1}$) and the jth

lignocellulosic compounds low heating value LHVj (MJ g^{-1}) we are able to calculate the energetic potential of harvested biomass Ep (MJ m^{-2} y^{-1}) as follow:

$$(3)\quad Ep = dAB \times \sum\sum (Ci \times NDFi \times LCCij \times LHVj)$$

with LHVs of hemicellulose and cellulose (16,7 MJ g^{-1}), and lignin (25,5 MJ g^{-1}) according to the values given by Doat and Valette (Doat and Valette, 1981) and Ep lead back to a per year value by multiplying it by ratio 365:cycle duration.

4.2.5. Statistical analysis

One-way analysis of variance (ANOVA) (Chambers et al., 1992) were used to determined the statistical significance differences between cultivars and sites for above ground biomass yield, non structural carbohydrates in MS, fractions of aboveground biomass in components, fiber, hemicellulose, cellulose and lignin, LHV and energetic potential (Table 4.2). Crop cycle effects were also tested (data not shown) but we compared cultivars and sites independently of crop cycle because of differences (bias) in cycle length, plantation date and sampling age between sites at PC. Multiple comparisons of means were conducted using Tukey honest significant differences (HSD) test at $P < 0.05$ (Miller, 1981). Statistical analyses were conducted using software R (R Development Core Team, 2010).

4.3. RESULTS

4.3.1. Climatological conditions and irrigation

Monthly air temperatures evolution curves (Figure 4.1) were highly contrasted between near-shore and highland sites but presented the same shape during the years 2008-2010. Mean air temperatures minima and maxima were reached in July-august and in January-February respectively for each site. Mean air temperatures ranged from 14 °C for Vue Belle to 28 °C for the two near-shore sites (La Mare and Etang Salé). Crop cycles daily mean air temperature and radiation of sites were both ordered as follow La Mare > Etang Salé > Menciol > Vue Belle (Table 4.1).

Rainfall season is usually spread over 4 to 5 months from December to April in Reunion Island (Figure 4.1). Rainfalls were highly contrasted between sites. Cumulative rainfall during crop cycles ranged from 779 mm for PC of Etang Salé to 3977 mm for R1 of Menciol.

Cumulative rainfall of sites were ordered as follow Menciol > Vue Belle > La Mare > Etang Salé each crop cycle (Table 4.1).

Irrigation was well for La Mare (2734 mm and 1025 mm for PC and R1 respectively). In Etang Salé the sum of daily ETP was superior to the sum of rainfall and irrigation (Table 4.1), so we supposed that crop suffered from water stress during the two crop cycles. Even if the difference between ETP and total input water was low, rainfalls were badly spread over crop cycles that lead to more water stress than it appears (Figure 4.1).

Crop start dates of experiments were postponed and this led to many differences between sites for plant crop duration. Confusion due to mixed effects between age and climate (Van Heerden et al., 2010) for PC was the main reason why we do not compared crop cycles in each other.

4.3.2. Dry aboveground biomass - yield

Dry aboveground biomass tended to decrease from PC to R1 (Figure 4.2). A first explanation for dAB decrease from PC to R1 was the differences of crop cycle duration between sites (3 to 7 months growth more for PC crops) and a second one could be that there is genetic factor affecting ratooning ability in commercial cultivars (Matsuoka et al., 1999).

Cultivars - There were no significant differences between cultivars at each crop cycle for dAB. However, dry aboveground biomass of R585 (9444 g m^{-2} for PC and 7346 g m^{-2} for R1) was on average higher than R570 (8265 g m^{-2} for PC and 6502 g m^{-2} for R1) and R579 (7850 g m^{-2} for PC and 6013 g m^{-2} for R1). On average the distribution for dAB by cultivars were ordered each crop cycle as follow R585 ≥ R570 ≥ R579.

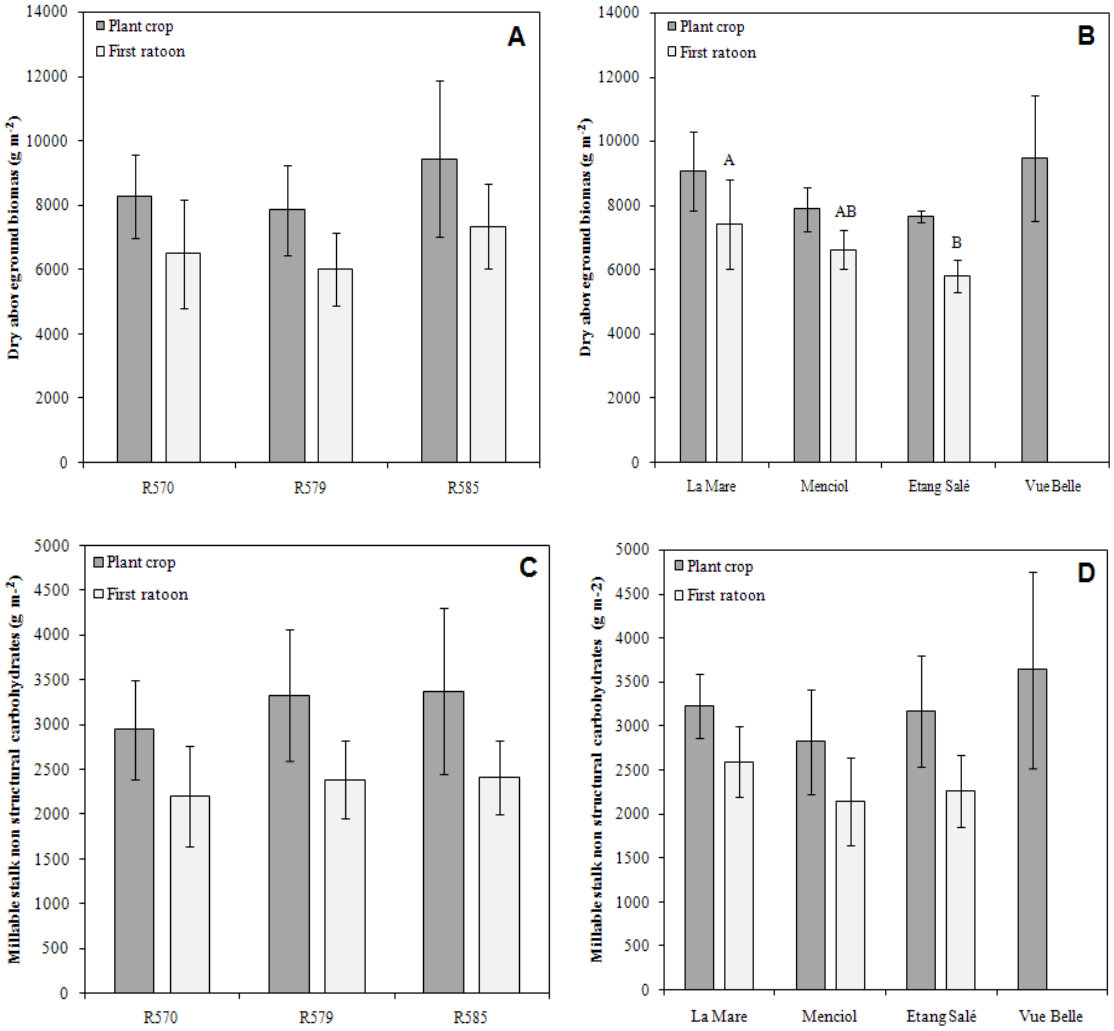
Sites - There were no differences between sites for PC dry aboveground biomass. However, R1 of La Mare (7428 g m^{-2}) was significantly higher than Etang Salé (5820 g m^{-2}) for dry aboveground biomass, and there were no significant differences between Menciol (6613 g m^{-2}) and the other sites (La Mare ≥ Vue Belle ≥ Menciol ≥ Etang Salé).

4.3.3. Dry aboveground biomass – partitioning

4.3.3.1. Partitioning of aboveground biomass in components (dCi)

There were no significant cultivars*sites interactions for partitioning of aboveground biomass in dCi (Table 4.3). For MS, cultivars and sites tended to decrease from PC (mean was 71.8 g $100g^{-1}$) to R1 (mean was 66.5 g $100g^{-1}$).

Figure 4.2 Mean dry aboveground biomass (g m^{-2} A and B) and millable stalk nonstructural carbohydrates (g m^{-2} C and D) of 3 cultivars (R570, R579 and R585) planted in for 4 sites (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle) at harvest time in 2009-2010 (Plant crop) and 2010 (First ratoon).



Large bars with same letter (capitals for First ratoon) are undifferentiated ($P < 0.05$) by Tukey's honest significant difference (HSD). Narrow bars that are on top of large bars represent standard deviation SD ($n = 12$ for cultivars and $n = 9$ for sites).

Cultivars - R570 differed significantly each crop cycle to the other cultivars for MS, TS, TR and WGC. MS of R579 (75.6 and 70.1g $100g^{-1}$ respectively) and R585 (73.1 and 66.7g $100g^{-1}$ respectively) were significantly higher each crop cycle than R570 (66.8 and 62.8g $100g^{-1}$ respectively). TS of R570 (5.1 and 5.2 g $100g^{-1}$ respectively) were significantly higher each crop cycle than R585 (3.5 and 4.8 g $100g^{-1}$ respectively). R570 also produced more TR (17.7 and 19.9 g $100g^{-1}$) than the other cultivars (range was 11.4 g $100g^{-1}$ for R579 plant crop to 15.4 g $100g^{-1}$ R585 first ratoon).

Sites - There were no significant differences each crop cycle between sites for MS. However, Etang Salé was on average higher (72.1 g $100g^{-1}$) than the other sites (68.6 g $100g^{-1}$) for MS. Etang Salé was also significantly lower than the other sites for GB and GS each crop cycle (5.5, 5.2, 0.4 and 0.5 g $100g^{-1}$ respectively). La Mare was significantly lower than each crop cycle (3.0 and 4.1 g $100g^{-1}$respectively) for TS than the other sites (range was 4.2 g $100g^{-1}$ for PC of Vue Belle to 6.5 g $100g^{-1}$ for R1 of Menciol).

Components - The distribution for the fractions of above ground biomass in components was ordered as follow MS > TR ≥ GB > TS > GS (Table 4.3).

4.3.3.2. Partitioning of components in fiber (NDFi)

Cultivars and sites differed significantly at each crop cycle for all components fiber except R1 meristem. There was only a significant cultivars*sites interaction for green leaf blade fiber. Globally, there were no differences of ranking between crop cycles (Table 4.4).

Cultivars – There were significant differences between cultivars in each crop cycle for millable stalk fiber. On average the distribution for millable stalk fiber by cultivars were ordered in each crop cycle as follow R585 > R570 > R579. Cultivars differed in each crop cycle for WGC fiber and were ordered the same as for MS. GB and GS fiber of R570 (69,9 and 69,5 g $100g^{-1}$ and 74,2 and 72,8 g $100g^{-1}$respectively) were on average higher each crop cycle than the other cultivars (range was 68,0 to 69,3g $100g^{-1}$ and 68,6 to 71,0 g $100g^{-1}$). Trash fiber of R579 was lower in each crop cycle than the other cultivars (76,2 and 72,2g $100g^{-1}$ respectively).

Sites – Etang Salé was significantly lower in each crop cycle than the other sites for MS (37.6 and 37.8g 100 g^{-1} respectively), TS (57.5 and 64.3 g $100g^{-1}$ respectively), GB (66.2 and 69.6 g $100g^{-1}$ respectively) except for R1, GS (64.1 and 71.8 g $100g^{-1}$ respectively) and WGC fiber (40.8 and 41.6 g $100g^{-1}$ respectively). PC of La Mare was on average higher than the other sites for MS (44.5 g $100g^{-1}$) and WGC fiber (48.6 g 100 g^{-1}). R1 of Menciol was on average higher than the other sites for all components fiber contents.

Components - On average the distribution for components fiber was ordered as follow TR > GS > GB > TS > MS. Fiber tended to increase from MS (mean was 45.5 g $100g^{-1}$) to WGC (mean was 52.5 g $100g^{-1}$). Taking into account TR in the relative fiber assessment (data not shown) lead to increase fraction of harvested biomass in fiber especially due to a high fraction of TR in fiber compared to both previous components.

Table 4.3 Fractions of aboveground biomass in components Ci (g $100g^{-1}$) on a dry matter basis of 3 cultivars (R570, R579 and R585) planted in 4 contrasted areas of La Reunion Island (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle) and harvested in 2009-2010 (Plant crop) and 2010 (First ratoon).

	Fraction of aboveground dry matter in components																					
	Millable stalk				Meristem				Green leaf blade				Green leaf sheath				Trash				Whole green cane			
	Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon	
	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig
Cultivars																								
R570	66.8 ± 5.2	b	62.8 ± 5.1	B	5.1 ± 1.2	a	5.2 ± 1.7	A	8.6 ± 2.1		9.8 ± 4.5		1.8 ± 1.0		2.4 ± 2.0		17.7 ± 4.2	a	19.9 ± 3.7	A	82.3 ± 4.2	b	80.1 ± 3.7	B
R579	75.6 ± 2.8	a	70.1 ± 4.7	A	4.3 ± 1.2	ab	5.2 ± 1.8	AB	7.2 ± 1.3		8.3 ± 3.0		1.7 ± 0.7		1.9 ± 1.1		11.4 ± 2.2	b	14.5 ± 3.2	B	88.6 ± 2.2	a	85.5 ± 3.2	A
R585	73.1 ± 2.5	a	66.7 ± 4.2	A	3.5 ± 0.8	b	4.8 ± 1.1	B	7.4 ± 2.0		10.2 ± 4.7		1.9 ± 1.1		2.9 ± 2.1		14.0 ± 2.5	b	15.4 ± 3.8	B	86.0 ± 2.5	a	84.6 ± 3.8	AB
Sites																								
La Mare	71.5 ± 5.1		68.1 ± 4.6		3.0 ± 0.7	c	4.1 ± 1.1	C	7.8 ± 1.4	a	9.5 ± 2.9	A	2.1 ± 0.5	a	2.5 ± 1.0	A	15.6 ± 3.4		15.7 ± 4.3		84.4 ± 3.4		84.3 ± 4.3	
Menciol	69.8 ± 6.5		61.5 ± 4.3		4.6 ± 0.8	b	6.5 ± 1.3	A	8.8 ± 0.9	a	13.6 ± 2.1	A	2.4 ± 0.5	a	4.2 ± 1.0	A	14.4 ± 5.7		14.1 ± 2.0		85.6 ± 5.7		85.9 ± 2.0	
Etang Salé	74.2 ± 3.6		70.0 ± 3.4		5.3 ± 1.0	a	4.5 ± 0.9	B	5.5 ± 1.0	b	5.2 ± 1.1	B	0.4 ± 0.4	b	0.5 ± 0.3	B	14.6 ± 3.7		19.9 ± 3.8		85.4 ± 3.7		80.1 ± 3.8	
Vue Belle	71.9 ± 4.9		NA		4.2 ± 1.2	b	NA	-	8.8 ± 1.9	a	NA	-	2.2 ± 0.6	a	NA	-	12.9 ± 2.9		NA		87.1 ± 2.9		NA	
Components																								
	71.8 ± 5.2	*b*	66.6 ± 5.4	*B*	4.3 ± 1.2	*de*	5.0 ± 1.5	*DE*	7.7 ± 1.9	*c d*	9.4 ± 4.7	*CD*	1.8 ± 0.9	*e*	2.4 ± 1.8	*E*	14.4 ± 4.0	*c*	16.6 ± 4.2	*C*	85.6 ± 4.0	*a*	83.4 ± 4.2	*A*

Means with same statistical significance (Sig) letter (lower case for Plant crop, capitals for First ratoon and italic for components) are undifferentiated ($P < 0.05$) by Tukey's honest significant differences (HSD). ± indicates the standard deviation SD ($n = 12$ for cultivars and $n = 9$ for sites).

Table 4.4 Fraction of components in fiber NDFi (g $100g^{-1}$) on a dry matter basis of 3 cultivars (R570, R579 and R585) planted in 4 contrasted areas of La Reunion island (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle) and harvested in 2009-2010 (Plant crop) and 2010 (First ratoon).

	Fraction of components dry matter in fiber																					
	Millable stalk				Meristem				Green leaf blade				Green leaf sheath				Trash				Whole green cane			
	Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon	
	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig
Cultivars																								
R570	41.2 ± 3.5	b	40.3 ± 2.8	B	66.0 ± 5.2	a	64.0 ± 3.7		69.9 ± 2.7	a	69.5 ± 3.1	A	74.2 ± 5.8	a	72.8 ± 3.4	A	78.6 ± 1.6	a	75.9 ± 1.6	A	46.4 ± 4.2	b	46.1 ± 4.6	B
R579	38.5 ± 3.0	c	37.4 ± 2.2	C	63.4 ± 4.5	b	62.1 ± 3.7		68.5 ± 2.1	b	69.0 ± 2.8	B	71.0 ± 4.6	b	69.1 ± 3.8	B	76.2 ± 1.9	b	72.2 ± 2.7	B	42.7 ± 3.4	c	42.6 ± 3.7	C
R585	45.0 ± 2.4	a	43.5 ± 2.7	A	62.7 ± 4.1	b	62.3 ± 3.1		69.3 ± 2.6	ab	68.0 ± 3.1	AB	71.8 ± 5.6	b	68.6 ± 3.3	C	78.1 ± 1.5	a	74.7 ± 1.6	A	48.4 ± 2.8	a	48.2 ± 3.5	A
Sites																								
La Mare	44.5 ± 3.3	a	41.6 ± 4.1	B	66.7 ± 3.1	a	58.6 ± 1.7	A	71.1 ± 2.3	a	65.9 ± 1.4	C	75.2 ± 2.0	a	66.4 ± 3.1	A	77.4 ± 1.4	ab	73.1 ± 1.6	B	48.6 ± 3.4	a	45.7 ± 4.3	A
Menciol	42.4 ± 2.7	b	41.7 ± 2.0	A	65.2 ± 2.5	a	65.5 ± 0.8	A	68.9 ± 1.5	b	71.0 ± 1.7	A	74.0 ± 2.0	a	72.3 ± 3.3	A	79.1 ± 1.6	a	76.4 ± 1.7	A	47.3 ± 2.5	ab	49.6 ± 2.4	A
Etang Salé	37.6 ± 3.7	c	37.8 ± 2.9	C	57.5 ± 1.9	b	64.3 ± 2.1	B	66.2 ± 1.1	c	69.6 ± 2.8	B	64.1 ± 3.2	b	71.8 ± 2.1	B	76.5 ± 2.0	b	73.3 ± 2.7	B	40.8 ± 3.2	c	41.6 ± 2.2	B
Vue Belle	41.6 ± 2.9	b	NA	-	66.8 ± 3.3	a	NA	-	70.8 ± 1.3	a	NA	-	76.0 ± 2.4	a	NA	-	77.6 ± 1.8	ab	NA	-	46.6 ± 2.8	b	NA	-
Components																								
	41.5 ± 4.0	*c*	40.4 ± 3.5	*C*	64.0 ± 4.7	*b*	62.8 ± 3.5	*B*	69.2 ± 2.5	*ab*	68.8 ± 3.0	*AB*	72.3 ± 5.4	*ab*	70.1 ± 3.9	*AB*	77.6 ± 1.9	*a*	74.2 ± 2.5	*A*	45.8 ± 4.2	*c*	45.7 ± 4.5	*C*

Means with same statistical significance (Sig) letter (lower case for Plant crop, capitals for First ratoon and italic for components) are undifferentiated ($P < 0.05$) by Tukey's honest significant differences (HSD). ± indicates the standard deviation SD ($n = 12$ for cultivars and $n = 9$ for sites).

Table 4.5 Fraction of components fiber in hemicellulose (g $100g^{-1}$) on a dry matter basis of 3 cultivars (R570, R579 and R585) planted in 4 contrasted areas of La Reunion island (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle) and harvested in 2009-2010 (Plant crop) and 2010 (First ratoon).

	Fraction of components dry matter fiber in hemicellulose																					
	Millable stalk				Meristem				Green leaf blade				Green leaf sheath				Trash				Whole green cane			
	Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon	
	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig
Cultivars																								
R570	37.1 ± 1.7	b	37.5 ± 1.0	B	45.2 ± 1.9	b	45.3 ± 1.3	B	48.5 ± 2.1	c	48.2 ± 1.2	B	42.8 ± 1.4	c	43.3 ± 1.7	C	41.9 ± 1.3	c	41.9 ± 1.3	B	39.2 ± 1.5	b	39.5 ± 1.1	B
R579	40.2 ± 1.4	a	41.6 ± 1.0	A	48.2 ± 1.8	a	47.7 ± 1.7	A	50.4 ± 1.4	a	49.2 ± 1.2	A	47.5 ± 1.7	a	47.7 ± 2.0	A	44.3 ± 1.2	a	44.1 ± 1.2	A	41.5 ± 1.2	a	42.4 ± 0.6	A
R585	38.0 ± 1.1	b	39.7 ± 1.5	B	48.5 ± 1.7	a	47.6 ± 1.4	A	49.4 ± 1.3	b	49.0 ± 1.6	A	46.0 ± 1.7	b	46.6 ± 1.2	B	43.5 ± 1.1	b	43.7 ± 0.7	A	39.7 ± 1.0	b	41.1 ± 1.6	B
Sites																								
La Mare	37.2 ± 1.8	b	38.8 ± 1.8	B	45.3 ± 1.9	c	48.7 ± 1.5	A	47.2 ± 1.6	b	49.7 ± 0.7	A	44.5 ± 1.7	bc	47.9 ± 2.3	A	42.3 ± 0.7	c	43.6 ± 1.1	A	38.4 ± 1.3	b	40.5 ± 1.5	B
Menciol	38.4 ± 1.6	ab	40.1 ± 2.2	AB	46.9 ± 1.7	b	46.1 ± 1.0	B	50.2 ± 0.9	a	47.6 ± 0.9	B	45.3 ± 2.5	bc	44.7 ± 2.2	A	42.6 ± 1.6	bc	43.0 ± 1.1	A	40.7 ± 1.1	a	42.2 ± 1.3	A
Etang Salé	39.5 ± 1.8	a	39.9 ± 2.1	A	49.4 ± 1.6	a	45.8 ± 1.3	C	50.1 ± 0.9	a	49.1 ± 1.5	B	47.7 ± 2.2	a	45.1 ± 1.8	B	44.6 ± 1.0	a	43.1 ± 2.0	B	40.7 ± 1.3	a	40.4 ± 1.6	A
Vue Belle	38.5 ± 1.8	ab	NA	-	47.6 ± 2.1	b	NA	-	50.2 ± 1.6	a	NA	-	44.4 ± 2.4	c	NA		43.4 ± 1.6	b	NA	-	40.7 ± 1.4	a	NA	-
Components																								
	38.4 ± 1.9	*c*	39.6 ± 2.1	*C*	47.3 ± 2.3	*ab*	46.9 ± 1.8	*AB*	49.4 ± 1.8	*a*	48.8 ± 1.4	*A*	45.5 ± 2.5	*ab*	45.9 ± 2.5	*AB*	43.2 ± 1.5	*bc*	43.2 ± 1.4	*BC*	40.1 ± 1.6	*c*	41.0 ± 1.6	*C*

Means with same statistical significance (Sig) letter (lower case for Plant crop, capitals for First ratoon and italic for components) are undifferentiated ($P < 0.05$) by Tukey's honest significant differences (HSD). ± indicates the Standard deviation SD ($n = 12$ for cultivars and $n = 9$ for sites).

Table 4.6 Fraction of components fiber in cellulose (g $100g^{-1}$) on a dry matter basis of 3 cultivars (R570, R579 and R585) planted in 4 contrasted areas of La Reunion island (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle) and harvested in 2009-2010 (Plant crop) and 2010 (First ratoon).

	Fraction of components dry matter fiber in cellulose																					
	Millable stalk				Meristem				Green leaf blade				Green leaf sheath				Trash				Whole green cane			
	Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon	
	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig
Cultivars																								
R570	51.0 ± 1.3	a	50.1 ± 0.6	A	47.2 ± 2.2	a	46.5 ± 2.7	A	45.1 ± 2.0	a	44.4 ± 1.7	A	46.7 ± 0.9	a	46.2 ± 1.4	A	48.5 ± 0.9	a	47.1 ± 0.7	A	48.9 ± 1.3	a	47.9 ± 0.3	A
R579	49.0 ± 0.9	b	47.8 ± 0.7	B	45.4 ± 2.1	b	45.4 ± 2.5	B	44.1 ± 1.5	b	43.8 ± 1.4	B	45.2 ± 1.2	b	44.3 ± 1.4	B	47.7 ± 1.0	b	46.5 ± 0.9	AB	47.1 ± 1.0	b	45.7 ± 0.6	B
R585	50.6 ± 1.0	a	49.3 ± 0.7	A	44.5 ± 1.9	b	44.9 ± 2.3	C	44.7 ± 1.4	ab	43.7 ± 1.5	B	44.2 ± 1.0	c	43.0 ± 1.0	C	47.2 ± 0.7	b	45.6 ± 0.9	B	48.8 ± 1.1	a	46.9 ± 0.7	A
Sites																								
La Mare	51.4 ± 1.2	a	49.7 ± 1.1	A	47.9 ± 2.0	a	42.4 ± 0.7	C	46.9 ± 1.2	a	42.8 ± 0.6	C	46.4 ± 1.2	a	43.3 ± 1.5	B	48.4 ± 1.1	a	46.8 ± 0.6	A	49.5 ± 1.3	a	46.7 ± 1.0	B
Menciol	49.8 ± 1.1	b	48.9 ± 1.0	B	45.6 ± 1.4	b	47.3 ± 1.1	A	43.6 ± 0.8	b	45.1 ± 1.0	A	45.1 ± 1.3	bc	45.1 ± 2.0	A	47.9 ± 1.1	ab	46.2 ± 1.0	AB	48.0 ± 0.9	b	47.0 ± 0.9	A
Etang Salé	49.5 ± 1.3	b	48.7 ± 1.3	B	43.9 ± 1.2	b	47.0 ± 1.4	B	44.4 ± 0.5	b	43.9 ± 1.8	B	44.3 ± 1.2	c	45.1 ± 1.3	A	47.4 ± 0.6	b	46.3 ± 1.3	B	47.5 ± 1.2	b	46.9 ± 1.3	A
Vue Belle	50.1 ± 1.3	b	NA	-	45.5 ± 2.7	b	NA	-	43.6 ± 1.3	b	NA	-	45.6 ± 1.3	ab	NA	-	47.5 ± 0.9	ab	NA	-	48.1 ± 1.4	b	NA	-
Components																								
	50.2 ± 1.4	*a*	49.1 ± 1.2	*A*	45.7 ± 2.3	*ab*	45.6 ± 2.5	*AB*	44.6 ± 1.7	*ab*	44.0 ± 1.5	*AB*	45.4 ± 1.5	*ab*	44.5 ± 1.8	*AB*	47.8 ± 1.0	*ab*	46.4 ± 1.0	*AB*	48.3 ± 1.4	*ab*	46.9 ± 1.1	*AB*

Means with same statistical significance (Sig) letter (lower case for Plant crop, capitals for First ratoon and italic for components) are undifferentiated ($P < 0.05$) by Tukey's honest significant differences (HSD). ± indicates the Standard deviation SD ($n = 12$ for cultivars and $n = 9$ for sites).

Table 4.7 Fraction of components fiber in lignin (g $100g^{-1}$) on a dry matter basis of 3 cultivars (R570, R579 and R585) planted in 4 contrasted areas of La Reunion island (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle) and harvested in 2009-2010 (Plant crop) and 2010 (First ratoon).

	Fraction of components dry matter fiber in lignin																					
	Millable stalk				Meristem				Green leaf blade				Green leaf sheath				Trash				Whole green cane			
	Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon	
	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig
Cultivars																								
R570	11.9 ± 0.5	a	12.4 ± 0.6	A	7.5 ± 0.7		8.1 ± 1.6	A	6.4 ± 0.6	a	7.4 ± 0.7	A	10.4 ± 0.9	a	10.5 ± 1.0	A	9.6 ± 0.8	a	10.9 ± 0.9	A	10.5 ± 0.4	a	10.8 ± 0.7	A
R579	10.9 ± 0.6	b	10.6 ± 0.6	B	6.4 ± 1.0		7.0 ± 1.0	B	5.5 ± 0.5	b	7.0 ± 0.7	B	7.3 ± 0.7	b	8.0 ± 0.7	B	8.1 ± 0.7	b	9.4 ± 0.6	B	9.6 ± 0.5	b	9.4 ± 0.6	B
R585	11.5 ± 0.9	ab	11.0 ± 1.0	AB	7.0 ± 1.3		7.6 ± 1.1	AB	5.9 ± 0.8	ab	7.4 ± 0.6	B	9.9 ± 1.3	a	10.3 ± 0.9	A	9.3 ± 0.7	a	10.7 ± 0.7	A	10.4 ± 0.7	a	10.0 ± 0.8	A
Sites																								
La Mare	11.5 ± 0.6	ab	11.5 ± 0.9	AB	6.8 ± 0.8		8.9 ± 1.0		5.9 ± 0.7		7.5 ± 0.7		9.1 ± 1.2	b	8.9 ± 1.4	A	9.3 ± 0.8	a	9.6 ± 0.7	A	10.2 ± 0.6		10.3 ± 0.8	AB
Menciol	11.9 ± 0.7	a	11.0 ± 1.3	B	7.5 ± 0.5		6.6 ± 0.4		6.2 ± 0.7		7.2 ± 0.7		9.6 ± 2.1	ab	10.2 ± 1.5	A	9.5 ± 0.9	a	10.8 ± 0.8	A	10.5 ± 0.5		9.5 ± 0.8	B
Etang Salé	10.9 ± 0.5	b	11.5 ± 1.0	A	6.7 ± 1.5		7.1 ± 1.1		5.5 ± 0.6		7.0 ± 0.5		8.0 ± 1.4	c	9.7 ± 1.2	B	8.0 ± 0.6	b	10.6 ± 1.1	B	9.8 ± 0.6		10.3 ± 0.9	A
Vue Belle	11.4 ± 1.0	ab	NA	-	6.9 ± 1.5		NA		6.2 ± 0.7		NA		10.0 ± 1.6	a	NA	-	9.1 ± 0.9	a	NA	-	10.1 ± 0.8		NA	-
Components																								
	11.4 ± 0.8	*a*	11.3 ± 1.1	*A*	7.0 ± 1.1	*b*	7.6 ± 1.3	*B*	5.9 ± 0.7	*b*	7.2 ± 0.7	*B*	9.2 ± 1.7	*ab*	9.6 ± 1.4	*AB*	9.0 ± 1.0	*ab*	10.3 ± 1.0	*AB*	10.1 ± 0.7	*ab*	10.1 ± 0.9	*AB*

Means with same statistical significance (Sig) letter (lower case for Plant crop, capitals for First ratoon and italic for components) are undifferentiated ($P < 0.05$) by Tukey's honest significant differences (HSD). ± indicates the Standard deviation SD ($n = 12$ for cultivars and $n = 9$ for sites).

Table 4.8 Low heating value LHV (MJ kg^{-1}) of components fiber for 3 cultivars (R570, R579 and R585) planted in 4 contrasted areas of La Reunion island (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle) and harvested in 2009-2010 (Plant crop) and 2010 (First ratoon).

	Low heating value LHV of components fiber																					
	Millable stalk				Meristem				Green leaf blade				Green leaf sheath				Trash				Whole green cane			
	Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon		Plant crop		First ratoon	
	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig	Mean ± SD	Sig
Cultivars																								
R570	17.748 ± 0.05	a	17.787 ± 0.1	A	17.363 ± 0.1		17.416 ± 0.1	A	17.266 ± 0.1	a	17.351 ± 0.1	A	17.619 ± 0.1	a	17.622 ± 0.1	A	17.542 ± 0.1	a	17.661 ± 0.1	A	17.671 ± 0.03	a	17.704 ± 0.1	A
R579	17.657 ± 0.05	b	17.630 ± 0.1	B	17.262 ± 0.1		17.312 ± 0.1	B	17.184 ± 0.04	b	17.313 ± 0.1	B	17.339 ± 0.1	b	17.405 ± 0.1	B	17.409 ± 0.1	b	17.528 ± 0.05	B	17.594 ± 0.04	b	17.575 ± 0.1	B
R585	17.707 ± 0.1	ab	17.669 ± 0.1	AB	17.315 ± 0.1		17.365 ± 0.1	AB	17.220 ± 0.1	ab	17.348 ± 0.1	B	17.569 ± 0.1	a	17.607 ± 0.1	A	17.518 ± 0.1	a	17.639 ± 0.1	A	17.646 ± 0.1	a	17.618 ± 0.1	A
Sites																								
La Mare	17.709 ± 0.1	ab	17.710 ± 0.1	AB	17.299 ± 0.1		17.483 ± 0.1		17.219 ± 0.1		17.358 ± 0.1		17.503 ± 0.1	b	17.480 ± 0.1	A	17.516 ± 0.1	a	17.545 ± 0.1	A	17.643 ± 0.1		17.654 ± 0.1	AB
Menciol	17.744 ± 0.1	a	17.666 ± 0.1	A	17.357 ± 0.05		17.284 ± 0.04		17.246 ± 0.1		17.337 ± 0.1		17.546 ± 0.2	ab	17.598 ± 0.1	A	17.538 ± 0.1	a	17.649 ± 0.1	A	17.666 ± 0.04		17.582 ± 0.1	B
Etang Salé	17.662 ± 0.05	b	17.710 ± 0.1	B	17.293 ± 0.1		17.327 ± 0.1		17.185 ± 0.1		17.317 ± 0.05		17.406 ± 0.1	c	17.555 ± 0.1	B	17.403 ± 0.1	b	17.634 ± 0.1	B	17.608 ± 0.05		17.662 ± 0.1	A
Vue Belle	17.701 ± 0.1	ab	NA	-	17.306 ± 0.1		NA		17.245 ± 0.1		NA		17.581 ± 0.1	a	NA	-	17.502 ± 0.1	a	NA	-	17.631 ± 0.1		NA	-
Components																								
	17,704 ± 0.1	*a*	17,695 ± 0.1	*A*	17.313 ± 0.1	*d*	17.365 ± 0.1	*D*	17.223 ± 0.1	*e*	17.337 ± 0.1	*E*	17.509 ± 0.2	*c*	17.545 ± 0.1	*C*	17.490 ± 0.1	*c*	17.609 ± 0.1	*C*	17.637 ± 0.2	*b*	17.632 ± 0.1	*B*

Means with same statistical significance (Sig) letter (lower case for Plant crop, capitals for First ratoon and italic for components) are undifferentiated ($P < 0.05$) by Tukey's honest significant differences (HSD). ± indicates the Standard deviation SD ($n = 12$ for cultivars and $n = 9$ for sites).

4.3.3.3. Partitioning of components fiber in lignocellulosic compounds (LCCij)

4.3.3.3.1. Hemicellulose

Table 4.5 lists on average value of fractions of components fiber in hemicellulose (g $100g^{-1}$ means g dry matter of component hemicellulose per 100g dry matter of component fiber) on a dry matter basis. There were significant cultivars*sites interactions for GB and TR hemicellulose. Cultivars and sites differed in each crop cycle for components hemicellulose.

Cultivars - R579 has on average the highest fraction of components fiber in hemicellulose and R570 has the lowest. On average the distribution of the cultivars for fraction of all components fiber in hemicellulose was ordered as follow R579 ≥ R585 ≥ R570. There were significant differences in each crop cycle between R579 and R585 for MS, GB and TR but except in R1 for GS and WGC hemicellulose.

Sites - Etang Salé was significantly higher in each crop cycle for MS hemicellulose than the other sites. There were no differences between Menciol and Vue Belle for the fractions of components fiber in hemicellulose. On average the distribution of the sites for PC fraction of components fiber in hemicellulose was Etang Salé ≥ Vue Belle ≥ Menciol ≥ La Mare and in reverse order for R1. Etang Salé was on average higher for PC meristem (49.4 g $100g^{-1}$), GB (50.1 g $100g^{-1}$), GS (47.7 g $100g^{-1}$) and TR hemicellulose (44.6 g $100g^{-1}$) than the other sites. While La Mare was on average higher in R1 for TS (48.7 g $100g^{-1}$), GB (49.7 g $100g^{-1}$), GS (47.9 g $100g^{-1}$) and TR hemicellulose (43.6 g $100g^{-1}$) than the other sites. In PC Etang Salé, Vue belle and La Mare differed for TR hemicellulose (44.6, 43.4 and 42.3 g $100g^{-1}$ respectively) and Menciol was similar to those two last sites.

Components - On average the distribution for fraction of components fiber in hemicellulose were order as follow GB > TS > GS > TR > MS. Fraction of components fiber in hemicellulose tended to increase from MS (mean was 38.9 g $100g^{-1}$) to WGC (mean was 41.0 g $100g^{-1}$). Even if significant differences were found for cultivars and sites, there relative standard deviations remained low. However differences between components hemicellulose exist e.g. we noted that GB (50.4 g $100g^{-1}$ for PC R579) present until 33 % more hemicellulose than MS (38.0 g $100g^{-1}$ for plant crop R585).

4.3.3.3.2. Cellulose

Table 4.6 lists on average value of fraction of components fiber in cellulose (g $100g^{-1}$ means g dry matter of component cellulose per 100 g dry matter of component fiber) on a dry matter basis. There were no significant cultivars*sites interactions for fraction of components fiber in

cellulose. Cultivars and sites differed each crop cycle for fraction of components fiber in cellulose.

Cultivars - On average the distribution of the cultivars for fractions of MS and WGC fiber in cellulose were ordered as follow R570 ≥ R585 > R579 and for TS, GB, GS and TR cellulose as follow R570 > R579 ≥ R585. R579 was significantly lower in each crop cycle for MS (49.0 and 47.8 g $100g^{-1}$ respectively) and WGC (47.1 and 45.7 g $100g^{-1}$ respectively) cellulose than the other cultivars. R570 was on average higher in each crop cycle for components cellulose than the other cultivars. R585 was on average lower in each crop cycle for TS, GB, GS and TR cellulose than the other cultivars.

Sites - La Mare was significantly higher in each crop cycle for MS cellulose (51.4 and 49.7 g $100g^{-1}$ respectively) than the other sites. La Mare was also significantly higher (49.5 g $100g^{-1}$) in PC but lower (46.7 g $100g^{-1}$) in R1 than the other sites for WGC cellulose. In PC La Mare was also on average higher for TS, GB and GS cellulose than the other sites and in R1 it was the opposite. TS and GB cellulose of Menciol, Etang Salé and Vue Belle were similar for PC and differed between sites for R1.

Components - On average the distribution for fraction of components fiber in cellulose were order as follow MS > TR > TS ≥ GS ≥ GB. Fraction of components fiber in cellulose tended to decrease each crop cycle from MS (51.7 and 50.6 g $100g^{-1}$ respectively) to WGC (49.2 and 47.9 g $100g^{-1}$ respectively) but there were no significant differences between both components. There were low relative standard deviations between components cellulose although MS present until 8% more cellulose than GS.

4.3.3.3.3. Lignin

Table 4.7 lists on average value of fraction of components fiber in lignin (g $100g^{-1}$ means g dry matter of component lignin per 100 g dry matter of component fiber) on a dry matter basis. There were no significant cultivars*sites interactions for fraction of components fiber in lignin. Cultivars differed each crop cycle for fraction of components fiber in lignin excepted in R1 for meristem.

Cultivars - R570 was on average higher than the other cultivars for all components lignin (R570 ≥ R585 ≥ R579). R570 was significantly higher in each crop cycle than R579 for MS and WGC lignin (11.9 against 10.9 g $100g^{-1}$ in plant crop and 12.4 against 10.6 g $100g^{-1}$ in first ratoon). R570 and R585 were both higher in each crop cycle for GS, TR and WGC lignin than R579. There were no significant differences between cultivars for TS lignin in PC (range

was 6.4 g $100g^{-1}$ for R579 to 7.5 g $100g^{-1}$ for R570) while R570 was significantly higher than R579 in R1.

Sites - Menciol was significantly higher than Etang Salé for MS lignin in PC (11.9 and 10.9 g $100g^{-1}$ respectively) and the other sites were similar to both. In R1 Menciol was lower than Etang Salé for MS lignin (11.0 and 11.5 g $100g^{-1}$ respectively) and they were both similar to La Mare. There were no differences in WGC lignin between sites for PC (range was 9.8 g $100g^{-1}$ for Etang Salé to 10.5g $100g^{-1}$ for Menciol). There were no significant differences between sites for TS (range was 6.6 g $100g^{-1}$ for R1 of Menciol to 8.9 g $100g^{-1}$ for R1 of La Mare) and GB lignin (range was 5.5 g $100g^{-1}$ for PC of Etang Salé to 7.5 g $100g^{-1}$ for R1 of La Mare). Etang Salé was significantly lower in each crop cycle for GS (8.0 and 9.7 g $100g^{-1}$ respectively) and TR lignin (8.0 and 10.6 g $100g^{-1}$respectively) than the other sites.

Components - On average the distribution for fraction of components fiber in lignin was order as follow MS ≥ TR ≥ GS ≥ TS ≥ GB. Fraction of components fiber in lignin tended to decrease from MS (mean was 9.8 g $100g^{-1}$) to WGC (mean was 8.6 g $100g^{-1}$). There were low relative standard deviations between components lignin excepted for MS, which present the highest fraction with on average 5% more lignin than GB.

4.3.4. Dry aboveground biomass – energy

4.3.4.1. Low heating value of components fiber (LHV)

Table 4.8 lists low heating value LHV of components fiber (MJ kg^{-1} means MJ per kg of component fiber) on a dry matter basis. In spite of significant differences in each crop cycle between cultivars and sites for components LHV, values are very closest and given that the standard deviation were very low. There were no significant cultivars*sites interactions for LHV.

Cultivars - R570 was on average higher for components LHV than R579 and globally similar to R585 (R570 ≥ R585 ≥ R579).

Sites - Sites differed each crop cycle for MS, GS, TR and whole green cane LHV. Menciol was higher than Etang Salé each crop cycle for millable stalk LHV (17.662 and 17.710 MJ kg^{-1} respectively). Menciol and Etang Salé differed and La Mare and Vue Belle were similar to both for millable stalk LHV each crop cycle. Etang Salé was significantly lower each crop cycle for GS and trash LHV than the other sites. La Mare was similar each crop cycle to Menciol for GS (range was 17,480 MJ kg^{-1} for R1 La Mare to 17,598 MJ kg^{-1} for R1 Menciol), TR (range was 17,516 MJ kg^{-1} for La Mare PC to 17,649 MJ kg^{-1} for Menciol R1)

and whole green cane LHV (range was 17,582 MJ kg^{-1} for Menciol R1 to 17,666 MJ kg^{-1} for Menciol PC).

Components - On average the distribution for components LHV was order as follow MS > TR ≥ GS > GB > TS. Components LHV tended to decrease from MS (mean was 17.570 MJ kg^{-1}) to WGC (mean was 17.500 MJ kg^{-1}). Even if there were significant differences between components LHV there relative standard deviations remained low (range was 17.586 MJ kg^{-1} for R1 millable stalk to 17.209 MJ kg^{-1} for R1 meristem).

4.3.4.2. Energetic potential (Ep)

Figure 4.3 shows the energetic potential Ep (MJ m^{-2} y^{-1}) of MS, WGC and TR. There were significant differences in each crop cycle between cultivars and sites for MS, WGC and TR energetic potential. There were no significant cultivars*sites interactions for MS, WGC and TR energetic potential.

Cultivars - R585 was on average higher each crop cycle than the other cultivars for MS (51.0 and 46.4 MJ m^{-2} y^{-1} respectively) and WGC energetic potential (66.5 and 68.6 MJ m^{-2} y^{-1} respectively). On average the distribution of the cultivars for MS, WGC and TR energetic potential was order as follow R585 ≥ R570 ≥ R579. Compared to R579, R585 lead to increasing 33 and 30 % in PC and, 36 and 38 % in R1 for MS and WGC energetic potential respectively. R570 did not differ to R585 for TR energetic potential (range was 18.7 MJ m^{-2} y^{-1} in R1 for R585 to 21.9 MJ m^{-2} y^{-1} in R1 for 570). R579 was significantly lower each crop cycles than the other cultivars for TR energetic potential (11.3 and 14.4 MJ m^{-2} y^{-1} respectively).

Sites - La Mare was on average higher than the other sites. On average the distribution of the sites for MS, WGC and TR energetic potential was order as follow La Mare ≥ Vue Belle ≥ Etang Salé ≥ Menciol. In PC, there were no significant differences between sites for WGC (range was 49.7MJ m^{-2} y^{-1} for Menciol to 65.8MJ m^{-2} y^{-1} for La Mare) while there were significant differences between sites for MS energetic potential. In R1 La Mare was significantly higher than the other sites for MS (45.9 MJ m^{-2} y^{-1}) and WGC energetic potential (66.7 MJ m^{-2} y^{-1}).

Components - Energetic potential tended to increase from MS (mean was 30.9 MJ m^{-2} y^{-1}) to WGC (mean was 48.5 MJ m^{-2} y^{-1}) of roughly 57%. If we now taking into account in the balance TR energetic potential (mean was 11.7 MJ m^{-2} y^{-1}) this could lead of a rise of 24% compared to WGC and of 95% compared to MS. That means that energetic potential of

residual biomass fiber (TS, GB, GS and TR) represent roughly 50% of the annual energetic potential of a sugarcane crop.

4.4. DISCUSSIONS

4.4.1. Variability of yield

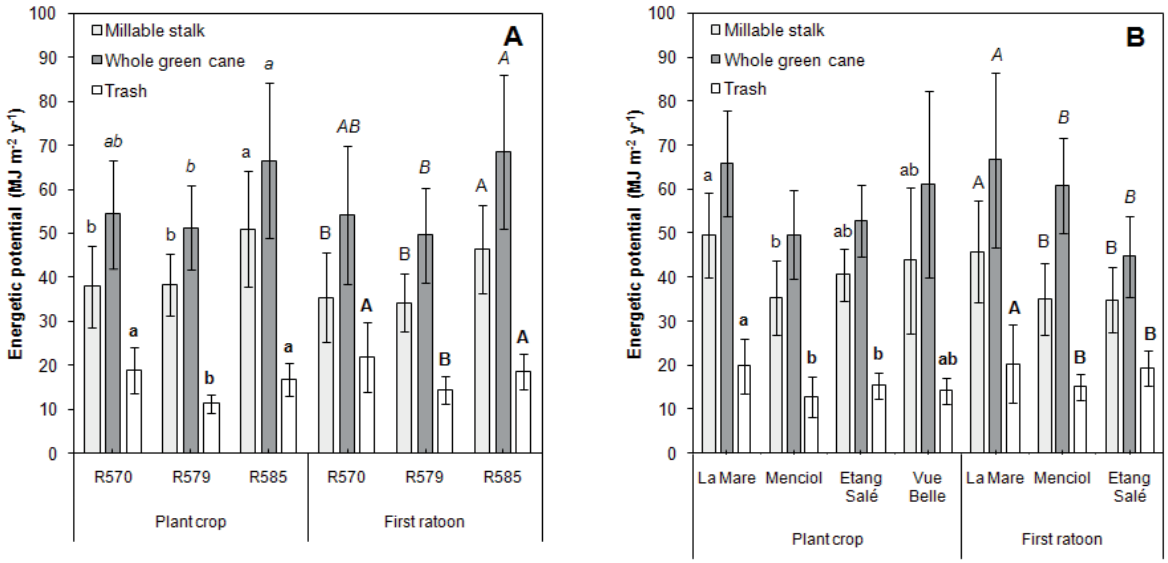
The results show that there are no significant differences between sites for dAB in PC while dAB of La Mare and Etang Salé differed significantly in R1. Differences between dAB in R1 were likely due to the higher water stress in Etang Salé (Table 4.1) because cycle duration, radiation and air temperature were similar for both sites. Indeed, water deficit is certainly the most important limiting factor to reach high dAB (Inman-Bamber et al., 2002; Singels et al., 2002). The results also show that cycles duration could be an option to increase dAB and to compensate poorest growth climatologic conditions (e.g. in Menciol and Vue Belle). Postponing of harvest becomes *de facto* an interesting alternative to ensure a year-round stabilized supply of biomass in the consuming industry (Paturau, 1982) especially when crops areas present contrasted climatological conditions. Choice of cultivars appears to be a fastest way to increase dAB. Even if there were no significant differences between cultivars for dAB and MS nonstructural carbohydrates yields, the cultivar R585 was on average higher than the others.

4.4.2. Variability of energetic quality characteristics of components

At harvest, fractions of aboveground biomass in components were highly contrasted (Table 4.3). MS represents the main fraction of dAB at harvest (range was 61,5 to 75,6%) as currently observed by several authors (Bamber et al., 2002; Singels et al., 2005) and TR is the second main fraction (range was 11,4 to 19,9%). Fractions of components in fiber were highly contrasted between components at harvest (Table 4.4). Fraction of MS in fiber presents the highest variability with a relative standard deviation of roughly 10%. TR has the highest fiber content (range was 72,2 to 79,1%) and MS the lower (range was 37,6 to 45,0%). Fractions of components fiber in lignocellulosic compounds were of low variability for components at harvest (Table 4.5, 4.6 and 4.7). GB has the highest fraction of fiber in hemicellulose (range was 47,2 to 50,2%) as showed by Burner et al. (Burner et al., 2008) and MS has the lowest (range was 37,1 to 41,6%). Cellulose has the lowest variability between components at harvest. MS has the highest fraction of fiber in cellulose (range was 47,8 to 51,4%) and the others components (TS, GB, GS and TR) present very closest fraction of fiber in cellulose

(range was 42,8 to 48,5%). Lignin has the highest variability between components at harvest. MS has the highest fraction of fiber in lignin (range was 10,6 to 12,4%) and TS has the lowest (range was 5,5 to 7,5%). Low heating values of components fiber (LHV) were of low variability between components (Burner et al., 2008). MS has the highest LHV (range was 17,630 to 17,687 MJ kg^{-1}) and GB has the lowest (range was 17,184 to 17,358 MJ kg^{-1}). These results were comparable to reported values (17,5 and 17,3 MJ kg^{-1} for sugarcane stem and leaf) given by Burner et al. (Burner et al., 2008) and confirmed that LHV differed little between components except leaves as previously showed by Don et al., (42 Don et al., 1977).

Figure 4.4 Energetic potential Ep (MJ m^{-2} y^{-1}) of millable stalk, whole green cane and Trash for 3 cultivars (R570, R579 and R585) planted in 4 locations of La Reunion island (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle) and harvested at the end of two crop cycles 2009-2010 (Plant crop) and 2010 (First ratoon).



Large bars with same letter (lower case for Plant crop, capitals for First ratoon, italic for whole green cane and bold for trash) are undifferentiated ($P < 0.05$) by Tukey's honest significant difference (HSD). Narrow bars that are on top of large bars represent standard deviation ($n = 12$ for cultivars and $n = 9$ for sites).

4.4.3. Factors affecting energy characteristics and energetic potential (Ep)?

Energy characteristics of dAB components and energetic potential varies significantly between sites, cultivars and method of harvest (Figure 4.4).

4.4.3.1. Sites and cultivars

Results show that fractions of dAB in MS (Martiné et al., 1999) and TR were similar between sites. However, we noted that Etang Salé (high water stress) has on average the higher fraction of dAB in MS than the others sites. As showed by several authors (Inman-Bamber et al., 2002; Singels et al., 2005), water stress induces accumulation of sucrose in MS. Indeed, Ebrahim (Ebrahim, 1998) showed before them that water deficit affects expansive growth before photosynthesis and it results from that a preferential accumulation of sucrose in MS and so a rise of the fraction of dAB in MS. The others fraction of dAB (TS, GB and GS) seems to be more sensible to climate and practices because we observed significant differences between sites. We noted also that fractions of dAB in MS, TS and TR differed between cultivars at harvest.

Results show that fractions of components in fiber differed between sites. Fraction of MS in fiber was higher when favorable climatological conditions for optimal growth occurred (e.g. La Mare) while they were lower when stress occurred (e.g. Etang Salé) in particular water stress (Martiné et al., 2001; Bamber et al., 2002; Singels et al., 2002). Results also show that fractions of components in fiber differed between cultivars as observed on a wide range of genotypes (De Andrade et al., 2003).

Even if the results show significant differences between sites and cultivars for fractions of components fiber in lignocellulosic compounds and LHV, there relative standard deviations remained low. Burner et al., (Burner et al., 2008) confirmed this low variability and found no significant differences between two sugarcane F1 hybrids for cellulose in leaves and stem, and this is the case for LHV.

Results show that there were significant differences between cultivars and sites for energetic potential of MS, WGC and TR. On average the distribution of sites and cultivars for MS, WGC and TR energetic potential was order as follow La Mare ≥ Vue Belle ≥ Etang Salé ≥ Menciol (Figure 4.4 B), and as follow R585 ≥ R570 ≥ R579 (Figure 4.4 A).

4.4.3.2. Methods of harvest

Method of harvest is one of most important factor for maximizing energetic potential. Results show that energetic potential could be rise of 57 % from MS to WGC (Figure 4.4). Energetic potential of residual biomass (TS, GB, GS and TR) represent roughly 50% of the annual energetic potential of a sugarcane crop.

Nevertheless, methods of harvest act on fiber content of biomass exported to the field. Indeed, there was on average a maximal rise of 16% of fiber content of the biomass harvested

between MS and WGC. Besides, the rise of fiber content could generated a decrease of recoverable sucrose from about 10 to 20 g sucrose kg^{-1} cane according the formulae given by Legendre (Legendre, 1992). It result that there is a real antagonism between sugar mill requests for proposal and multi-uses production objectives (sucrose/energy).

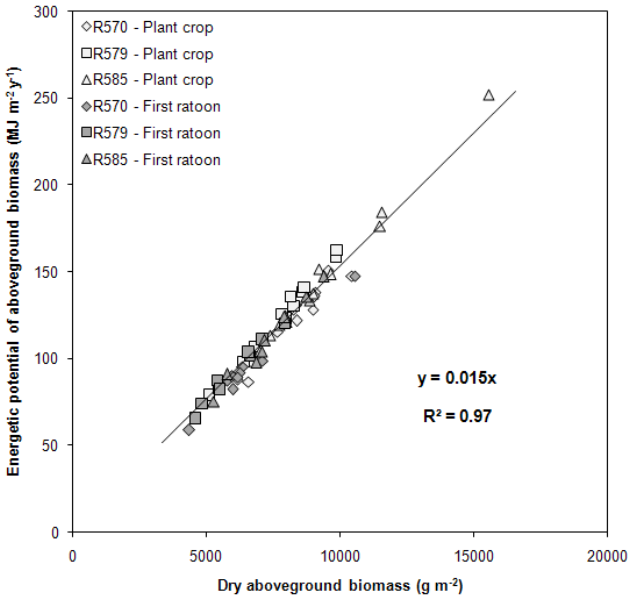
However, methods of harvest induce low variations of load content in lignocellulosic compounds. It appears that fractions of fiber in cellulose and lignin increase slightly to 2% and to 1% respectively from MS to WGC, and fraction of fiber in hemicellulose decrease slightly to 2% from MS to WGC.

Mechanized harvest areas are ceaselessly in expansion (Ripoli et al., 2000) and entail a rise of leaves, meristem and trash incorporated in the load hauled to the mill. As a consequence this makes decrease of recoverable sucrose but lead a rise of by-products amount (mainly bagasse) at the end of sugar mill process and so of the amount of energy production. Implementation of cleaning stations before the cane entering sugar extraction process could be a good alternative to make the load in accordance with sugar mill requests for proposal and to produce more by-products for energetic valuation (Hassuani et al., 2005). However, a cost-benefit analysis should be lead at first in order to estimate cost-effectiveness of the cleaning process.

4.4.3.3. Aboveground biomass yield

Figure 4.5 shows that even the differences in growing conditions between cultivars and sites, there was a very strong relationship between Ep and above ground biomass. However, Clarke and Giamalva, and Clarke and Keenliside, (Clarke and Giamalva, 1986; Clarke and Keenliside, 1986) showed that increase both sucrose mass and dAB is possible although, the production made is not always compatible with sugar mill processing because of fiber content level (Legendre, 1992).

Figure 4.5 Energetic potential Ep (MJ m^{-2} y^{-1}) of aboveground biomass fiber, aboveground biomass (g m^{-2}) and non structural carbohydrates (g m^{-2}) for 3 cultivars (R570, R579 and R585) planted in 4 locations of La Reunion island and harvested at the end of two crop cycles 2009-2010 (Plant crop) and 2010 (First ratoon).



4.5. CONCLUSION

Sugarcane cropping systems are exclusively optimized for sucrose production (Jackson, 2005). Thus, development and optimization of new cropping system for multi-uses production (sucrose/energy) are needed but required tools for decision-making support. Among these tools, use of ecophysiological growth models able to predict aboveground sucrose yield, biomass yield and its energy characteristics according to a wide range of strategies of production (cultivars, climate and practices) are of primary importance. Results of the current study provide valuable information on (i) variability of the aboveground biomass components in their energy characteristics and (ii) on how climate (especially water stress), cultivars and practices (methods of harvest) affect the energy characteristics of the aboveground biomass components and the energetic potential. These characteristics will be of great interest to optimize sugarcane cropping system for multi-uses production with a concomitantly focusing on sucrose and energetic valuation.

Acknowledgements

Special thanks to the technical staff of “eRcane” experimental station for the treatment of sugarcane stalk samples

4B. VARIABILITÉ DE LA RÉPARTITION EN COMPOSANTES ANATOMIQUES DE LA BIOMASSE AÉRIENNE ET DE LEUR TENEUR EN COMPOSÉS LIGNOCELLULOSIQUES AU COURS DU CYCLE DE CULTURE DANS LES DIFFÉRENTES SITUATIONS

4.6. PARTITION DE LA BIOMASSE AÉRIENNE VERS SES COMPOSANTES ANATOMIQUES

4.6.1. Partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable

Le taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable MS (Figure 4.1) **augmente significativement au cours du cycle** et de manière exponentielle, même si cela est peu visible à cause de prélèvements trop tard dans le cycle. Les MS exprimés en fonction de l'âge thermique de la tige usinable TTMS, atteignent un plateau à environ 6000 degrés jour. La somme de températures TTMS utilisée comme variable explicative est décrite dans le chapitre matériel et méthode (Tableau 2.1 éq. 1 et 2). Les MS ont une gamme de variation comprise entre 0,07 et 0,75 g g^{-1} et entre 0,07 et 0,73 g g^{-1} en vierge et en repousse respectivement. Les coefficients de variation (CV%) **pour les MS sont de 23% en vierge et 34% en repousse** (Annexe 1, Tableau 7.1). Bien que **les MS exprimés en fonction du nombre de jour après plantation ou de l'âge thermique de la plante diffèrent entre sites en vierge comme en repousse** (Martiné et al., 2003), l'utilisation de l'âge thermique de la tige usinable **TTMS permet de réduire fortement cette variabilité inter sites** (Annexe 2, Figure 7.1).

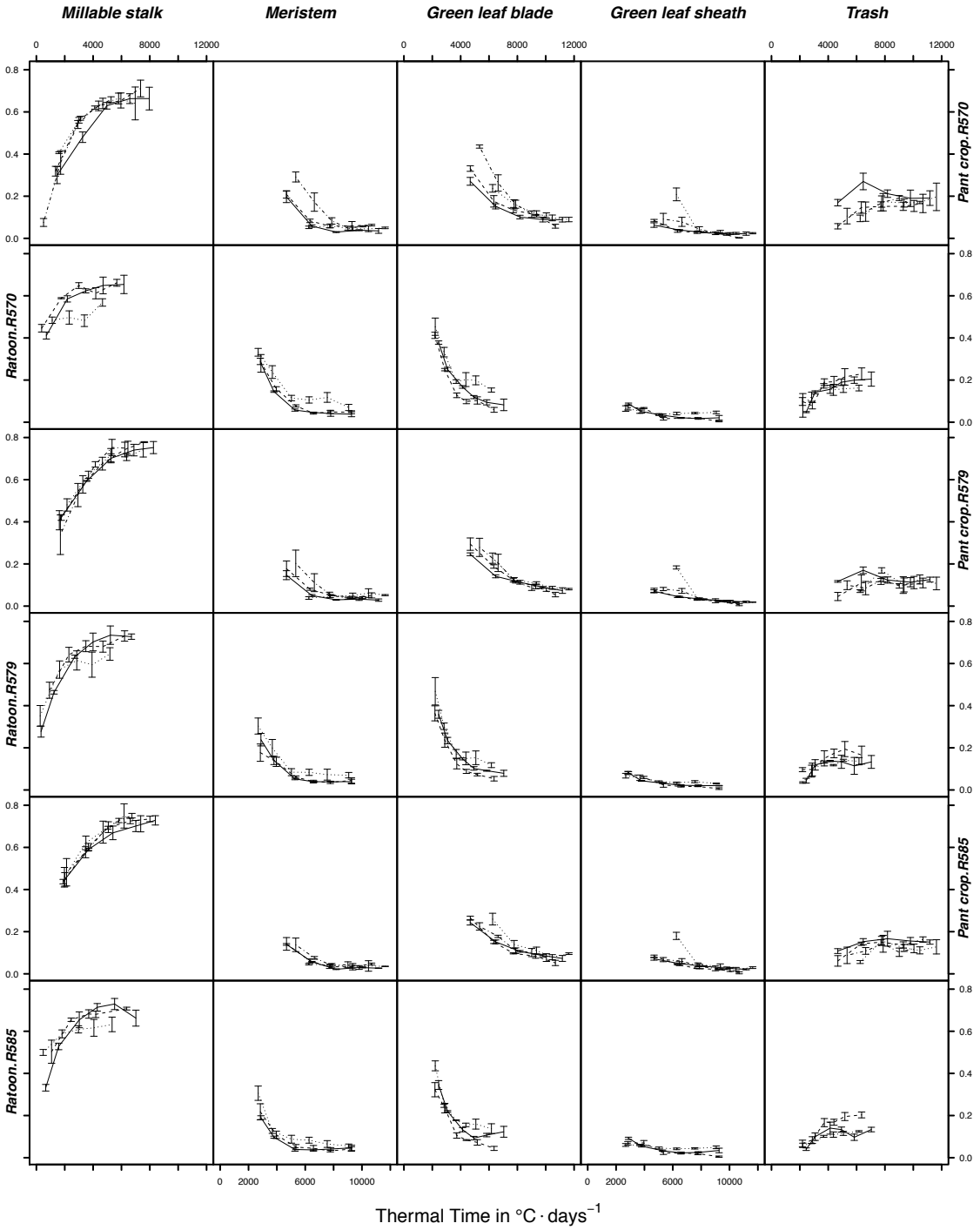
L**es cultivars diffèrent significativement pour les MS** et on observe une **interaction génotype*environnement (GE) significative en vierge** mais pas en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1). On observe en vierge pour le site de Vue Belle, à la première date d'échantillonnage (Figure 4.1), que le MS du cultivar R585 (0,43) est respectivement 2 et 7 fois supérieur à celui des cultivars R579 et R570 (0,25 et 0,06 respectivement). Cette différence peut être attribuée à la vitesse de germination des boutures à la plantation car celle-ci dépend fortement de la température et de l'humidité du sol (van Dillewijn, 1960 ; Clement, 1980). Toutefois, certains génotypes présentent une meilleure adaptation aux basses températures (Burner et al., 2008) et/ou aux stress hydriques notamment chez les variétés du genres *Saccharum spontaneum*. Il semble que ce soit le cas pour le cultivar R585.

4.6.2. Partition de la biomasse aérienne en biomasse des autres composantes anatomiques

Les taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de méristèmes, limbes et gaines (TS, GB et GS respectivement) **diminuent significativement au cours du cycle** et de manière exponentielle pour TS et GB, ce qui est peu visible à cause de prélèvements réalisés trop tard dans le cycle (Figure 4.1). Les TS, GS et GB atteignent un plateau à environ 6000, 6000 et 10000 degrés jour respectivement. Le taux de partition de la biomasse aérienne en feuilles mortes (TR) augmente sensiblement mais significativement au cours du cycle et atteint un plateau à environ 8000 degrés jours. Les TS, GB, GS et TR ont respectivement une gamme de variation comprise entre 0,02 et 0,29 g g^{-1} en vierge et entre 0,03 et 0,33 g g^{-1} en repousse, entre 0,05 et 0,44 g g^{-1} en vierge et entre 0,04 et 0,47 g g^{-1} en repousse, entre 0,002 et 0,21 g g^{-1} en vierge et entre 0,003 et 0,09 g g^{-1} en repousse, et entre 0,05 et 0,27 g g^{-1} en vierge et entre 0,04 et 0,23 g g^{-1} en repousse. Les **CV% sont élevés** et sont respectivement pour les TS, GB, GS et TR de 81% en vierge et 79% en repousse, de 55% en vierge et 60% en repousse, de 89% en vierge et 58% en repousse, et de 38% en vierge et en repousse(Annexe 1, Tableau 7.1).

Contrairement à la tige usinable, **l'utilisation de l'âge thermique de la plante TTAB comme variable explicative réduit faiblement la variabilité entre sites** (Annexe 2, Figure 7.2). Toutefois, les TS, GB, GS et TR **diffèrent de manières significatives entre sites en vierge** et seul TS et GS diffèrent significativement en repousse. On notera pour les TS et GB des cultivars R570 et R579 en vierge à Vue Belle, et pour les GS à Menciol que malgré l'utilisation de l'âge thermique la variabilité entre sites n'est pas réduite. A Vue belle l'essai a été traité à l'herbicide en début de cycle afin de maitriser l'enherbement. Or, le traitement herbicide a pour effet d'inhiber la croissance des plantes causant un retard de leur développement et donc un décalage avec les autres sites que le temps thermique ne peut expliquer. On constate cependant, que le traitement herbicide a peu d'effet sur le cultivar R585. Les tiges de ce cultivar étant certainement plus hautes que pour les autres cultivars, elles sont moins susceptibles d'être affectées par le traitement. De plus, il s'avère que des essais conduits au Cirad en 2011 ont montré que le cultivar R585 était peu sensible aux herbicides couramment utilisés sur canne (communication personnelle). Pour Menciol (Figure 4.1), lors du premier échantillonnage nous avons comptabilisé par erreur les gaines des feuilles vertes et les gaines adhérentes aux méristèmes, ce qui conduit à une augmentation des GS et une légère diminution des TS pour cette date.

Figure 4.1 Taux de partition de la biomasse aérienne dAB en ses composantes anatomiques Ci (MS = Millable stalk, TS = Meristem, GB = Green leaf blade, GS = Green leaf sheath et TR = Trash) en fonction du temps thermique (âge thermique de la tige usinable TTMS et âge thermique depuis la levée TTAB pour les autres composantes) pour trois cultivars (R570, R579 et R585) dans 4 sites contrastés (-La Mare, … Menciol, - - Le Gol et .-. Vue Belle) de l'île de la Réunion durant 2 cycles de cultures (Plant crop = vierge et Ratoon = repousse).



En vierge pour les TS et GB on note des **différences significatives entre les cultivars**, et pour GB uniquement, une interaction GE significative. En repousse pour les TS, GB, GS et TR il n'y a **pas de différences significatives entre les cultivars et pas d'interaction GE significative** (Annexe 1, Tableau 7.1).

4.7. PARTITION DES COMPOSANTES ANATOMIQUES VERS LA FIBRE

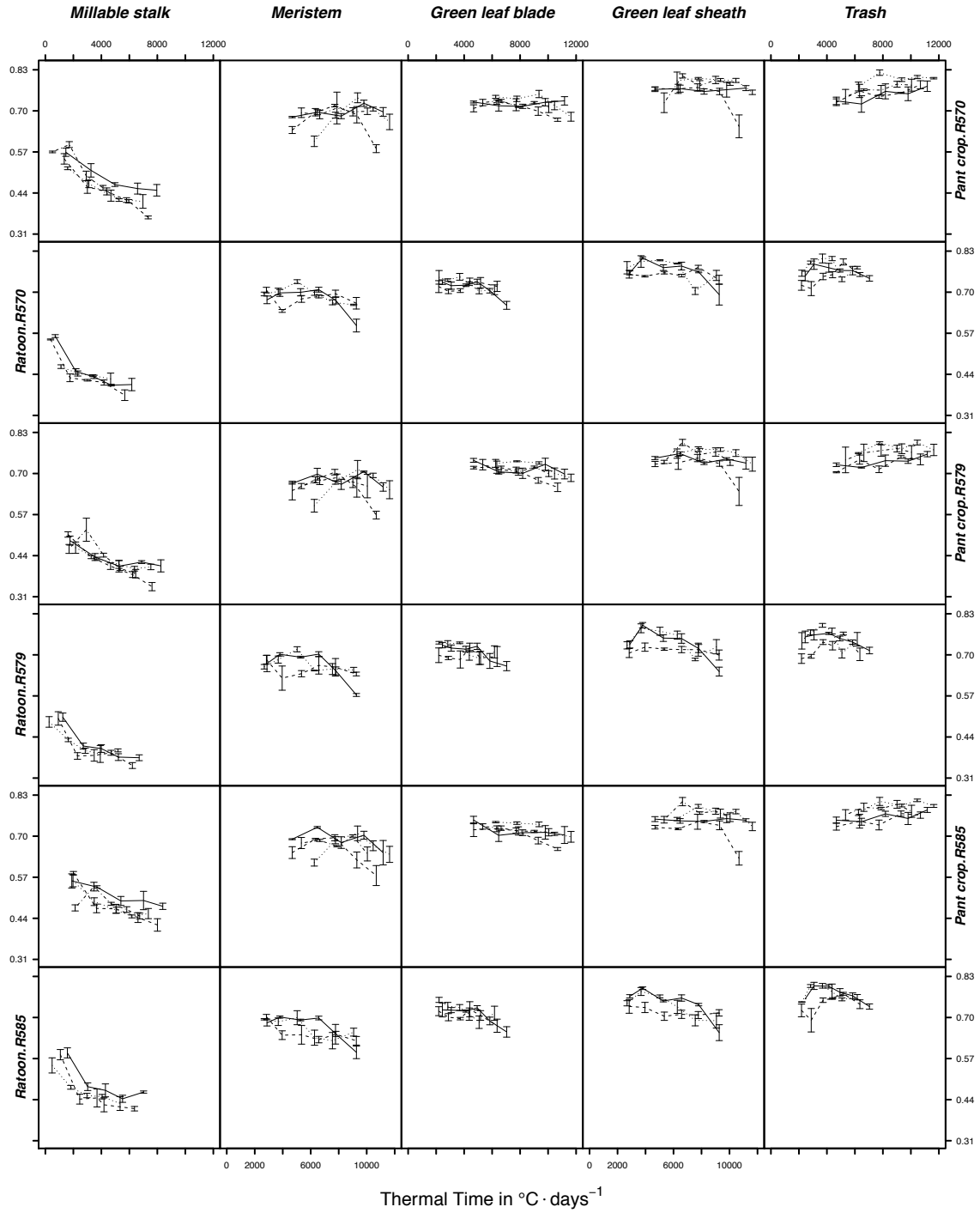
4.7.1. Partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre

Le taux de partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre NDFMS (Figure 4.2) **diminue significativement au cours du cycle** et de manière exponentielle pour atteindre un plateau à environ 6000 et 5000 degrés jour en vierge et en repousse respectivement. Les NDFMS présentent une gamme de variation comprise entre 0,34 et 0,58 g g^{-1}en vierge, et entre 0,35 et 0,59 g g^{-1} en repousse. Les **CV% sont de 13% en vierge et en repousse pour les MS** (Annexe 1, Tableau 7.1).

Le NDFMS **diffère de manière significative entre sites en vierge** (Annexe 1, Tableau 7.1). Une des explications est que les dates de plantation diffèrent entre sites en vierge (Annexe 2, Figure 7.2). En effet, la date de plantation joue un rôle important dans la vitesse de développement de la culture selon quelle est située en saison sèche et froide ou chaude et humide (Van Heerden et al., 2010). Cette hypothèse se confirme car **en repousse il n'y a pas de différences significatives entre sites** (dates de démarrage des cycles synchronisées). De plus, le **TTMS même s'il réduit l'effet site, ne semble donc pas être une variable explicative suffisante de NDFMS**. Parallèlement, en vierge, on constate que pour le site de Etang Salé les NDFMS sont toujours inférieurs aux autres sites (Figure 4.2). La conduite hydrique de l'essai situé à Etang Salé a généré des stress (cf. Chapitre 4A Tableau 4.1). **Les effets des stress hydriques et des températures de développement** (par rapport aux températures de croissance) ajoutés à TTAB **devraient pouvoir réduire l'effet site**.

On observe des **différences significatives entre les cultivars ainsi qu'une interaction GE significative** pour les NDFMS (Annexe 1, Tableau 7.1). Ces résultats confirment d'une part que les caractéristiques agronomiques des cultivars sont différentes notamment leurs NDFMS à la récolte (cf. Chapitre 4A, R585 > R570 > R579) et d'autre part que ces caractéristiques sont influencées par le climat et les pratiques de façon différente pour chaque cultivar. En effet, les NDFMS sont variables entre cultivars et présentent des valeurs qui oscillent entre 2 et 9 g $100g^{-1}$ selon qu'ils soient plantés à La Mare (régime hydrique au potentiel) ou à Etang Salé (stress hydrique) respectivement.

Figure 4.2 Taux de partition des composantes anatomiques Ci (MS = Millable stalk, TS = Meristem, GB = Green leaf blade, GS = Green leaf sheath et TR = Trash) en fibre NDFi en fonction du temps thermique (âge thermique de la tige usinable TTMS et âge thermique depuis la levée TTAB pour les autres composantes) pour trois cultivars (R570, R579 et R585) dans 4 sites contrastés (- La Mare, … Menciol, - - Le Gol et .-. Vue Belle) de l'île de la Réunion durant 2 cycles de cultures (Plant crop = vierge et Ratoon = repousse).



L'interaction GE résulte de l'exacerbation du caractère agronomique fibreux des cultivars R570 et R585 en condition hydrique satisfaisante, alors que le cultivar R579 aux caractéristiques sucrières (peu fibreux et forte richesse en sucre) y est moins sensible.

4.7.2. Partition de la biomasse des autres composantes anatomiques en biomasse de fibre

Les taux de partition des biomasses des Ci en biomasse de fibre (NDFTS, NDFGB, NDFGS et NDFTR) **diffèrent de manière significative au cours du cycle (effet âge) et entre sites** pour les deux cycles de cultures excepté pour les NDFTS en vierge et NDFTR en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1). Les NDFTS, NDFGB, NDFGS et NDFTR ne présentent **pas de différences significatives entre génotypes** pour les deux cycles de culture.

Les NDFTS croissent ou sont stables en début de cycle jusqu'à environ 6000 degrés jour (âge thermique de la plante TTAB), pour ensuite globalement décroître jusqu'en fin de cycle (Figure 4.2). La dynamique d'évolution décrite précédemment n'est cependant pas applicable à toutes nos combinaisons cycles/sites/cultivars. Les NDFTS ont respectivement une gamme de variation comprise entre 0,57 et 0,73 g g^{-1} en vierge et entre 0,59 et 0,73 g g^{-1} en repousse. Les **CV% sont faibles** et sont respectivement pour les NDFTS de 6% en vierge et 5% en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1).

Les NDFGB et NDFGS semblent globalement stables jusqu'au milieu du cycle et tendent à diminuer jusqu'en fin de cycle sous l'effet des stress thermiques et hydriques (Figure 4.2). Ces stress favorisent l'accumulation de sucre et inhibent sa translocation des feuilles vers les MS (Ebrahim, 1998). Ce phénomène est bien marqué sur l'essai de Etang Salé. Les NDFGB et NDFGS ont respectivement une gamme de variation comprise entre 0,66 et 0,75 g g^{-1} en vierge et entre 0,65 et 0,76 g g^{-1} en repousse, et entre 0,63 et 0,81 g g^{-1} en vierge et entre 0,65 et 0,81 g g^{-1} en repousse. Les **CV% sont faibles** et sont respectivement pour les NDFGB et NDFGS de 3% en vierge et 4% en repousse, de 5% en vierge et en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1).

Les NDFTR augmentent légèrement en vierge et diminuent en repousse. Ces différences peuvent s'expliquer par des niveaux de décomposition plus ou moins avancés qui font varier les NDFTR selon que les conditions climatiques sont plus humide ou plus sèche. Les NDFTR ont respectivement une gamme de variation comprise entre 0,70 et 0,81 g g^{-1} en vierge et entre 0,69 et 0,81 g g^{-1} en repousse. Les **CV% sont faibles** pour les NDFTR et sont respectivement **de 4%** en vierge et en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1).

4.8. PARTITION DE LA FIBRE DES COMPOSANTES ANATOMIQUES VERS LES COMPOSANTES LIGNOCELLULOSIQUES

4.8.1. Partition de la biomasse de fibre vers la biomasse d'hémicellulose

4.8.1.1. Dans la tige usinable

Le taux de partition de la biomasse de fibre dans la tige usinable en biomasse d'hémicellulose (HEMNDFMS) **diffère au cours du cycle en vierge** et ne présente **pas de différences significatives en repousse** (Annexe 1, Tableau 7.1). Les HEMNDFMS diminuent au cours du cycle en vierge excepté pour le site de Etang Salé et il est sensiblement constant en repousse excepté pour le cultivar R585 (Figure 4.3). Les HEMNDFMS ont une gamme de variation comprise entre 0,34 et 0,43 g g^{-1} et entre 0,36 et 0,42 g g^{-1} en vierge et en repousse respectivement. Les **CV% sont faibles** et sont respectivement de **5%** en vierge et en repousse. Les HEMNDFMS **diffèrent entre sites de manière significative** pour les deux cycles de culture.

Les HEMNDFMS sont **similaires entre génotypes en vierge mais diffèrent en repousse** (Annexe 1, Tableau 7.1). **Pour le cultivar R579 les HEMNDFMS sont généralement plus élevés** comparativement aux deux autres cultivars et ce dans tous les sites mais plus particulièrement pour la dernière date d'échantillonnage (Figure 4.3). Il apparaît une interaction GE en vierge mais pas en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1). Encore une fois des dates de plantation différentes entre sites peuvent masquer des différences entre génotypes et générer des interactions, ce qui rend l'interprétation complexe. Si ces différences et ces interactions existent en vierge elles ne sont pas confirmées en repousse. Cependant, **l'utilisation de l'âge thermique de la tige usinable TTMS comme variable explicative réduit globalement la variabilité entre sites** (Annexe 2, Figure 7.3)

4.8.1.2. Dans les autres composantes anatomiques

Les taux de partition de la biomasse de fibre des composantes anatomiques Ci (TS, GB, GS et TR) en biomasse d'hémicellulose (HEMNDFTS, HEMNDFGB, HEMNDFGS, et HEMNDFTR) ont tendance à augmenter au cours du cycle non pas de manière linéaire mais plutôt de manière erratique (Figure 4.3). Les HEMNDFTS, HEMNDFGB, HEMNDFGS, et HEMNDFTR **diffèrent de manière significative entre sites au cours des deux cycles de culture** excepté HEMNDFGB. Les gammes de variation sont situées entre 0,42 et 0,49 g g^{-1} en vierge et entre 0,40 et 0,48 g g^{-1} en repousse, entre 0,44 et 0,50 g g^{-1} en vierge et entre 0,42 et 0,49 g g^{-1} en repousse, entre 0,40 et 0,48 g g^{-1} en vierge et en repousse, et entre 0,04 et 0,12

g g^{-1} en vierge et entre 0,05 et 0,11 g g^{-1} en repousse pour HEMNDFTS, HEMNDFGB, HEMNDFGS, et HEMNDFTR respectivement (Annexe 1, Tableau 7.1).

Les **CV% sont faibles** pour les HEMNDFTS, HEMNDFGB, HEMNDFGS et **élevés pour les HEMNDFTR** et sont respectivement de 4% en vierge et 5% en repousse, de 4% en vierge et repousse, de 5% en vierge et repousse, et de 11% en vierge et 25% en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1). La variabilité des HEMNDFTR peut s'expliquer par la labilité des hémicelluloses. Des conditions d'humidité élevée vont accélérer la décomposition des feuilles mortes au sol et l'hydrolyse des hémicelluloses.

Les HEMNDFTS et HEMNDFGB ne présentent pas de différences significatives entre cultivars en vierge alors que HEMNDFGB présente des différences significatives entre cultivars en repousse. HEMNDFGS et HEMNDFTR diffèrent de manière significative entre cultivars en vierge et HEMNDFTR ne présente pas de différences significatives entre cultivars en repousse. Il n'apparaît pas d'interaction GE significative pour les deux cycles de culture excepté pour HEMNDFGS et HEMNDFTR en vierge (Annexe 1, Tableau 7.1).

Même si l'on note des différences significatives on retiendra que **les HEMNDF des composantes anatomiques sont globalement peu variables au cours du cycle entre sites et cultivars**.

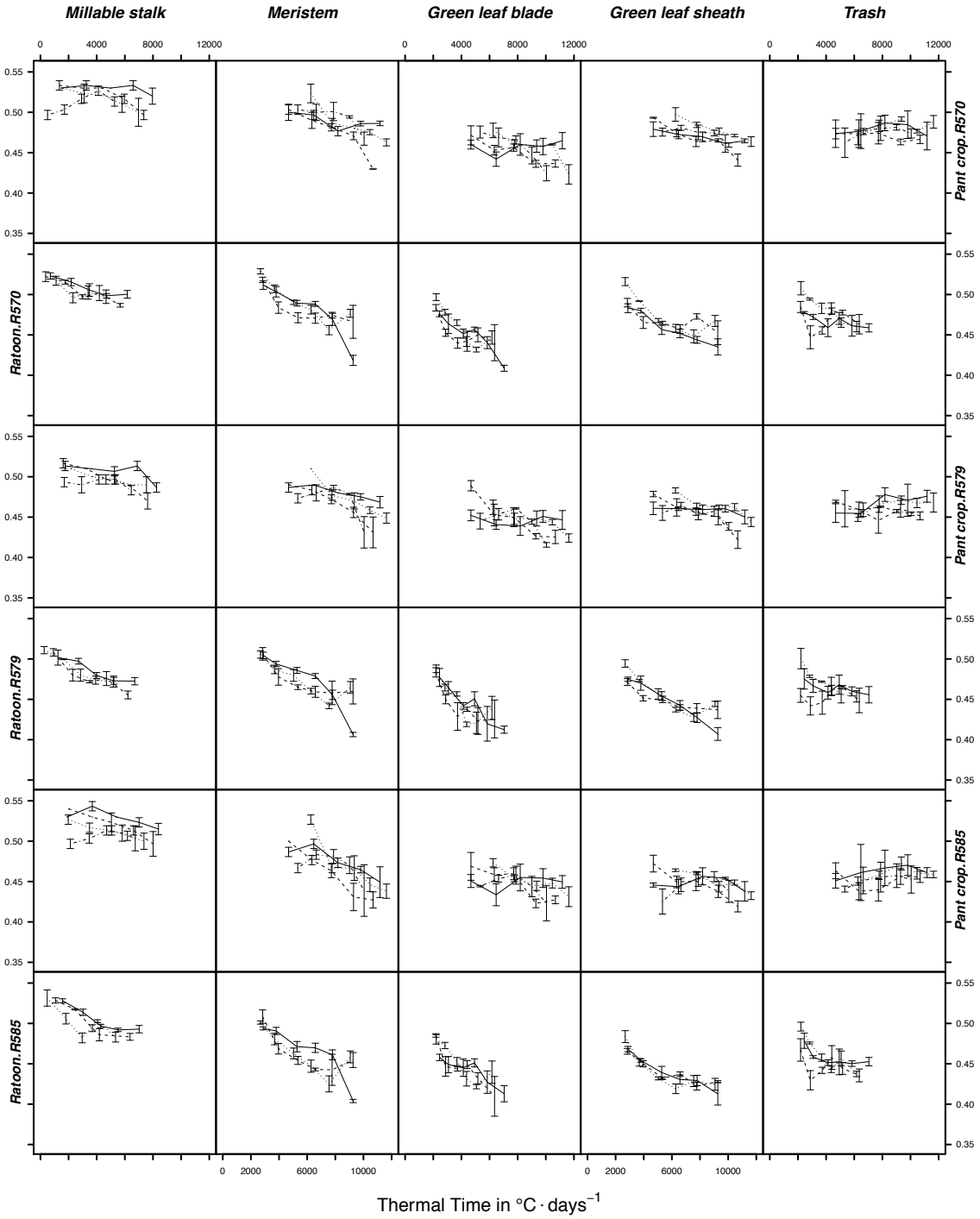
4.8.2. Partition de la biomasse de fibre en biomasse de cellulose

4.8.2.1. Dans la tige usinable

Les taux de partition de la biomasse de fibre de la tige usinable en biomasse de cellulose (CELNDFMS) tendent à diminuer au cours du cycle. On constate que le cultivar R579 présente des CELNDFMS inférieurs aux autres cultivars (Figure 4.4). Les CELNDFMS ont une gamme de variation comprise entre 0,47 et 0,54 g g^{-1} et entre 0,46 et 0,54 g g^{-1} en vierge et en repousse respectivement. Les **CV% sont faibles** et respectivement de 4% en vierge et en repousse. Les CELNDFMS **diffèrent de manière significative entre sites en vierge** alors qu'ils ne présentent **pas de différences significatives entre sites en repousse** (Annexe 1, Tableau 7.1). Comme précédemment, des dates de plantation différentes entre sites génèrent en vierge des différences entre sites qui ne sont pas confirmées en repousse.

Les CELNDFMS ne présentent **pas de différences significatives entre cultivars en vierge** et ils **diffèrent de manière significative entre cultivars en repousse**. Il n'apparaît pas d'interaction GE significative pour les deux cycles de culture (Annexe 1, Tableau 7.1). Cependant, l'utilisation de l'âge thermique de la tige usinable **TTMS comme variable explicative réduit globalement la variabilité entre sites** (Annexe 2, Figure 7.4

Figure 4.3 Taux de partition de la fibre NDFi des composantes anatomiques Ci (MS = Millable stalk, TS = Meristem, GB = Green leaf blade, GS = Green leaf sheath et TR = Trash) en hémicelluloses en fonction du temps thermique (âge thermique de la tige usinable TTMS et âge thermique depuis la levée TTAB pour les autres composantes) pour trois cultivars (R570, R579 et R585) dans 4 sites contrastés (- La Mare, … Menciol, - - Le Gol et .-. Vue Belle) de l'île de la Réunion durant 2 cycles de cultures (Plant crop = vierge et Ratoon = repousse).



4.8.2.2. Dans les autres composantes anatomiques

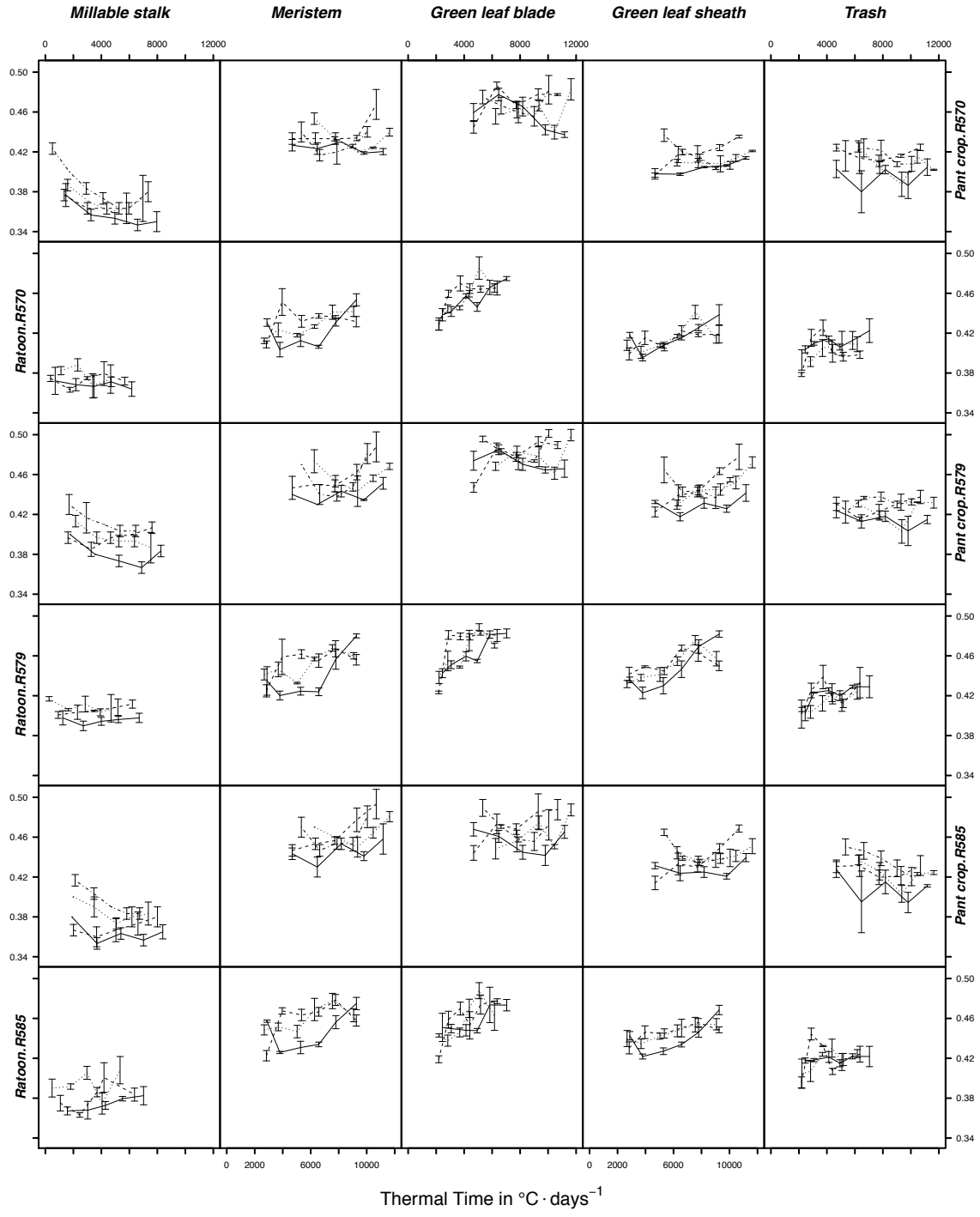
Les taux de partition de la biomasse de fibre des composantes anatomiques Ci (TS, GB, GS et TR) en biomasse de cellulose (CELNDFTS, CELNDFGB, CELNDFGS, et CELNDFTR) sont plutôt erratiques et augmentent ou diminuent au cours du cycle (Figure 4.4). Les gammes de variation sont situées entre 0,43 et 0,52 g g^{-1} en vierge et entre 0,40 et 0,53 g g^{-1} en repousse, entre 0,42 et 0,49 g g^{-1} en vierge et entre 0,43 et 0,50 g g^{-1} en repousse, entre 0,42 et 0,50 g g^{-1} en vierge et entre 0,41 et 0,52 g g^{-1} en repousse, et entre 0,38 et 0,45 g g^{-1} en vierge et entre 0,38 et 0,44 g g^{-1} en repousse pour HEMNDFTS, HEMNDFGB, HEMNDFGS, et HEMNDFTR respectivement. Les **CV% sont faibles** pour les HEMNDFTS, HEMNDFGB, HEMNDFGS et HEMNDFTR sont respectivement de 5% en vierge et 6% en repousse, de 4% en vierge et 5% repousse, de 4% en vierge et 5% repousse, et de 4% en vierge et 3% en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1).

Les CELNDFGB diffèrent de manière significative entre sites en vierge alors qu'ils ne présentent pas de différences significatives entre sites en repousse. Les CELNDFTR ne présentent pas de différences significatives entre sites en vierge et ils diffèrent de manière significative entre sites en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1).

Les CELNDFTS, CELNDFGB et CELNDFTR ne présentent **pas de différences significatives entre cultivars** pour les deux cycles de culture. Seuls les CELNDFGS **diffèrent de manière significative entre cultivars** pour les deux cycles de culture. D'ailleurs, on constate que le cultivar R585 présente des CELNDFTS, CELNDFGB, CELNDFGS, et CELNDFTR globalement supérieurs aux autres cultivars (Figure 4.4). Il n'apparaît pas d'interaction GE significative pour les deux cycles de culture (Annexe 1, Tableau 7.1).

Comme pour les hémicellulose, malgré des différences significatives on retiendra que **les CELNDF des composantes anatomiques sont globalement peu variables au cours du cycle entre sites et cultivars**.

Figure 4.4 Taux de partition de la fibre NDFi des composantes anatomiques Ci (MS = Millable stalk, TS = Meristem, GB = Green leaf blade, GS = Green leaf sheath et TR = Trash) en cellulose en fonction du temps thermique (âge thermique de la tige usinable TTMS et âge thermique depuis la levée TTAB pour les autres composantes) pour trois cultivars (R570, R579 et R585) dans 4 sites contrastés (- La Mare, … Menciol, - - Le Gol et .-. Vue Belle) de l'île de la Réunion durant 2 cycles de cultures (Plant crop = vierge et Ratoon = repousse).



4.8.3. Partition de la biomasse de fibre en biomasse de lignine

4.8.3.1. Dans la tige usinable

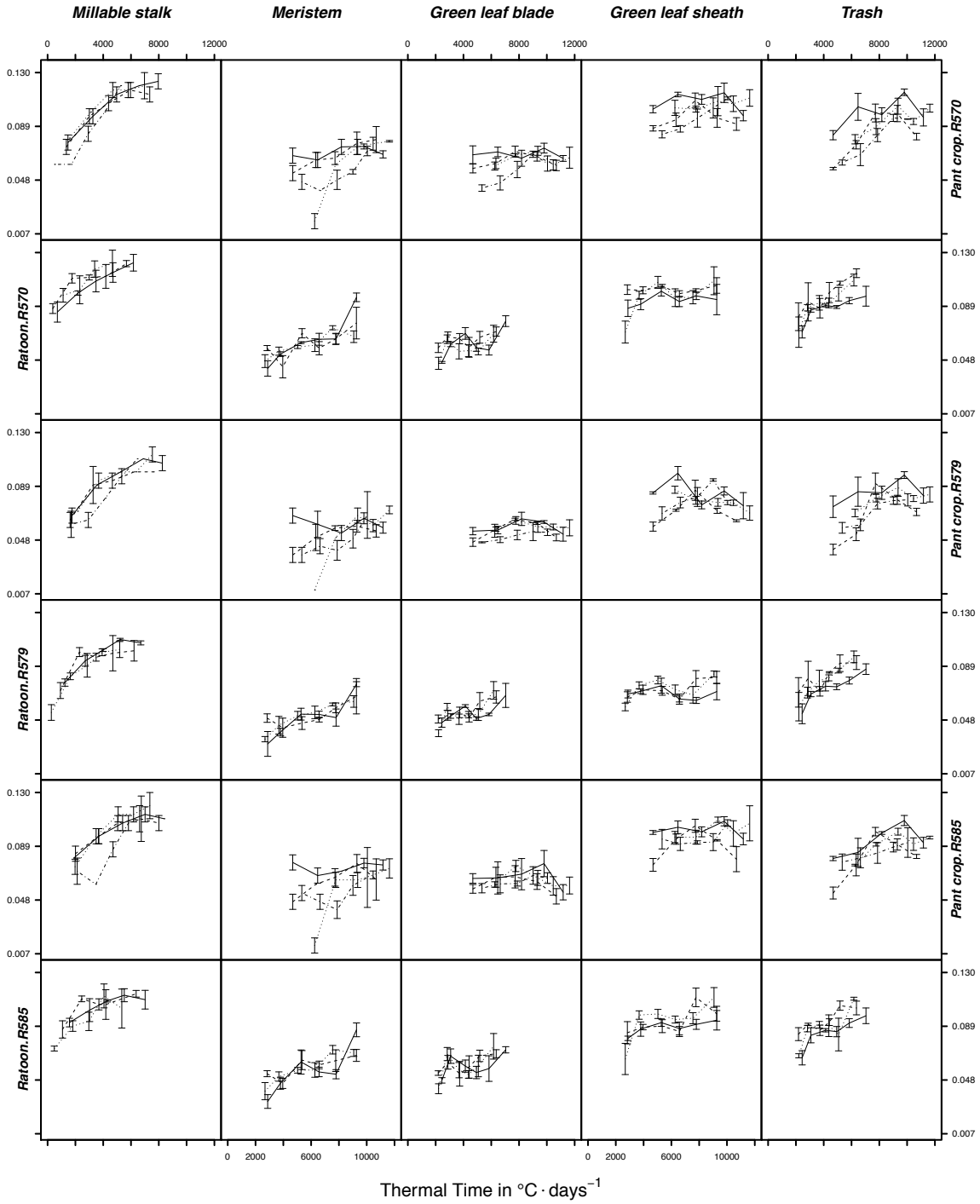
Le taux de partition de la biomasse de fibre de tige usinable en biomasse de lignine (LIGNDFMS) augmente au cours du cycle pour atteindre un plateau à environ 7000 et 5000 degrés jour en vierge et en repousse respectivement (Figure 4.5). Les LIGNDFMS ont une gamme de variation comprise entre 0,06 et 0,12 g g^{-1} en vierge, et entre 0,05 et 0,12 g g^{-1} en repousse. Les **CV% sont élevés** (comparativement à HEMNDFMS et CELNDFMS) et respectivement de **20%** en vierge et en repousse. Les LIGNDFMS **diffèrent entre sites pour les deux cycles de culture** (Annexe 1, Tableau 7.1). On notera qu'un traitement herbicide a été réalisé en début de cycle de vierge à Vue Belle ce qui génère une évolution différente des LIGNDFMS par rapport aux autres sites (Figure 4.5). Les herbicides ont pour effet de stopper la croissance de la canne à sucre et sont dans certain cas utilisés comme maturateur sur canne à sucre (Dalley et Richard, 2010). Les lignines sont des composés généralement synthétisés par la plante en réponse à des stress biotiques ou abiotiques. Or, il semblerait que le traitement herbicide est pour effet de diminuer le LIGNDFMS (Figure 4.5).

Les LIGNDFMS ne présentent **pas de différences significatives entre cultivars en vierge alors qu'ils diffèrent de manière significative en repousse**. On aurait pu s'attendre au contraire, d'autant qu'il n'apparaît **pas d'interaction GE significative pour les deux cycles de culture** (Annexe 1, Tableau 7.1). Néanmoins, **l'utilisation de l'âge thermique de la tige usinable TTMS comme variable explicative réduit globalement la variabilité entre sites** (Annexe 2, Figure 7.5).

4.8.3.2. Dans les autres composantes anatomiques

Les taux de partition de la biomasse de fibre des composantes anatomiques Ci (TS, GB, GS et TR) en biomasse de lignine (LIGNDFTS, LIGNDFGB, LIGNDFGS, et LIGNDFTR) ont en général tendance à augmenter au cours du cycle. Les gammes de variation sont situées entre 0,01 et 0,08 g g^{-1} en vierge et entre 0,03 et 0,10 g g^{-1} en repousse, entre 0,04 et 0,08 g g^{-1} en vierge et repousse, entre 0,06 et 0,11 g g^{-1} en vierge et repousse, et entre 0,44 et 0,49 g g^{-1} en vierge et entre 0,44 et 0,51 g g^{-1} en repousse pour LIGNDFTS, LIGNDFGB, LIGNDFGS, et LIGNDFTR respectivement. Les CV% pour les LIGNDFTS, LIGNDFGB, LIGNDFGS, et LIGNDFTR sont respectivement de 27% en vierge et 23% en repousse, de 13% en vierge et 16% repousse, de 15% en vierge et 17% repousse, et de 3% en vierge et 4% en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1).

Figure 4.5 Taux de partition de la fibre NDFi des composantes anatomiques Ci (MS = Millable stalk, TS = Meristem, GB = Green leaf blade, GS = Green leaf sheath et TR = Trash) en lignine en fonction du temps thermique (âge thermique de la tige usinable TTMS et âge thermique depuis la levée TTAB pour les autres composantes) pour trois cultivars (R570, R579 et R585) dans 4 sites contrastés (- La Mare, … Menciol, - - Le Gol et .-. Vue Belle) de l'île de la Réunion durant 2 cycles de cultures (Plant crop = vierge et Ratoon = repousse).

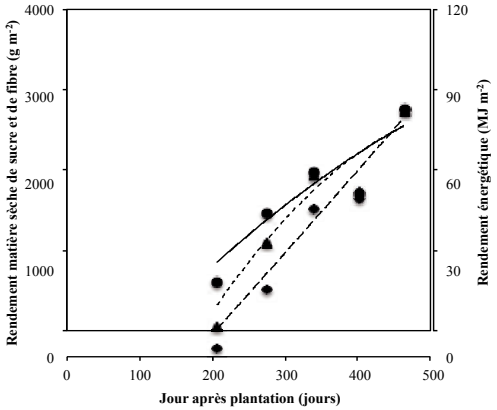
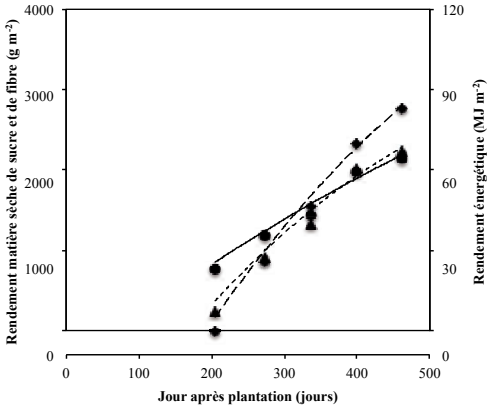
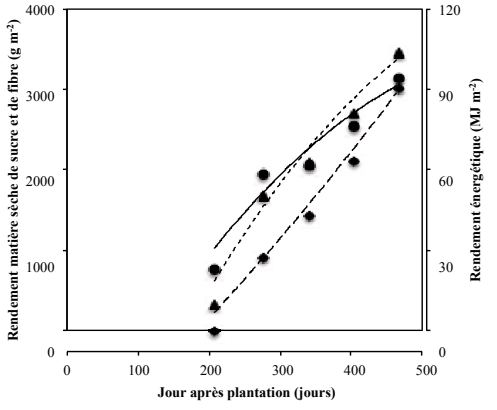
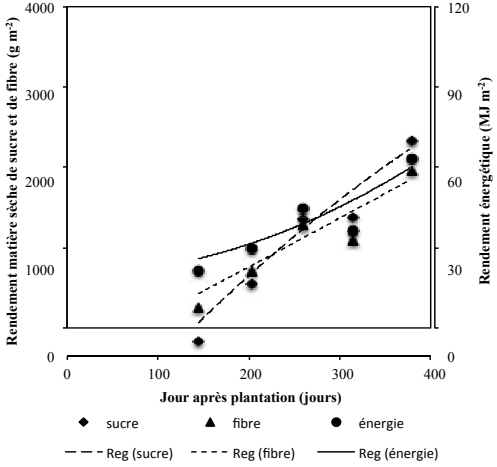
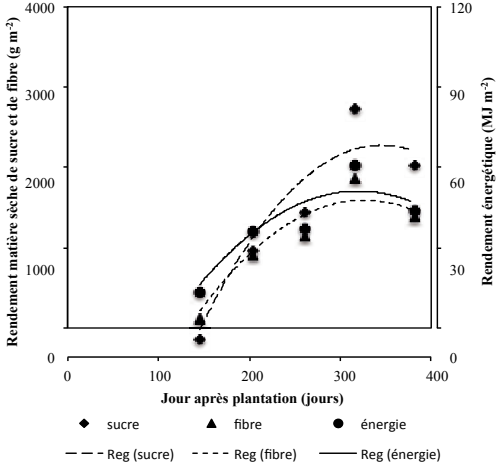
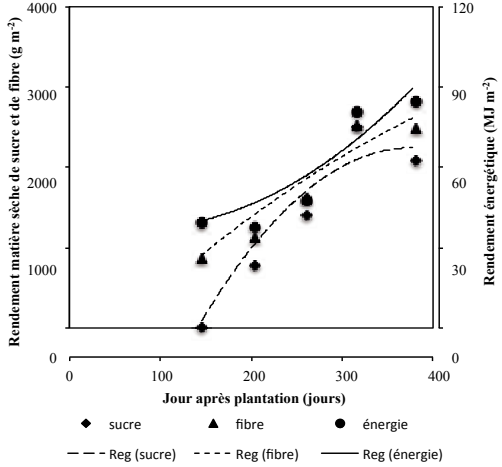


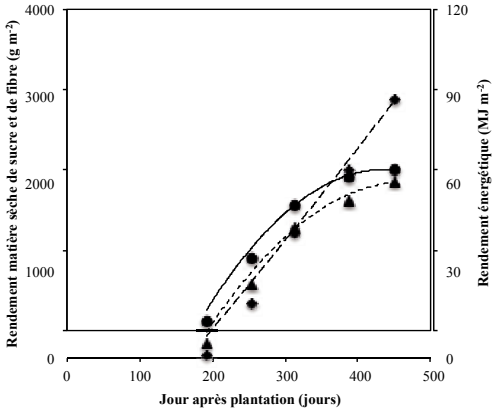
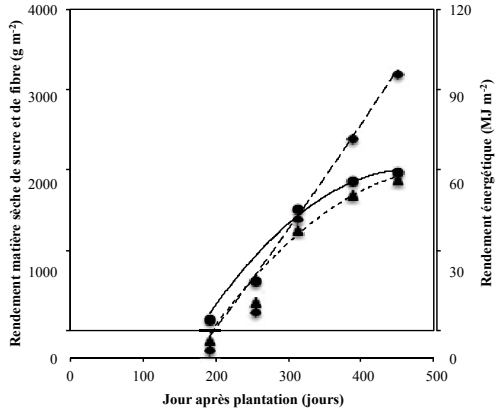
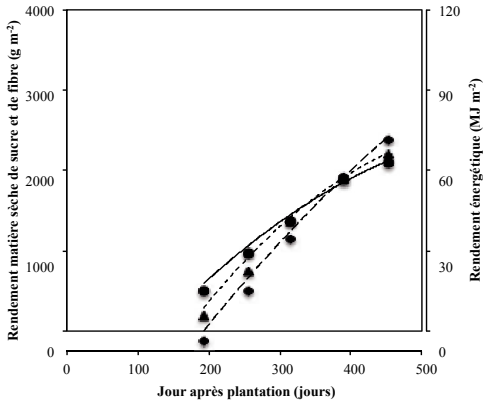
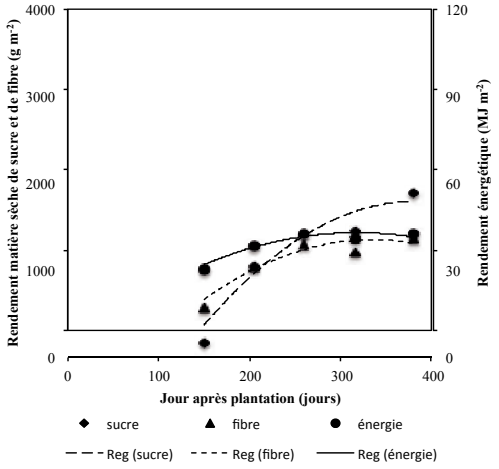
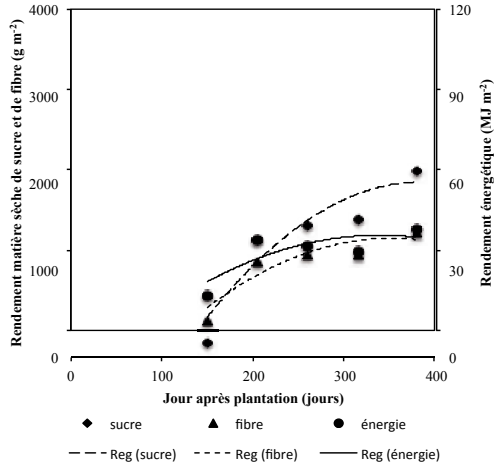
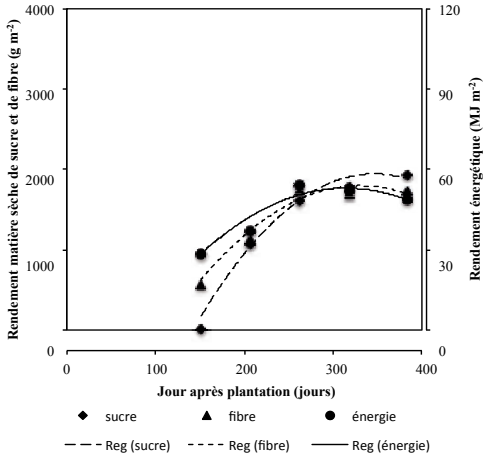
Les LIGNDFTS, LIGNDFGS, et LIGNDFTR **diffèrent de manière significative entre sites** pour les deux cycles de culture alors que les LIGNDFGB diffèrent de manière significative entre sites en vierge mais pas en repousse (Annexe 1, Tableau 7.1).
En vierge les LIGNDFTS, LIGNDFGS, et LIGNDFTR **ne présentent pas de différences significatives entre cultivars** alors que les LIGNDFGB diffèrent de manière significative entre cultivars. En repousse c'est exactement l'inverse les LIGNDFTS, LIGNDFGS, et LIGNDFTR diffèrent de manière significative entre cultivars alors que les LIGNDFGB ne présentent pas de différences significatives entre cultivars (Annexe 1, Tableau 7.1).
On retiendra que **les lignines présentent une variabilité élevée par rapport aux autres composantes lignocellulosiques** (hémicellulose et cellulose) si l'on utilise le CV% comme indicateur. **Il semble donc qu'il soit plus important de concentrer l'analyse de la variabilité sur les lignines**.

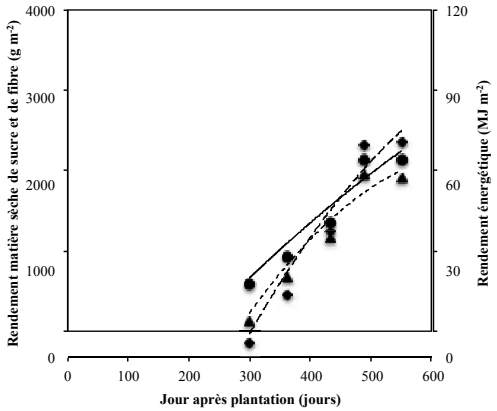
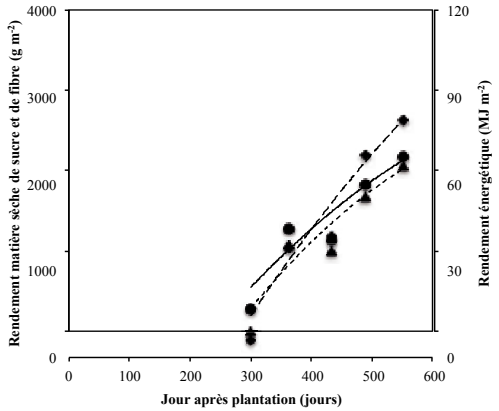
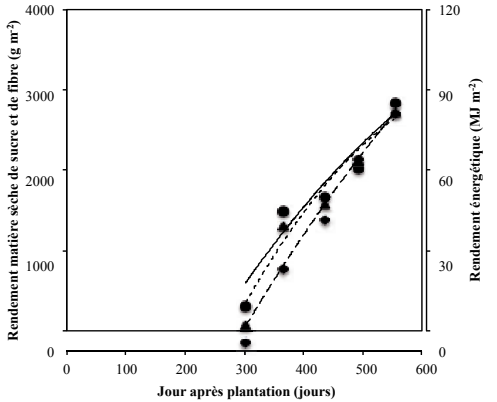
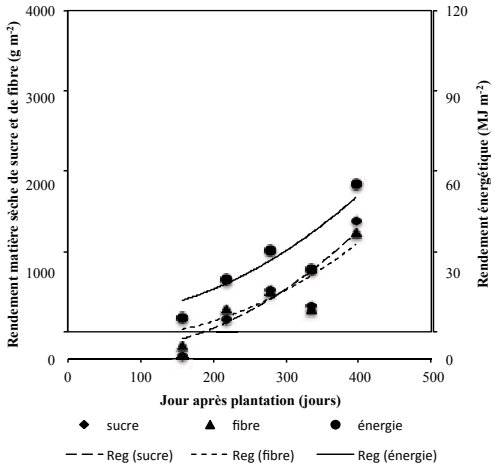
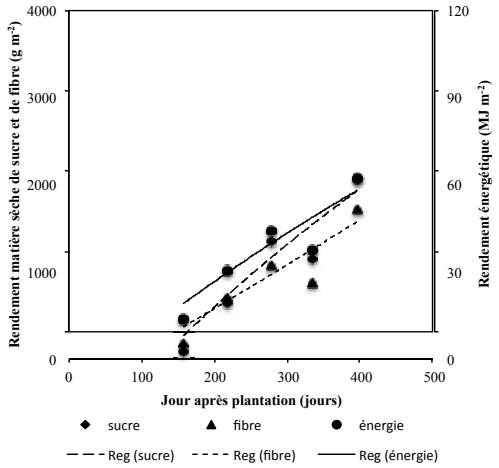
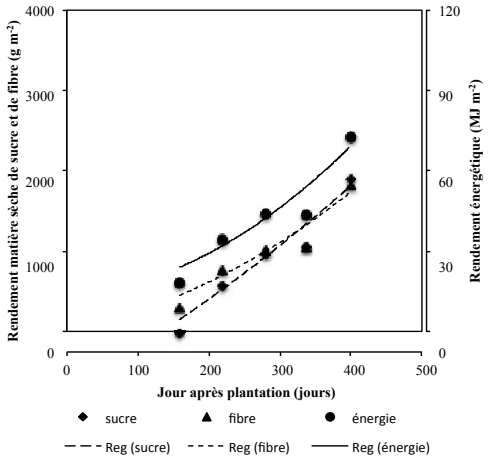
Dans le paragraphe ci-après nous allons suivre l'évolution des rendements en sucre, fibre (g m^{-2}) et énergétique (MJ m^{-2}). Les valeurs de rendement énergétique Ep (« énergie » Figure 4.6) ont été calculées à partir des formules décrites dans le chapitre 4A. Les valeurs des rendements en « sucre » (dSUGMS) et « fibre » (dNDFMS) ont été mesurées dans nos essais. Les résultats énoncés dans de le chapitre 4A montrent que le potentiel calorifique inférieure (LHV) est très peu variable entre sites, cultivars et composantes anatomiques. Pour cette raison nous ne présenterons que les évolutions des rendements précédemment énoncés. Les graphes présentés dans la figure 4.6 sont simplement décrit visuellement et n'ont pas fait l'objet d'une analyse de variance explicative.

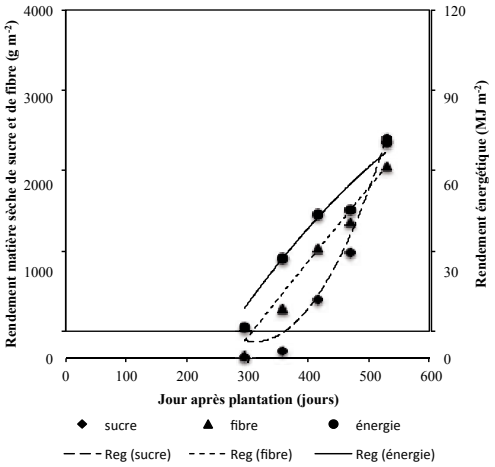
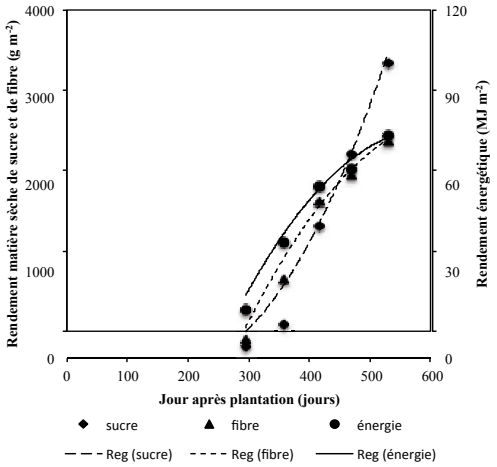
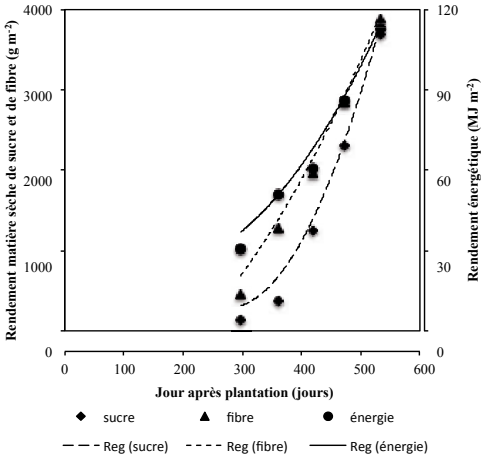
4.9. ÉVOLUTION DU POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE ET SUCRIER DE LA PRODUCTION SELON DIFFÉRENTS IDÉOTYPES

Figure 4.6 Rendement en sucre, fibre (g m^{-2}) et énergie (MJ m^{-2}) de la production selon différents idéotypes (sites, cultivars).

Site	Cycle	R570	R579	R585
La Mare	Plant crop			
	First ratoon			

Site	Cycle	R570	R579	R585
Etang Salé	Plant crop			
	First ratoon			

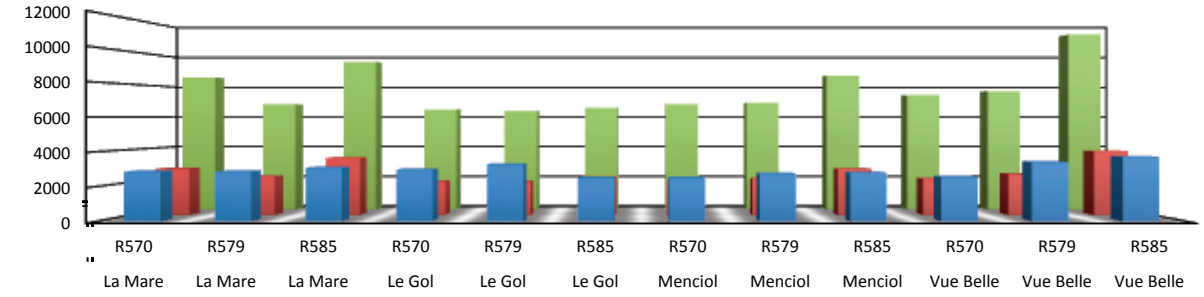
Site	Cycle	R570	R579	R585
Menciol	Plant crop			
	First ratoon			

Site	Cycle	R570	R579	R585
Vue Belle	Plant crop			

4.9.1. Définition des profils de production

On peut définir un profil de production comme la capacité que présente un cultivar (génotype), un environnement (climat et pratiques) ou la combinaison des deux (idéotype), à répondre à un ou plusieurs objectifs de production. Les cultivars et les sites ainsi que leurs combinaisons répondent à des profils de production clairement différents. Selon les objectif de production visés, les cultivars et les sites testés dans cette étude, on peut définir 3 profils de production : (i) le profil sucrier (rendement en sucre élevé, rendement en fibre et énergie faibles), (ii) le profil mixte (rendement en sucre élevé, rendement en fibre et énergie moyens) et (iii) le profil énergétique (rendement en sucre, fibre et énergie élevés).

Figure 4.7 Graphique de détermination des profils de production avec pour un cycle de vierge à la récolte les rendements en sucre (bleu) et fibre (rouge) en g m^{-2}, et énergie (vert) en MJ m^{-2} * 100, selon différents idéotypes (sites, cultivars).



	La Mare R570	La Mare R579	La Mare R585	Le Gol R570	Le Gol R579	Le Gol R585	Menciol R570	Menciol R579	Menciol R585	Vue Belle R570	Vue Belle R579	Vue Belle R585
sucre	2854	2847	3070	2960	3259	2477	2477	2734	2778	2527	3397	3706
fibre	2828	2356	3485	2030	2044	2301	2065	2212	2797	2210	2500	3901
énergie	8557	6817	9574	6471	6388	6602	6842	6907	8683	7412	7670	11341

Profil de production « **mixte** »

Profil de production « **sucrier** »

Profil de production « **énergétique** »

4.9.2. Caractérisation de l'effet site *vs*. profils de production

Durant le cycle de vierge, les sites de La Mare (pas de stress hydrique) et de Etang Salé (stress hydrique) présentent des profils de production opposés sur le plan énergétique. A La Mare le rendement énergétique ne cesse de croître alors qu'il plafonne à Etang Salé.

Toutefois, dans ces deux sites le rendement en sucre reste sensiblement équivalent à la récolte. Les deux autres sites Menciol (pas de stress hydrique) et Vue Belle (stress hydrique modéré) présentent globalement les mêmes profils de production que le site de La Mare. Le stress hydrique a donc un fort impact sur le rendement énergétique de la production mais cet impact est toutefois moindre sur le rendement sucrier de la production.

En repousse, à Etang Salé l'effet du stress hydrique est nettement plus marqué qu'en vierge. Le rendement énergétique de la production y est clairement plus faible comparativement aux autres sites alors que le rendement en sucre est équivalent voire plus faible. La mécanisation complète ou partielle de la récolte endommage les parcelles et provoque tassement des sols, écrasement des souches, ce qui généralement conduit à des baisses de rendement entre vierge et repousse. La différence de longueur entre les deux cycles est également un facteur déterminant expliquant aussi la diminution des rendements.

4.9.3. Caractérisation des cultivars *vs.* profils de production

Les cultivars ont des profils de production clairement différents. On peut définir 3 profils de production : (i) le profil sucrier (rendement en sucre élevé, rendement en fibre et énergiefaibles), (ii) le profil mixte (rendement en sucre élevé, rendement en fibre et énergie moyens) et (iii) le profil énergétique (rendement en sucre, fibre et énergie élevés).

Le cultivar R579 a sans nul doute un profil de production sucrier, sélectionné pour répondre aux contraintes de la filière sucrière (richesse élevée et faible taux de fibre). La partition de sa biomasse est préférentiellement orientée vers la production de sucre quel que soit le site considéré. On notera également qu'il répond plus favorablement que les autres cultivars aux choix techniques imposés par les besoins de la filière sucrière. Ce constat est le résultat d'un long processus de sélection dont les critères de sélection étaient clairement orientés vers des rendements en sucre élevé et fibre faible. Lorsque ce cultivar fût libéré les enjeux de la filière étaient différents de ceux qu'elle poursuit aujourd'hui. Les critères de sélection énergétiques n'étant pas établis, ils n'ont donc pas été considérés lors du processus de sélection.

Le cultivar R570 présente un profil de production mixte, proche du cultivar R579, mais sélectionné pour ses caractéristiques de robustesse et d'adaptation à une large gamme de conditions climatiques. Ceci explique qu'il reste le cultivar le plus répandu sur l'île de la Réunion (environ 60% des surfaces plantées). On remarque qu'il est moins sensible aux choix techniques (arrêt de l'irrigation en fin de cycle pour favoriser l'accumulation de saccharose dans les tiges) imposés par les besoins de la filière sucrière (richesse élevée et taux de fibre

faible) que le cultivar R579. Son profil de production est à mi chemin entre des caractéristiques énergétique et sucrière. En condition de stress hydrique (Etang Salé) il présente des rendements en sucre, fibre et énergie similaires au cultivar R579. Alors qu'en conditions de croissance optimale (La Mare) il affiche un rendement en sucre équivalent au cultivar R579 mais un rendement énergétique supérieur.

Hormis en condition de stress hydrique (Etang Salé), **le cultivar R585 présente des rendements en sucre, fibre et énergie supérieurs aux autres cultivars. Son profil de production est clairement orienté vers l'énergie toutefois, il produit également plus de sucre à l'hectare que les autres cultivars mais aussi plus de fibre**. Son profil de production risque donc de ne pas être adapté, en termes de technicité, aux attentes de la filière sucrière.

4.10. ÉLÉMENTS DE DISCUSSION SUR LES FACTEURS DE VARIATIONS

4.10.1. Partition de la biomasse aérienne en biomasse decomposantes anatomiques

Les taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable MS exprimés en fonction de l'âge thermique de la tige usinable TTMS ne présentent pas de différences significatives entre sites en repousse. En vierge, les dates de plantation des essais diffèrent entre les sites et **le temps thermique ne suffit pas à lui tout seul pour expliquer la variabilité entre sites, même si il permet de la réduire fortement**. En effet, selon que l'on implante une culture en saison sèche et froide ou chaude et humide celle-ci est exposée à des profils thermo-radiatifs différents durant des phases phénologiques différentes ce qui implique de **tenir compte des stress thermiques dans l'estimation de l'âge physiologique**. Une exposition de la canne à différents profils en phase d'implantation agit sur sa vitesse de développement (van Heerden et al., 2010). La température du sol et son hygrométrie sont également des facteurs déterminant lors de la phase d'implantation de la culture (van Dillewijn, 1960 ; Clement, 1980). Cet effet a été démontré uniquement en repousse (Inman-Bamber et al, 1994) mais il est fortement probable qu'il en soit de même en vierge.

4.10.2. Partition de la biomasse des composantes anatomiques en biomasse de fibre

En vierge on constate que les NDFMS pour le site de Etang Salé sont toujours inférieures à celles des autres sites. Les essais de La Mare, Menciol et Vue Belle ont été plantés en milieu et en début de saison chaude et humide (22/04/2008, 21/03/2008 et 27/01/2008 respectivement) alors que l'essai de Etang Salé a été planté en milieu de saison sèche et froide (28/07/2008). Or, **la température est un facteur déterminant de la croissance de la plante**

car elle détermine l'initiation ou l'inhibition des processus. **Le stress hydrique n'en est pas moins un des principaux facteurs affectant la croissance de la plante** (Inman-Bamber, 1995). Ces deux facteurs conditionnant l'arrêt ou la diminution de la croissance, la plante va orienter préférentiellement la partition de la tige usinable vers le stockage du sucre au détriment de la croissance donc des structures (fibre). Ainsi, on constate que **les NDFMS sont plus élevés dans les sites n'ayant pas subit de stress hydrique** (e.g. La Mare). Malgré la réduction de la variabilité entre sites en utilisant l'âge thermique comme variable explicative, **il est essentiel de prendre en compte l'effet de ces stress si l'on veut modéliser correctement l'accumulation de la fibre dans la plante**.

4.10.3. Partition de la biomasse de fibre en biomasse de composantes lignocellulosiques

On remarque que les **HEMNDFMS sont plus élevés dans les sites où le stress hydrique est important** notamment en fin de cycle (e.g. Etang Salé) et que **les CELNDFMS sont plus élevés dans les sites aux températures élevées** et n'ayant pas subit de stress hydrique (e.g. La Mare). L'accumulation de sucre dans la cellule sous l'effet de stress contribue apparemment à favoriser l'accumulation d'hémicellulose dans les parois. L'influence des stress (thermique et hydrique) doit être prise en compte si l'on veut correctement modéliser l'accumulation de ces deux composés dans la plante et notamment l'action de ces stress sur les mécanismes de biosynthèse. Néanmoins, l'âge thermique permet d'expliquer la majeure partie de la variabilité. **La lignine est le composé qui présente la plus grande variabilité** contrairement au deux précédent (hémicellulose et cellulose). Les LIGNDFMS sont clairement antagoniques des HEMNDFMS et CELNDFMS. Le dépôt de lignine au niveau de la paroi cellulaire n'a lieu que lorsque la cellule a achevé sa croissance (arrêt de la synthèse d'hémicellulose et de cellulose). L'accumulation de lignine dans les tissus de soutien est donc temporellement concomitante mais spatialement séparé de la phase d'accumulation de sucre dans les cellules du parenchyme. Or, si la partition vers les fibres est réduite en cas de stress thermique et hydrique il se pourrait donc que ces stress aient une influence sur les LIGNDFMS et qu'il faille en tenir compte en priorité si l'on veut modéliser correctement l'accumulation de ce composé dans la plante. Toutefois, il apparaît que **le facteur de variation prédominant dans le cas de la lignine soit lié à l'âge**.

4.10.4. Potentiel énergétique et sucrier de la production

Le stress hydrique a pour principal effet de réduire la croissance de la plante (Inman-Bamber, 1995). Le puits « croissance » étant de fait restreint alors que la source « photosynthèse » l'est moins (Ebrahim, 1998), ceci contraint la plante a orienter préférentiellement ses photoassimilats vers le stockage des sucres. Cette orientation préférentielle liée en grande partie aux stress thermique et hydrique est un frein aux capacités de production énergétique de la plante.

Les itinéraires techniques sont calés en fonction des conditions du milieu mais ne sont optimisés que pour répondre aux contraintes liées au procédé industriel d'extraction du sucre. En effet, la teneur en sucre extractible de la production est négativement corrélé au taux de fibre (Glaz et al., 2011). **La maximisation du rendement énergétique de la production n'est donc pas antagoniste du rendement en sucre mais ne permet simplement pas d'obtenir un profil de production qui réponde aux contraintes liées au procédé d'extraction industriel du sucre** (richesse élevée et faible taux de fibre).

CHAPITRE 5.
CONCEPTION D'UN MODULE DE SIMULATION DES COMPOSANTES DU RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE

5A. VALIDATION DU CHOIX DU MODÈLE ET CALAGE DU NOUVEAU MODULE DE PARTITION DE LA BIOMASSE AÉRIENNE : ÉQUATIONS ET PARAMÈTRES

Le choix du modèle « Mosicas » apparaît comme évident pour les raisons déjà évoquées dans le Chapitre 2. Néanmoins, la version précédente du modèle « Mosicas » n'a été calée que pour un seul cycle de culture (première repousse) et une seule variété de canne à sucre (R570). Donc, avant d'arrêter définitivement notre choix sur le modèle « Mosicas » nous avons au préalable testé ses capacités prédictives dans les conditions pédoclimatiques de nos essais. Ces tests consistent à confronter les données mesurées dans nos essais à celles simulées obtenues en sortie par la précédente version du modèle « Mosicas ». Les comparaisons concernent les données de biomasse aérienne (dAB) et le taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable (MS) pour la variété R570 au cours du cycle de repousse.

5.1. VALIDATION DE LA PRÉCÉDENTE VERSION DU MODÈLE « MOSICAS » SUR LES DONNÉES OBSERVÉES DANS NOS ESSAIS

5.1.1. Sur la biomasse aérienne

La précédente version du modèle « Mosicas » sous estime légèrement et systématiquement les données de dAB observées dans nos essais (Figure 5.1). Une des explications possible provient de notre protocole d'échantillonnage. Pour des raisons pratiques et économiques (main d'œuvre, manutention, temps de travail et taille des essais réduites), les échantillonnages destructifs de biomasse ont été réalisés sur des placettes d'un mètre linéaire. Ces placettes présentaient généralement une densité de tiges élevée comparativement à la densité observée sur l'ensemble du rang et surtout à l'échelle de la parcelle. Des densités élevées conduisent donc à des rendements observés supérieurs à la réalité parcellaire.

Un test de cohérence entreles données observées dans nos essais et les données de sortie simulées par le modèle « Mosicas » (régression linéaire en trait pointillé Figure 5.1) nous permet de calculer une erreur par rapport à l'ajustement parfait (bissectrice en trait plein sur la Figure 5.1) soit rmse (*root mean square error*) = 834 g m^{-2}.

Figure 5.1 Test de cohérence entreen ordonnéeles données de biomasse aérienne observées dans nos essais (odAB) et en abscisse les données de sortie simulées par le modèle « Mosicas » (sdAB). Les acronymes correspondent aux sites testés avec LM = La Mare, ME = Menciol et ES = Etang Salé ; rmse (*root mean square error*) = 834 g m^{-2}.

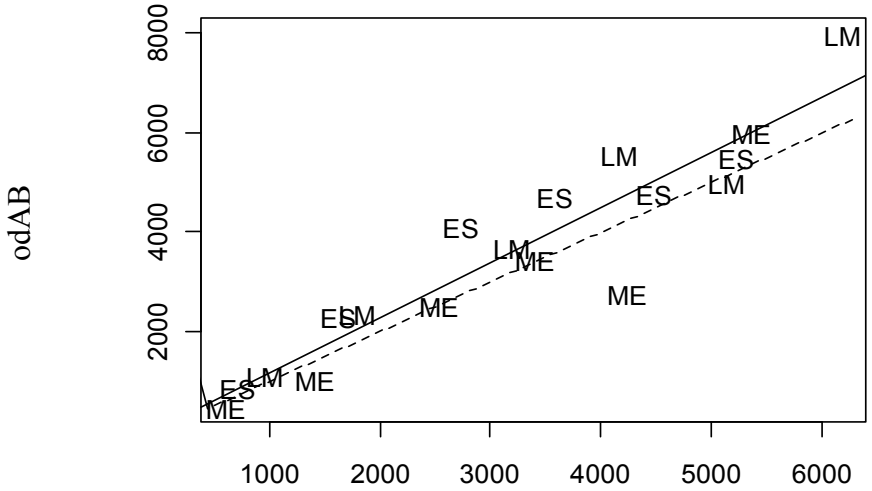
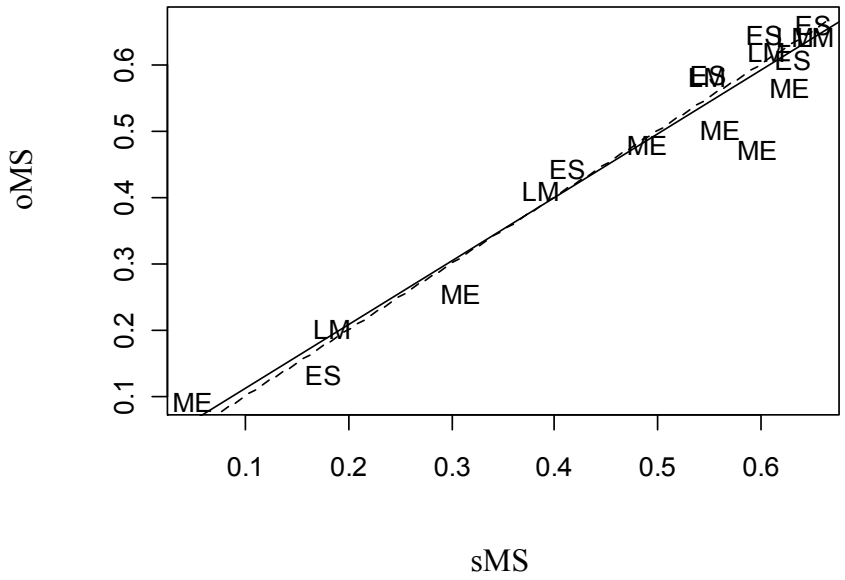


Figure 5.2 Test de cohérence entre en ordonnée les données de taux de partition de la biomasse aérienne en tige usinable observées dans nos essais (oMS) et en abscisse les données de sortie simulées par le modèle « Mosicas » (sMS). Les acronymes correspondent aux sites testés avec LM = La Mare, ME = Menciol et ES = Etang Salé ; rmse (*root mean square error*) = 0.0447 g g^{-1}.



5.1.2. Sur la partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable

La précédente version du modèle « Mosicas » estime bien le taux de partition de la biomasse aérienne en tige usinable (MS). Un test de cohérence entre les données observées dans nos essais et les données de sortie simulées par le modèle « Mosicas » (régression en trait pointillé Figure 5.2) nous permet de calculer une erreur par rapport à l'ajustement parfait (trait plein sur la Figure 5.2) soit rmse = 0.0447 g g^{-1}. La précédente version du modèle « Mosicas » permet une bonne estimation du MS.

La précédente version du modèle est donc validée sur nos données et peut être utilisée par la suite pour nos besoins de modélisation.

5.2. DESCRIPTION DU NOUVEAU MODULE DE PARTITION : PARAMÈTRES ET ÉQUATIONS

Dans cette partie nous décrivons les paramètres et les équations correspondantes qui constituent le nouveau module de partition inclut dans le modèle « Mosicas ». Les paramètres du nouveau module de partition ont été calés pour deux cycles de culture (vierge et première repousse) et trois cultivars (R570, R579 et R585). Le calage a été réalisé sur les données issues de nos 4 sites expérimentaux (La Mare, Etang Salé, Menciol et Vue Belle) chacun ayant été échantillonné à cinq âges au cours des deux cycles de culture.

Ce choix a été fait au départ car nous n'avions comme unique but que de montrer qu'il était possible de simuler l'évolution des composantes lignocellulosiques et structurales dans la biomasse aérienne de canne à sucre. Ce module n'est donc pas parfait loin de là, mais notre démarche permet simplement d'en démontrer non sans défaut, la faisabilité.

5.2.1. Somme de température à l'apparition de la tige usinable

L'apparition de la tige usinable est un paramètre déterminé par Martiné, (2003) et correspond à une quantité de biomasse aérienne (dAB) formée de 425 g m^{-2}. Les suivis d'évolution de la dAB et de somme des températures depuis l'apparition de dAB en base 12 (TTAB) permettent de déterminer la somme de température atteinte lorsque l'apparition de la tige usinable débute (*pMS*). L'âge thermique de la tige usinable TTMS est donc égal à la différence entre TTAB et *pMS* (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 1 et 2). Ainsi, pour toutes les caractéristiques concernant les MS c'est TTMS qui est utilisée comme variable explicative et TTAB pour toutes les autres composantes.

5.2.2. Partition de la biomasse aérienne en composantes anatomiques

5.2.2.1. Partition de la biomasse aérienne vers la biomasse de tige usinable

Les suivis d'évolution de la biomasse aérienne (dAB) et de tige usinable (dMS) permettent, à chaque date d'échantillonnages, de déterminer la proportion de tige usinable dans la biomasse aérienne (MS).

Tableau 5.3 Estimation des paramètres utilisés dans la relation entre le taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable MS (g g^{-1}) et l'âge thermique de la tige usinable TTMS(somme de degrés jour) ; MS = *MSa**(1-exp(-*MSk*/(10^3)*TTMS)).

Cycle	Cultivar	n	Paramètre	Valeur	rmse
PC	R570	20	*MSa*	0.70986712	0,05
PC	R570	20	*MSk*	0.69798037	0,15
PC	R570	20	*pMS*	2017.93184	270
R1	R570	15	*MSa*	0.65632968	0,05
R1	R570	15	*MSk*	0.96457518	0,15
R1	R570	15	*pMS*	1168.91856	270
PC	R579	20	*MSa*	0.79209618	0,05
PC	R579	20	*MSk*	0.56286456	0,15
PC	R579	20	*pMS*	1492.49933	270
R1	R579	15	*MSa*	0.71042379	0,05
R1	R579	15	*MSk*	1.05997158	0,15
R1	R579	15	*pMS*	973.19635	270
PC	R585	20	*MSa*	0.75211562	0,05
PC	R585	20	*MSk*	0.6663301	0,15
PC	R585	20	*pMS*	1447.90271	270
R1	R585	15	*MSa*	0.71487245	0,05
R1	R585	15	*MSk*	1.18608768	0,15
R1	R585	15	*pMS*	951.590538	270

Les paramètres présentés ont été calés avec le module d'optimisation (recuit-simulé) de « Mosicas » (Martiné, 2003). Or, ce module d'optimisation ne fournit qu'une estimation de l'erreur moyenne (rmse = *root mean square error*) par paramètre.

La figure 4.1 (cf. Chapitre 4B) représente l'évolution de ce taux de partition en fonction de l'âge thermique de la tige usinable TTMS pour 3 cultivars plantés dans 4 sites au cours de 2 cycles de culture consécutifs. La relation, de type asymptotique débute à l'apparition de la tige usinable *pMS*. A partir de ce stade, le taux de partition MS croît asymptotiquement, à une certaine vitesse *MSk*, vers un plateau *MSa* (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 3). Cette dernière valeur correspond à 0.75 g g^{-1} pour le cultivar R570 comme l'ont démontré Martiné et al., (1999) lors d'une précédente étude conduite sur l'île de Réunion.

Les valeurs des paramètres décris précédemment (*pMS*, *MSa* et *MSk*) sont regroupés dans le Tableau 5.3.

5.2.2.2. Partition de la biomasse aérienne vers la biomasse de feuilles mortes

Les suivis d'évolution de la biomasse aérienne (dAB) et de feuille morte (dTR) permettent, à chaque date d'échantillonnages, de déterminer le taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de feuille morte (TR).

La figure 4.1 (cf. Chapitre 4B) représente l'évolution de ce taux de partition en fonction de l'âge thermique de la plante pour 3 cultivars plantés dans 4 sites au cours de 2 cycles de culture consécutifs. La relation, de type asymptotique (Michaelis-Menten) débute dès l'apparition de biomasse aérienne *TRb*. A partir de là le taux de partition TR croît asymptotiquement pour atteindre un plateau *TRa* (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 5).

Les valeurs des paramètres décris précédemment (*TRa* et *TRb*) sont regroupés dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4 Estimation des paramètres utilisés dans la relation entre le taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de feuilles mortes TR (g g^{-1}) et l'âge thermique de la plante en base 12 TTAB (somme de degrés jour) ; TR = *TRa**TTAB/(*TRb*+ TTAB)

Cycle	**Cultivar**	**n**	**Paramètre**	**Valeur**	**Est. se**	**Mean rmse**
PC	R570	20	*TRa*	0.2753	0.09384	0.04065
PC	R570	20	*TRb*	3143.0	2703.0	
R1	R570	15	*TRa*	0.6611	0.3075	0.02449
R1	R570	15	*TRb*	9144.5	5798.8	
PC	R579	20	*TRa*	0.1415	0.03592	0.02782
PC	R579	20	*TRb*	1269.0	1473.0	
R1	R579	15	*TRa*	0.2984	0.09525	0.02426
R1	R579	15	*TRb*	3904.0	2239.0	
PC	R585	20	*TRa*	0.2356	0.07993	0.02759
PC	R585	20	*TRb*	4045.0	3022.0	
R1	R585	15	*TRa*	0.5257	0.4019	0.02872
R1	R585	15	*TRb*	9811.0	10050.0	

Est. se = erreur standard estimée ; Mean rmse (*root mean square error*).

5.2.3. Partition des composantes anatomiques vers la fibre

5.2.3.1. Partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre

Les suivis de l'évolution des biomasses de tiges usinables MS et de structures (fibre) de ces tiges dNDFMS permettent, à chaque date d'échantillonnage, de déterminer le taux de partition de la biomasse de tiges usinables en biomasse de fibre (NDFMS).

La figure 4.2 (Chapitre 4B) représente l'évolution de ce taux de partition en fonction de l'âge thermique de la tige usinable pour 3 cultivars plantés dans 4 sites au cours de 2 cycles de culture consécutifs. La relation entre le taux de partition NDFMS et l'âge thermique de la tige usinable est asymptotique et décroît asymptotiquement de *NDFMSb* dès l'apparition de la tige usinable (Martiné, 2003), à une vitesse *NDFMSk*, vers un plateau *NDFMSa* (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 7). Les premiers entrenœuds du méristème et ceux du haut de la tige usinable contiennent essentiellement des structures et très peu de « sucres », ainsi l'on considère qu'à l'apparition de la tige usinable NDFMS est approximativement égal à 1. Au fur et à mesure que les entrenœuds se remplissent de saccharose le NDFMS diminue et tend vers une valeur plateau (*NDFMSa*) fortement dépendante du génotype. Ce dernier paramètre a été fixé par Martiné, (2003) à 0.43 g g^{-1} pour le cultivar R570. Cependant, les valeurs calculées du paramètre *NDFMSa* (Tableau 5.5) sont inférieures. Une possible explication provient certainement du choix dans le dosage des fibres. Les structures dans le modèle initial représentent le « non sucre » soit la fibre et le brix moins le saccharose. Ces structures sont donc supérieures à la fibre réelle. Dans notre cas la méthode de dosage utilisée (Van Soest and Wine, 1967) permet d'accéder à la fibre « vraie ». D'autres méthodes de dosage de la fibre, cette fois indirectes existent, comme la méthode à la presse (Berding et al., 2010), mais surestiment systématiquement la teneur en fibre que nous obtenons. De plus, ces méthodes indirectes ne permettent de calculer que la teneur en fibre d'échantillons de bagasse et ne sont donc pas adaptée a toutes les composantes anatomiques de la canne à sucre, contrairement à la méthode que nous avons choisi.

Les données observées utilisées pour le calage des paramètres (*NDFMSa*, *NDFMSb* et *NDFMSk*) ont été confrontées aux données simulées par le nouveau module de partition inclus dans le modèle « Mosicas » (Figure 5.5).

Tableau 5.5 Estimation des paramètres utilisés dans la relation entre le taux de partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre NDFMS (g g^{-1}) et l'âge thermique de la tige usinable TTMS (somme de degrés jour) ;

NDFMS = *NDFMSa* + *NDFMSb**exp(-*NDFMSk**TTMS)

Cycle	Cultivar	n	Paramètre	Valeur	Est. se	Mean rmse
PC	R570	20	*NDFMSa*	0.3476741	0.0810551	
PC	R570	20	*NDFMSb*	0.2871615	0.0566462	0.02873
PC	R570	20	*NDFMSk*	0.0003296	0.0002122	
R1	R570	15	*NDFMSa*	0.3853644	0.0183877	
R1	R570	15	*NDFMSb*	0.3347337	0.0507072	0.01842
R1	R570	15	*NDFMSk*	0.3347337	0.0002765	
PC	R579	20	*NDFMSa*	0.3438909	0.0700170	
PC	R579	20	*NDFMSb*	0.2299496	0.0378468	0.02534
PC	R579	20	*NDFMSk*	0.0003335	0.0002789	
R1	R579	15	*NDFMSa*	0.3602423	0.0179629	
R1	R579	15	*NDFMSb*	0.3410659	0.0918050	0.01937
R1	R579	15	*NDFMSk*	0.0010250	0.0003645	
PC	R585	20	*NDFMSa*	0.3926925	0.1410249	
PC	R585	20	*NDFMSb*	0.2164622	0.0887329	0.03136
PC	R585	20	*NDFMSk*	0.0002573	0.0003744	
R1	R585	15	*NDFMSa*	0.421700	0.022406	
R1	R585	15	*NDFMSb*	0.416078	0.161930	0.02738
R1	R585	15	*NDFMSk*	0.001128	0.000491	

Est. se = erreur standard estimée ; Mean rmse (*root mean square error*).

5.2.3.2. Partition de la biomasse de feuilles mortes en biomasse de fibre

Les suivis de l'évolution des biomasses de feuille morte dTR et de structures (fibre) de ces feuilles dNDFTR permettent, à chaque date d'échantillonnage, de déterminer par dosage la fraction taux de biomasse de fibre dans la biomasse de feuille morte (*NDFTR*).

La figure 4.2 (Chapitre 4B) représente l'évolution de ce taux de partition en fonction de l'âge thermique de la plante TTAB pour 3 cultivars plantés dans 4 sites au cours de 2 cycles de culture consécutifs. La relation entre la biomasse de fibre de feuilles mortes dNDFTR et la biomasse de feuille morte dTR est linéaire et croît selon le coefficient directeur *NDFTR* (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 9).

Tableau 5.6 Estimation du paramètre utilisé dans la relation entre la biomasse de fibre de feuilles mortes dNDFTR (g m^{-2}) et la biomasse de feuille morte dTR (g m^{-2}) ;
dNDFTR = *NDFTR**dTR.

Cycle	Cultivar	n	Paramètre	Valeur	Est. se	Mean rmse
PC	R570	20	*NDFTR*	0.773582	0.005905	13
R1	R570	15	*NDFTR*	0.763645	0.004667	27
PC	R579	20	*NDFTR*	0.761343	0.005661	13
R1	R579	15	*NDFTR*	0.739161	0.005999	27
PC	R585	20	*NDFTR*	0.777186	0.004398	13
R1	R585	15	*NDFTR*	0.760159	0.004621	27

Est. se = erreur standard estimée ; Mean rmse (*root mean square error*).

Les Mean rmse concernent les masses dNDFTR (g m^{-2}) et non les fractions NDFTR

5.2.3.3. Partition de la biomasse aérienne en biomasse de fibre

Les suivis de l'évolution des biomasses aérienne dAB et de structures (fibre) de cette même biomasse dNDFAB permettent, entre deux dates d'échantillonnage, de déterminer le taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de fibre (NDFAB).

La relation entre le taux de partition NDFAB et l'âge thermique de la plante TTAB est asymptotique et décroît asymptotiquement de *NDFABb* à l'apparition de la biomasse aérienne, à une vitesse *NDFABk*, vers un plateau *NDFABa* (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 10). Comme pour la tige usinable, la dAB est considérée au départ comme étant constituée essentiellement de structures avec très peu de solubles. Ainsi, l'on considère que *NDFABb* est approximativement égal à 1 à l'apparition de la biomasse aérienne. Globalement, la relation suit celle décrite par le taux de partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre NDFMS. En effet, ceci s'explique par le fait que très tôt dans le cycle la biomasse de tige usinable MS représente la majeure partie de la biomasse aérienne dAB. Ainsi on obtient des évolutions parallèles de ces deux taux.

5.2.4. Partition de la biomasse de fibre vers les composantes lignocellulosiques

5.2.4.1. Partition de la biomasse de fibre en biomasse de lignine dans la tige usinable

Les suivis de l'évolution des biomasses de tiges usinables MS et de lignine des fibres de ces tiges dLIGNDFMS permettent, à chaque date d'échantillonnage, de déterminer le taux de partition de la biomasse de fibre des tiges usinables en biomasse de lignine (LIGNDFMS).

La figure 4.5 (cf. Chapitre 4B) représente l'évolution de ce taux de partition en fonction de l'âge thermique de la tige usinable pour 3 cultivars plantés dans 4 sites au cours de 2 cycles de culture consécutifs. La relation entre le taux de partition LIGNDFMS et l'âge thermique de la tige usinable est asymptotique. Elle croît asymptotiquement de *LIGNDFMSb* à l'apparition de la tige usinable, à une vitesse *LIGNDFMSk*, vers un plateau *LIGNDFMSa* (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 12). Les valeurs de ce dernier paramètre oscillent entre 0.10 et 0.14 g g^{-1}. A l'apparition de la tige usinable, le taux de lignine *LIGNDFMSb* est considéré comme nul car la fibre est essentiellement constituée par des holosides. Toutefois, ce dernier paramètre pourrait être modifié selon les données de Rae, (2008) sur le méristème ou le haut de la tige usinable.

Tableau 5.7 Estimation des paramètres utilisés dans la relation entre le taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de fibre NDFAB (g g^{-1}) et l'âge thermique de la plante en base 12 TTAB (somme de degrés jour) ;
NDFAB = *NDFABa* + *NDFABb**exp(-*NDFABk**TTAB).

Cycle	Cultivar	n	Paramètre	Valeur	Est. se	Mean rmse
PC	R570	20	*NDFABa*	0.4470691	0.0889253	
PC	R570	20	*NDFABb*	0.5625641	0.1371386	0.02788
PC	R570	20	*NDFABk*	0.0003087	0.0001976	
R1	R570	15	*NDFABa*	0.4881295	0.0303796	
R1	R570	15	*NDFABb*	0.6847375	0.2382063	0.01844
R1	R570	15	*NDFABk*	0.0007060	0.0002492	
PC	R579	20	*NDFABa*	0.4083408	0.0636123	
PC	R579	20	*NDFABb*	0.5910277	0.1652634	0.02525
PC	R579	20	*NDFABk*	0.0003503	0.0001824	
R1	R579	15	*NDFABa*	0.4425909	0.0220850	
R1	R579	15	*NDFABb*	0.8734364	0.3066060	0.01728
R1	R579	15	*NDFABk*	0.0008272	0.0002293	
PC	R585	20	*NDFABa*	0.4644875	0.0963687	
PC	R585	20	*NDFABb*	0.3985499	0.0995426	0.02559
PC	R585	20	*NDFABk*	0.0002827	0.0002473	
R1	R585	15	*NDFABa*	0.5046662	0.0177305	
R1	R585	15	*NDFABb*	0.8094075	0.3684107	0.01639
R1	R585	15	*NDFABk*	0.0009229	0.0002837	

Est. se = erreur standard estimée ; Mean rmse (*root mean square error*).

Tableau 5.8 Estimation des paramètres utilisés dans la relation entre le taux de partition de la biomasse de fibre de tige usinable en biomasse de lignine LIGNDFMS (g g^{-1}) et l'âge thermique de la tige usinable TTMS (somme de degrés jour) ;
LIGNDFMS = *LIGNDFMSa**exp(*LIGNDFMSb**(*LIGNDFMSk*^TTMS)).

Cycle	Cultivar	n	Paramètre	Valeur	Est. se	Mean rmse
PC	R570	20	*LIGNDFMSa*	0.1345841	0.0145332	0.008506
PC	R570	20	*LIGNDFMSb*	1.0816092	0.1375658	
PC	R570	20	*LIGNDFMSk*	0.9994926	0.0001881	
R1	R570	15	*LIGNDFMSa*	0.1194652	0.0033649	0.005418
R1	R570	15	*LIGNDFMSb*	1.4836632	0.3734791	
R1	R570	15	*LIGNDFMSk*	0.9984812	0.0003357	
PC	R579	20	*LIGNDFMSa*	0.121667	0.012802	0.006179
PC	R579	20	*LIGNDFMSb*	1.201617	0.176311	
PC	R579	20	*LIGNDFMSk*	0.999545	0.000165	
R1	R579	15	*LIGNDFMSa*	0.1047440	0.0027116	0.004567
R1	R579	15	*LIGNDFMSb*	2.1032896	0.6513357	
R1	R579	15	*LIGNDFMSk*	0.9984238	0.0003301	
PC	R585	20	*LIGNDFMSa*	0.1415088	0.0394157	0.00883
PC	R585	20	*LIGNDFMSb*	0.9655944	0.1486522	
PC	R585	20	*LIGNDFMSk*	0.9996901	0.0002444	
R1	R585	15	*LIGNDFMSa*	0.1113532	0.0039780	0.005726
R1	R585	15	*LIGNDFMSb*	1.1445599	0.5286164	
R1	R585	15	*LIGNDFMSk*	0.9986509	0.0005112	

Est. se = erreur standard estimée ; Mean rmse (*root mean square error*).

5.2.4.2. Partition de la biomasse de fibre en biomasse d'holocellulose dans la tige usinable

Le suivi de l'évolution de la biomasse de lignine dans la fibre de tige usinable (dLIGNDFMS) et de la biomasse de fibre de tige usinable dNDFMS permettent de déterminer par simple différence la biomasse d'holocellulose dans la fibre de tige usinable dHOLNDFMS (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 14).

5.2.4.3. Partition de la fibre vers la lignine dans les feuilles mortes

Les suivis de l'évolution des biomasses de fibre des feuilles mortes dNDFTR et de lignine dans la fibre de feuilles mortes dLIGNDFTR permettent, à chaque date d'échantillonnage, de déterminer par dosage la fraction de biomasse de lignine dans la biomasse de fibre de feuille morte (*LIGNDFTR*).

La figure 4.2 (Chapitre 4B) représente l'évolution de ce taux de partition en fonction de l'âge thermique de la plante TTAB pour 3 cultivars plantés dans 4 sites au cours de 2 cycles de culture consécutifs. La relation entre la biomasse de lignine dans fibre de feuilles mortes

dLIGNDFTR et la biomasse de fibre de feuille morte dNDFTR est linéaire et croît selon le coefficient directeur *LIGNDFTR* (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 15).

Tableau 5.9 Estimation du paramètre utilisé dans la relation entre la biomasse de lignine dans la fibre de feuille morte dLIGNDFTR (g m^{-2}) et la biomasse de fibre de feuille morte dNDFTR (g m^{-2}) ; dLIGNDFTR = *LIGNDFTR**dNDFTR.

Cycle	Cultivar	n	Paramètre	Valeur	Est. se	Mean rmse
PC	R570	20	*LIGNDFTR*	0.096615	0.001941	3.6
R1	R570	15	*LIGNDFTR*	0.09916	0.00213	6.9
PC	R579	20	*LIGNDFTR*	0.080908	0.001664	3.6
R1	R579	15	*LIGNDFTR*	0.084368	0.002106	6.9
PC	R585	20	*LIGNDFTR*	0.091972	0.001864	3.6
R1	R585	15	*LIGNDFTR*	0.096619	0.002082	6.9

Est. se = erreur standard estimée ; Mean rmse (*root mean square error*).

Les Mean rmse concernent les masses dLIGNDFTR (g m^{-2}) et non les fractions LIGNDFTR.

5.2.4.4. Partition de la fibre vers l'holocellulose dans les feuilles mortes

Comme pour la tige usinable, le suivi de l'évolution de la biomasse de lignine dans la fibre de feuille morte (dLIGNDFTR) et de la biomasse de fibre de feuille morte dNDFTR permettent de déterminer par simple différence la biomasse d'holocellulose dans la fibre de feuille morte dHOLNDFTR (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 16).

5.2.4.5. Partition de la fibre vers la lignine dans la biomasse aérienne

Les suivis de l'évolution des biomasses aérienne dAB et de lignine des fibres de cette même biomasse dLIGNDFAB permettent, à chaque date d'échantillonnage, de déterminer le taux de partition de la biomasse de fibre de biomasse aérienne en biomasse de lignine (LIGNDFAB).

La relation entre le taux de partition LIGNDFAB et l'âge thermique de la plante TTAB est asymptotique. Elle croît asymptotiquement de *LIGNDFABb* que l'on considère égal à 0 à l'apparition de la biomasse aérienne, à une vitesse *LIGNDFABk*, vers un plateau *LIGNDFABa* (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 17 et 18). Les valeurs de ce dernier paramètre oscillent entre 0.10 et 0.13 g g^{-1}, ce qui est très proche des valeurs de ce même paramètre mais pour la fibre de tige usinable.

5.2.4.6. Partition de la fibre vers l'holocellulose dans la biomasse aérienne

Comme précédemment pour la tige usinable, le suivi de l'évolution de la biomasse de lignine dans la fibre de biomasse aérienne (dLIGNDFAB) et de la biomasse de fibre de biomasse aérienne dNDFAB permettent de déterminer par simple différence la biomasse d'holocellulose dans la fibre de biomasse aérienne dHOLNDFAB (Chapitre 2, Tableau 2.1, éq. 19).

Tableau 5.10 Estimation des paramètres utilisés dans la relation entre le taux de partition de la biomasse de fibre de biomasse aérienne en biomasse de lignine LIGNDFMS (g g^{-1}) et l'âge thermique de la plante TTAB(somme de degrés jour) ; LIGNDFAB= *LIGNDFABa**exp(-*LIGNDFABb**(*LIGNDFABk*^TTAB)).

Cycle	Cultivar	n	Paramètre	Valeur	Est. se	Mean rmse
PC	R570	20	*LIGNDFABa*	0.1167527	0.0136445	0.008446
PC	R570	20	*LIGNDFABb*	2.6194063	1.4831851	
PC	R570	20	*LIGNDFABk*	0.9994879	0.0002366	
R1	R570	15	*LIGNDFABa*	0.131092	0.016006	0.003344
R1	R570	15	*LIGNDFABb*	1.401548	0.219634	
R1	R570	15	*LIGNDFABk*	0.999544	0.000167	
PC	R579	20	*LIGNDFABa*	0.1047271	0.0092120	0.005755
PC	R579	20	*LIGNDFABb*	2.5465996	1.1152534	
PC	R579	20	*LIGNDFABk*	0.9994873	0.0001834	
R1	R579	15	*LIGNDFABa*	0.1046370	0.0034452	0.00182
R1	R579	15	*LIGNDFABb*	2.1358259	0.3409031	
R1	R579	15	*LIGNDFABk*	0.9992711	0.0001031	
PC	R585	20	*LIGNDFABa*	0.1162376	0.0130177	0.006233
PC	R585	20	*LIGNDFABb*	1.7649996	0.7775676	
PC	R585	20	*LIGNDFABk*	0.9995615	0.0002075	
R1	R585	15	*LIGNDFABa*	0.1150214	0.0108747	0.003591
R1	R585	15	*LIGNDFABb*	1.1759743	0.3401561	
R1	R585	15	*LIGNDFABk*	0.9994486	0.0002419	

Est. se = erreur standard estimée ; Mean rmse (*root mean square error*).

5.3. CALAGE DU NOUVEAU MODULE DE PARTITION INCLUT DANS LE MODÈLE « MOSICAS »

Les données simulées en sortie du nouveau module de partition présenté précédemment ont été confrontées aux données qui ont servies au calage du nouveau module (Figure 5.3). Les valeurs statistiques présentées (moyenne, rmse et CV%) sont globales et sont calculées pour tous cycles, sites, cultivars et âges confondus (Tableau 5.11).

Tableau 5.11 Valeurs statistiques (rmsec = *root mean square error of calibration* et CV% = coefficient de variation en % du rmsec par rapport à la moyenne) des données de calage des variables d'état du couvert du nouveau module de partition du modèle « Mosicas ».

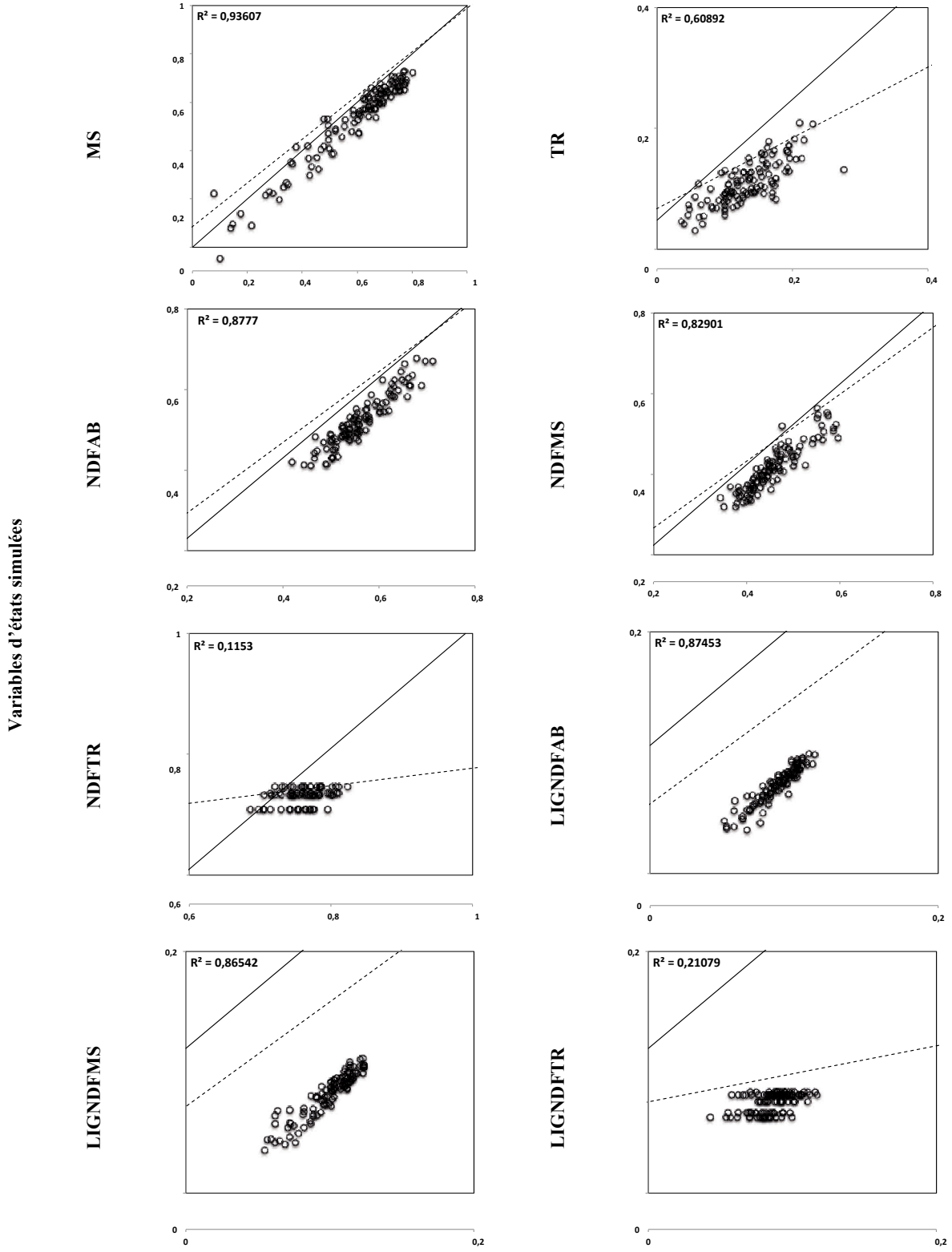
Variable d'état	Définition	Moyenne	rmsec	CV%
MS	Taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable	0.573	0.0411	7.2
TR	Taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de feuille morte	0.132	0.0411	21.2
NDFAB	Taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de fibre	0.559	0.0209	3.7
NDFMS	Taux de partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre	0.455	0.0237	5.2
NDFTR	Taux de partition de la biomasse de feuille morte en biomasse de fibre	0.762	0.0269	3.5
LIGNDFAB	Taux de partition de la biomasse de fibre de la biomasse aérienne en biomasse de lignine	0.088	0.0051	5.8
LIGNDFMS	Taux de partition de la biomasse de fibre de tige usinable en biomasse de lignine	0.097	0.0063	6.5
LIGNDFTR	Taux de partition de la biomasse de fibre de feuille morte en biomasse de lignine	0.085	0.013	15.3

Les graphiques de corrélation entre les variables d'états observées et simulées (Figure 5.3) révèlent des défauts dans notre approche de formalisation. En effet, les NDFTR et LIGNDFTR simulés sont très faiblement corrélés avec les valeurs observées (coefficient de détermination $R^2 = 0.12$ et 0.21 respectivement).

En ce qui concerne les autres variables d'états (MS, TR, NDFAB, NDFMS, LIGNDFAB et LIGNDFMS) le calage est globalement concluant. On observe (Figure 5.3) un haut niveau de corrélation entre les données simulées et observées avec des coefficients de détermination élevés ($R^2 < 0.82$) excepté pour TR ($R^2 = 0.61$).

Le formalisme décrivant les TR, NDFTR et LIGNDFTR est donc à revoir.

Figure 5.3 Graphiques de corrélation entre en ordonnée les données correspondant aux variables d'états observées dans nos essais et en abscisse les données correspondant aux variables d'états simulées en sortie du nouveau module de partition inclus dans le modèle « Mosicas ».



5B. VALIDATION DU NOUVEAU MODULE DE PARTITION DE LA BIOMASSE AÉRIENNE SUR UN JEU DE DONNÉES INDÉPENDANT

Si l'étape de validation avait été prévu dès le départ nous aurions pu procédé à une validation croisée de type « *boot-strap* ». Cette méthode nous aurait permis de calibrer notre module de partition sur un jeu de données provenant seulement de trois de nos sites et d'utiliser les données observées sur le quatrième site comme jeu de données de validation. En répétant l'opération sur des combinaisons de 3 sites en calibration et 1 site en validation nous aurions pu obtenir des résultats de validation plus solide. Cependant, cette méthode de validation croisée n'aurait été applicable que pour le cycle de vierge puisque nous n'avons que trois sites en repousse. A ce stade on peut se s'interroger sur la quantité de points nécessaire pour réaliser une calibration de poids ou encore sur l'intégration d'une variabilité suffisante, etc…

5.4. VALIDATION DU NOUVEAU MODULE DE PARTITION DE LA BIOMASSE AÉRIENNE SUR UN JEU DE DONNÉES INDÉPENDANT

Les données utilisées pour la validation de notre module de partition proviennent d'expérimentations initiées depuis 2011 et conduites par le Cirad en Guadeloupe. Ces expérimentations sont réalisées dans le cadre d'un projet (Rebecca) visant à décontaminer des sols pollués à la chloredécone à l'aide de variétés de canne fibreuse non destiné à l'alimentation humaine mais pour être valoriser pour la production d'énergie. Le lancement des expérimentations étant récent nous ne disposons que de deux points de comparaison, pour valider notre module de partition. Ces deux point de données correspondant à des échantillonnages réalisés sur 2 cultivars (R570 et R579) à une même date (Tableau 5.12).

5.4.1. Estimation de la biomasse aérienne (dAB)

On observe une surestimation systématique des biomasses aériennes observées de 30 et 39%pour les cultivars R570 et R579 respectivement. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces observations. Les données climatiques peuvent être à l'origine de cette surestimation. Des températures moyennes journalières ou des niveaux de satisfaction hydrique plus faibles que ceux mesurés par une station météorologique peuvent être la cause d'une surestimation de la biomasse aérienne par le modèle. Le mode de prélèvement de la biomasse est aussi une source potentielle d'erreur. En effet, si les échantillonnages de biomasse réalisés au champ ne contiennent pas la totalité de la biomasse produite par la culture sur la surface récoltée

notamment la part de la biomasse au sol, cela engendre une sous-estimation de la biomasse aérienne observée. De faibles densités de tiges observées dus semble-t-il à un faible taux de germination de boutures de mauvaise qualité (communication personnelle) ou à un taux de mortalité élevé après le pic de tallage, pourraient également expliquer une sous-estimation de la biomasse aérienne observée.

Tableau 5.12 Comparaison entre les données observées dans nos essais et les données de validation observées en Guadeloupe sur deux cultivars R570 et R579.

Cultivar	**R570**			**R579**		
Variable d'état	**Observé**	**Simulé**	**Est.%**	**Observé**	**Simulé**	**Est.%**
dAB	3370	5742	+ 30%	3520	5656	+ 39%
dMS	2150	3368	+ 43%	2360	3668	+ 45%
dTR	370	-		310	-	
MS	0,64	0,59	- 8%	0,67	0,65	- 3%
NDFMS	0,53	0,48	- 11%	0,48	0,45	- 7%
NDFAB	0,61	-		0,56	-	
LIGNDFMS	0,11	-		0,10	-	
LIGNDFAB	0,11	-		0,10	-	

5.4.2. Estimation du taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable (MS)

On observe une sous-estimation systématique des taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable,mais toutefois faible, de 8 et 3% pour les cultivars R570 et R579 respectivement. La faible erreur sur l'estimation de ce taux est le reflet de la robustesse de notre modèle mais également de l'absence d'interaction entre génotype et environnement pour le processus de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable.

5.4.3. Estimation de la biomasse de tige usinable (MS)

On observe une surestimation systématique des biomasses de tiges usinables observées de 43 et 45% pour les cultivars R570 et R579 respectivement. Cette surestimation est conséquente et est premièrement attribuable à la surestimation de la dAB puisque le MS est correctement simulé. L'estimation de l'âge thermique de la tige usinable *pMS* est également très lourde de conséquences quant à l'estimation de la MS. Ce dernier paramètre est en effet très variable et fortement dépendant de l'histoire climatique de la parcelle depuis la plantation jusqu'à l'apparition de la tige usinable donc de paramètres climatiques (stress, températures

seuils,…). Les aspects thermique (durée jusqu'à la levée et l'apparition de la tige usinable) et hydrique sur le LAI (*leaf aera index*) après apparition sont intégrées à la version du modèle utilisée toutefois, l'aspect hydrique sur la levée ne l'est pas. Le paramètre *pMS* correspond au temps thermique atteint lorsqu'une quantité de biomasse de 425 g m^{-2} a été formée (Martiné, 2003) et détermine l'apparition de la tige usinable. Donc si la biomasse aérienne est surestimée, l'âge thermique l'est également ce qui conduit à une surestimation de la biomasse de tige usinable.

5.4.4. Estimation du taux de partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre (NDFMS)

On observe une sous-estimation systématique des taux de partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre de 11 et 7% pour les cultivars R570 et R579 respectivement. La fraction de fibre des tiges usinable est une valeur mesurée selon un protocole analytique qui comporte plusieurs variantes selon les caractéristiques physico-chimique de la matrice à analyser. Cependant, le protocole utilisé pour déterminer la fraction de fibre des tiges usinable à la Guadeloupe est théoriquement identique au notre. Toutefois, l'analyse peut également être assortie d'un effet opérateur difficilement quantifiable. La cause la plus probable pour expliquer la sous-estimation de ce taux serait la résultante de la surestimation de la biomasse aérienne. En effet, la biomasse aérienne conditionne l'apparition de la tige usinable et donc l'âge thermique de celle-ci. La relation qui existe entre le taux de partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre et l'âge thermique de la tige usinable TTMS est asymptotique et décroissante. Ainsi,en surestimant l'âge thermique de la tige usinable, on tend vers la valeur du paramètre *NDFMSa* (asymptote) et ceci aura donc pour effet de sous-estimer le taux de partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre.

Les taux de partition de la biomasse aérienne étant faiblement sensible aux interactions GE, l'estimation de la biomasse aérienne dAB apparaît être un facteur clé pour la bonne estimation des biomasses des différentes composantes qui la constitue. Le modèle est peut être dans ce cas non adapté aux conditions climatiques de la Guadeloupe et décrirait mal les processus d'interception et de conversion du rayonnement en biomasse pour un cycle de vierge. Il apparaît encore différentes hypothèses qui restent en suspend et qui seront discutées dans le chapitre suivant.

DISCUSSION GÉNÉRALE, CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

6.1. RAPPELS : CADRE ET OBJECTIFS DE LA THÈSE

Les problématiques environnementales (réchauffement climatique, émissions de GES,…) en liens avec la consommation de ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz,…) impliquent, dans le cadre de la production d'énergie, de biomatériaux et de biomolécules, d'identifier de nouvelles sources renouvelables pouvant s'y substituer. La canne à sucre, de part la considérable augmentation de sa production et les caractéristiques agronomiques qu'elle présente, apporte des éléments de réponse concrets à ces nouveaux enjeux.

La canne à sucre présente cependant un point de divergence majeur avec les cultures dédiées à un seul usage. Si la valorisation des coproduits issus de la filière sucrière (bagasse, résidus de récolte,…) comme source d'énergie renouvelable et de bioproduits c'est accrue ces dernières années, la canne à sucre reste principalement cultivée pour la production de sucre. Les systèmes de cultures canniers sont de fait exclusivement optimisés pour répondre aux objectifs de production fixés par la filière sucrière. La modification des systèmes de culture est donc nécessaire si l'on veut dans l'avenir répondre à de nouveaux objectifs de production visant de multiples usages (sucre/énergie).

La combustion est le procédé majoritairement employé pour la valorisation énergétique de la bagasse mais aussi celui pressenti à court terme pour valoriser d'autres coproduits fibreux issus de la filière sucrière, notamment la biomasse résiduelle.

Dans cette optique, la définition des variables constitutives du rendement énergétique de la biomasse de canne à sucre a été l'étape préliminaire à l'élaboration de nos objectifs. Les objectifs de cette thèse concernaient (i) la mise au point d'une méthode d'analyse indirecte, par spectrométrie de réflexion dans le proche infrarouge (SPIR), pour doser les variables constitutives du rendement énergétique de la biomasse de canne à sucre (Chapitre 3), (ii) l'estimation du potentiel énergétique de la production sous l'effet de facteurs de variations agro-climatiques à la récolte (Chapitre 4A), (iii) la description et l'explication de l'évolution au cours du cycle de culture des dynamiques de chacune des variables constitutives du rendement énergétique et du rendement sucrier de la biomasse de canne à sucre sous l'effet de facteurs de variations agro-climatiques (Chapitre 4B) et (iv) la formalisation et la validation des dynamiques d'évolution des variables constitutives du rendement énergétique de la biomasse de canne à sucre au cours du cycle de culture en un modèle prédictif (Chapitre 5).

6.2. ACQUIS, LIMITES ET PERSPECTIVES RELATIFS À CES TRAVAUX

6.2.1. La granulométrie des échantillons à prédire a t'elle un effet sur les capacités prédictives d'un modèle PIR ?

Des ajustements méthodologiques concernant la taille des particules de nos échantillons ont du être réalisés avant de pouvoir les doser efficacement. En effet, **la taille et la répartition des particules d'échantillons pulvérulents font variées leur intensité spectrale**. Deux échantillons identiques sous deux états granulométriques ont des spectres de réflexion identiques dans leur forme mais dont l'intensité en ordonnée (log 1/Réflectance) est différente pour une même longueur d'onde en abscisse (nm). Cette différence de réflectance génère une augmentation des erreurs de prédiction.

6.2.1.1. L'inclusion de variabilité granulométrique dans une base de calibration améliore-t-elle le pouvoir prédictif d'un modèle ?

Une des premières méthodes pour améliorer le pouvoir prédictif d'un modèle PIR réside en l'inclusion de la variabilité liée à la granulométrie dans la base de calibration. Cette méthode nécessite de broyer un même échantillon selon différentes tailles granulométriques et d'utiliser une partie des spectres voire la totalité dans la base de calibration. Les données de références affectées aux échantillons de tailles granulométriques différentes sont identiques et cela permet donc de considérer la réponse d'intensité spectrale de l'échantillon comme un paramètre de calage. Cette pratique à pour effet de **diminuer l'erreur de prédiction d'un modèle PIR lorsque les échantillons à prédire**, pour des raisons pratiques et de gain de temps, ont une taille granulométrique différente de celle imposée par la méthode de référence utilisée. Toutefois, notre étude n'a permis de valider notre méthode de calibration que sur des échantillons dont la gamme de variation granulométrique était comprise entre 160 µm et 2mm. Or, nous ne savons pas si la méthode présentée reste valide en dehors de cette gamme de variation. Des travaux doivent donc être initiés dans ce sens avec pour finalité de réduire au maximum le temps de broyage et d'éviter la multiplication des étapes de broyage toujours fastidieuses et couteuse en temps et main d'œuvre.

6.2.1.2. Peut-on prédire la composition chimique d'échantillons de granulométrie grossière à partir d'un modèle de prédiction PIR ayant été calibré avec des valeurs de référence acquises sur des échantillons de granulométrie fine ?

Dans cette étude, plus de 2000 échantillons ont été broyés à une taille granulométrique de 2 mm pour être par la suite prédis par SPIR. Or, seulement 228 échantillons ont été broyés à une taille granulométrique de 1 mm pour les contraintes d'extraction des composés chimique liées la méthode de référence choisie. Il était donc inconcevable de devoir broyer l'ensemble des échantillons à 1 mm sachant que le broyeur utilisé était peu pratique et donc chronophage. L'optimisation de la méthode de calibration qui consiste à combiner un traitement mathématique et un jeu de données de calibration intégrant le maximum de variabilité granulométrique nous a permis de prédire des échantillons de taille granulométrique différente de celle imposée par la méthode de référence choisie. Ces ajustements sont pérennes et **la méthode d'optimisation de la calibration développée peut être utilisée dans le cadre de la construction de nouveaux modèles de prédiction PIR ou de l'amélioration de modèles PIR existant**. Le traitement des échantillons avant leur analyse est une opération chronophage qui nécessite appareillage et main d'œuvre. La réduction de ces impondérables est un réel avantage pour une méthode d'analyse et d'un réel intérêt pratique et financier pour l'industrie ou la recherche. Cependant, l'application de cette méthode d'optimisation sur des matrices présentant une gamme de variation granulométrique supérieure à celle testée dans notre étude reste à approfondir. Le dosage de composantes d'intérêts dans des matrices produites par l'industrie et n'ayant subit qu'un broyage très grossier est un enjeu particulier dans l'hypothèse de l'utilisation de l'outil SPIR comme méthode de caractérisation en ligne sur une chaîne de production industrielle.

6.2.2. Mise au point d'un modèle PIR de prédiction des variables constitutives du rendement énergétique d'échantillons de biomasse de canne à sucre : validation croisée classique *vs.* indépendante

6.2.2.1. La méthode de validation classique d'un modèle PIR de prédiction engendre t'elle une surestimation de son pouvoir prédictif ?

Le développement de notre modèle PIR a permis de mettre en lumière des faiblesses concernant la méthode classique de validation d'un modèle de prédiction PIR. Le jeu de données de référence dont dispose un spectroscopiste pour développer un modèle de prédiction PIR est par convention divisée en deux parties, l'une servant à la calibration et l'autre à la validation (3/4 et ¼ des données de référence respectivement). Dans la majeure

partie des cas, les échantillons qui constituent un jeu de données de référence ont des provenances géographiques multiples ceci dans le but d'accroître la variabilité d'une population d'échantillons. Cependant, là encore dans la majeure partie des cas, la division du jeu de données de référence est faite de manière aléatoire et la majeure partie des études concernant la mise au point de modèle de prédiction PIR ne tiennent pas compte de l'origine géographique des échantillons. Or, il s'avère que cette **méthode de validation classique génère une surestimation du pouvoir prédictif d'un modèle de prédiction PIR**. Nous avons donc développé une méthode de validation croisée qui tient compte de la provenance de échantillons. Cette remarque a un moindre intérêt dans le cadre d'une utilisation qualitative des modèles de prédiction PIR (discrimination ou classement d'échantillons) mais elle devient très importante si l'on décide de caractériser les composantes d'un échantillon de manière quantitative. Dans notre cas, le modèle de prédiction PIR a été clairement utilisé pour quantifier les variables constitutives du rendement énergétique d'échantillons de biomasse de canne à sucre, ce qui justifie notre démarche.

6.2.2.2. Peut-on utiliser les prédictions issues d'un modèle de prédiction PIR comme entrée d'un modèle écophysiologique de croissance de la canne à sucre ?

Un des buts poursuivi, dans la mise au point d'un modèle PIR de prédiction par tout spectroscopiste, est la diminution de l'erreur de prédiction ou du moins qu'elle soit le plus proche possible de l'erreur standard de laboratoire. Les applications de notre modèle PIR étant exclusivement tournées vers la quantification des variables constitutives du rendement énergétique il apparaît essentiel d'être fixé sur les réelles capacités prédictives de notre outil d'analyse. Il s'avère que **les performances de notre modèle de prédiction PIR sont bonnes comparativement à d'autres modèles PIR développée sur d'autres plantes proches** (maïs, *miscanthus*,…). Une amélioration est toutefois toujours possible, surtout si l'on envisage d'utiliser ce modèle de prédiction PIR pour de l'analyse en routine. L'inclusion de nouveaux échantillons dans notre base de données est une priorité pour affiner les prédictions et entretenir l'efficacité du modèle sur le long terme.

L'utilisation de cet outil pour les besoins de la recherche est une première raison pour alimenter sa base de calibration. L'élargissement de son domaine d'application en est une autre. Au vu des nouveaux enjeux qui se dessinent en matière de politique énergétique et des projets initiés à la Réunion et dans d'autres pays ce genre d'outils d'analyse est incontournable. D'une part pour des raisons purement environnementales, les territoires insulaires étant par définition contraint dans l'espace, le retraitement des déchets est un

problème récurent. **La SPIR est une technique qui permet de limiter l'usage de produits chimiques polluants**. Et d'autre part pour des raisons économiques car la SPIR permet un **gain de temps considérable et un coût analytique faible**. Enfin, c'est son utilisation à l'échelle industrielle qui est envisageable. La sucrerie du Gol située dans le sud de l'île de la Réunion utilise déjà l'outil SPIR comme méthode de caractérisation de la taille granulométrique des cristaux de sucre. Dans un avenir proche on peut tout à fait imaginer, comme c'est le cas dans d'autre pays (Australie, Afrique du sud,…), que la SPIR soit utilisée pour déterminer la valeur marchande des chargements de canne à sucre et en ligne dans les sucreries pour ajuster le procédé d'extraction du sucre en temps réel. A plus long terme on peut également imaginer que la SPIR soit utilisée comme outils de caractérisation de la composition chimique de matières premières (bagasse, et biomasse résiduelle de canne) entrant dans les industries de valorisation pour là aussi en établir le paiement et au niveau de la chaîne de production pour ajuster les procédés de transformation.

6.2.3. Modalités et déterminisme de la répartition des variables constitutives du rendement sous l'effet de facteurs de variation agro-climatiques

La prédiction par SPIR des variables constitutives du rendement énergétique d'échantillons de biomasse de canne à sucre nous a permis de mener notre étude sur l'effet de facteurs de variations agro-climatiques sur ces mêmes variables et les rendements énergétique et sucrier à la récolte et au cours du cycle de culture de 3 cultivars commerciaux de canne à sucre. Dans le but premier de vérifier la variabilité des résultats expérimentaux et pour les besoins de la modélisation, nous avons choisi des environnements contrastés en termes de profils climatiques (température, rayonnement et pluviométrie) et de pratiques (irrigation, date de coupe et date de plantation) afin de maximiser autant que possible la variabilité de notre échantillonnage ainsi que le domaine d'application du modèle.

Ce choix malgré son bien fondé (parcelles en production), rend complexe l'interprétation de l'effet des différents facteurs de variation agissant sur les variables constitutives du rendement énergétique et ce pour plusieurs raisons :

- Des traitements plus marqués en terme de régime hydrique (irrigué *vs*. non irrigué) et de températures (haut *vs*. bas) présent sur deux sites uniquement aurait été possibles avec les mêmes surfaces plantées. Les effets respectifs liés aux deux facteurs (température et

régime hydrique) auraient pu être mis en évidence plus facilement si ces deux facteurs avaient pu être testés simultanément mais indépendamment l'un de l'autre.

- La comparaison d'un plus grand nombre de cultivars très contrastés, notamment concernant leur rendement en fibre voire même des génotypes sauvages, nous aurait permis d'avoir une idée du comportement de génotypes non sélectionnés pour le sucre. L'absence de plateforme expérimentale, de matériel végétal disponible et la complexité d'introduction de variétés ou de cultivars indigènes ne nous ont pas permis de tester un plus grand nombre de génotypes. Toutefois, dans le cadre d'un projet nommé « canne fibre » initié par la région Réunion avec le Cirad, l'introduction de cultivars très fibreux sélectionnés aux Barbades est normalement prévue.
- La réalisation d'échantillonnages peut être plus tard notamment dans les hauts mais également plus tôt dans le cycle afin d'affiner le formalisme des variables constitutives du rendement énergétique est une nécessité. Cette étude étant réalisée en collaboration avec un centre d'expérimentation s'intéressant à l'évolution des caractéristiques qualitatives du jus de canne à sucre au cours du cycle les échantillons ont été prélevés à des âges suffisamment avancé dans le cycle pour avoir 1 kg de pulpe (nécessaire pour protocole d'extraction du jus. cf. Chapitre 2, Figure 2.7) ce qui correspond à environ 2 kg de tige usinable fraîche. Trop tôt dans le cycle la biomasse n'est pas suffisante et les surfaces a échantillonner aurait été trop conséquentes. Plus tard dans le cycle la contrainte provient cette fois de la filière sucrière car les parcelles étant conduites en production elles sont récoltées pendant la campagne sucrière (juin à décembre) puisqu'elles génèrent un retour sur investissement et les usiniers rémunèrent pour le sucre produit.
- Une **partition de la biomasse aérienne en composantes anatomiques plus simple** et tenant compte des sorties utiles en modélisation. La tige usinable est clairement la composante anatomique à privilégier tant que les objectifs de production seront tournés vers le rendement en sucre. Toutefois, si les objectifs de production changent et qu'il faille les orienter vers une maximisation commune des rendements énergétique et sucrier alors une partition tige usinable et biomasse résiduelle est suffisante. Cependant, **si les objectifs de production sont à terme orientés, en plus des usages sucre/énergie, vers d'autres usages biomatériaux et biomolécules, une partition fine donnant les qualités respectives de chacune des composantes anatomiques est nécessaire**.

6.2.3.1. Qu'elle est à la récolte pour chaque composante anatomique la variabilité de répartition des variables constitutives du rendement énergétique ?

La tige usinable est la composante anatomique majeure et représente 61,5 à 75,6% de la biomasse aérienne à la récolte (Chapitre 4A, Tableau 4.3). **Les feuilles mortes représentent la seconde composante anatomique la plus abondante** avec 11,4 et 19,9% de la biomasse aérienne à la récolte. La composante anatomique qui présente la plus forte variabilité par rapport à sa proportion moyenne à la récolte est la gaine verte, certainement à cause de sa faible proportion par rapport à la biomasse aérienne.

Les teneurs en fibre sont fortement variables entre les composantes anatomiques à la récolte. Les feuilles mortes présentent la plus haute teneur en fibre, avec 72,2 à 79,1% de sa matière sèche (Chapitre 4A, Tableau 4.4). Cette forte teneur en fibre s'explique par une faible teneur en eau et en composés métaboliques remobilisés durant le phénomène de sénescence. La gaine présente également une forte teneur en fibre. Sa fonction physiologique première étant la conduction, elle est principalement constituée de faisceaux fibro-vasculaires eux même principaux constituants de la fibre. La tige usinable a la plus faible teneur en fibre avec 37,6 à 45,0% de sa matière sèche (Chapitre 4A, Tableau 4.4). La tige usinable étant l'organe de stockage de la canne à sucre une grande partie de sa matière sèche (souvent plus de 50%) est constituée de sucres.

Les teneurs en composantes lignocellulosiques des fibres présentent une faible variabilité entre les différentes composantes anatomiques à la récolte. **Les limbes ont la plus forte teneur en hémicellulose** avec 47,2 à 50,2%de sa matière sèche de fibres (Burner et al., 2008) et **la tige usinable la plus faible** avec 37,1 à 41,6% de sa matière sèche de fibres (Chapitre 4A, Tableau 4.5). **La cellulose est la composante lignocellulosique qui est la moins variable entre les composantes anatomiques**. La tige usinable présente la plus forte teneur en cellulose avec 47,8 à 51,4%de sa matière sèche de fibres (Chapitre 4A, Tableau 4.6). Les autres composantes anatomiques ont des teneurs en cellulose identiques avec des valeurs qui sont comprises entre 42,8 à 48,5% de leurs matières sèches de fibres (Chapitre 4A, Tableau 4.6). **La lignine est la composante lignocellulosique la plus variable entre composantes anatomiques**. **La tige usinable présente la plus forte teneur en lignine** avec 10,6 à 12,4% de sa matière sèche de fibres (Chapitre 4A, Tableau 4.7). Ceci s'explique par ses fonctions physiologiques de soutien. **Les méristèmes et les limbes présentent les teneurs les plus faibles en lignine** avec 5,5 à 8,9% de leurs matières sèches de fibres (Chapitre 4A, Tableau 4.7).

Le pouvoir calorifique inférieur (LHV = *Low Heating Value*) **est peu variable entre les composantes anatomiques** (Chapitre 4A, Tableau 4.8). La tige usinable présente les LHV les plus élevés avec 17,630 à 17,687 MJ kg^{-1} et les méristèmes et les limbes les plus faibles avec 17,184 à 17,483 MJ kg^{-1} (Chapitre 4A, Tableau 4.8). Ces différences déjà remarquées par Don et al. (1977) sont directement liées à leurs teneurs respectives en lignine car c'est le composé lignocellulosique qui a le LHV le plus élevé (proche de celui du charbon environ 26 MJ kg^{-1}).

6.2.3.2. Qu'elle est l'influence des sites, cultivars et modes de coupe sur cette variabilité de répartition et sur le rendement énergétique de la production ?

A la récolte, la partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable ne présente pas de différences significatives entre sites (Martiné et al., 1999) et il en est de même pour les feuilles mortes (Chapitre 4A, Tableau 4.3). La partition de la biomasse vers les autres composantes anatomiques (méristème, limbe et gaine) est plus sensible aux variations climatiques et de pratiques (stress thermique et hydrique) car elle présente des différences significatives entre sites à la récolte (Chapitre 4A, Tableau 4.3). Des températures seuils de croissance plus élevées et une réponse plus marquée aux stress peuvent expliquer ces différences.

La partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable, méristème et feuilles mortes présente des différences significatives entre cultivars à la récolte (Chapitre 4A, Tableau 4.3). Pour la tige usinable le caractère génotypique est bien connu et résulte de l'aptitude d'un cultivar à stocker du sucre durant la phase de maturation lorsque la croissance est ralentie. Pour le méristème, le diamètre des tiges qui un caractère génotypique peut expliquer ces différences, le niveau d'hydratation des tissus est une autre possibilité. Pour les feuilles mortes, la faculté d'adaptation de la plante en réponse à un stress hydriques par sénescence des feuilles, est un caractère génotypique. La partition de la biomasse aérienne en biomasse de feuilles vertes (limbes et gaines) ne présente pas de différences significatives entre cultivars (Chapitre 4A, Tableau 4.3).

La partition de la biomasse des composantes anatomiques en biomasse de fibres présente des différences significatives entre sites et cultivars à la récolte. Le stress hydrique est un facteur déterminant qui a pour effet de diminuer la partition des composantes anatomiques vers la fibre. Le phénomène a été largement décrit pour la tige usinable (Inman-Bamber et al., 2008) mais il semble que ce soit également le cas pour les autres composantes anatomiques (Chapitre 4A, Tableau 4.4). Du reste, le choix du génotype n'est pas à négliger

car on notera que le caractère fibreux, certes plus marqué sur tige usinable, est aussi significativement différent entre cultivars pour les autres composantes anatomiques.

La partition de la biomasse de fibre des composantes anatomiques en biomasse de **composantes lignocellulosiques présente des différences significatives entre sites et cultivars à la récolte**. Des observations contradictoires entre cycles de culture, sites et des évolutions parfois erratiques ne permettent pas d'identifier clairement l'effet de stress sur la partition de la biomasse de fibre des composantes anatomiques en biomasse de composantes lignocellulosiques.

Pour la teneur en hémicellulose des fibres des différentes composantes anatomiques on note une très faible variabilité entre sites et cultivars. Cependant, on remarque que le cultivar R579 présente les plus fortes teneurs d'hémicellulose notamment au niveau des fibres de tige usinable (Chapitre 4A, Tableau 4.5). L'hypothèse explicative la plus plausible est que ce cultivars ayant des caractéristiques sucrières avérées, **l'orientation préférentielle de son métabolisme vers le stockage de sucres favoriserait par la même la synthèse d'hémicellulose** cytoplasmique et donc augmenterait la fraction hémicellulosique des parois cellulaires. On notera également une plus forte teneur moyenne en hémicellulose des fibres de tige usinable pour le site de Etang Salé ; ce qui confirmerait que le stockage du sucre favoriserait l'accumulation préférentielle d'hémicellulose dans les fibres (Chapitre 4A, Tableau 4.5).

Pour la teneur en cellulose des fibres des différentes composantes anatomiques on note une très faible variabilité entre sites et cultivars. Toutefois, le site de La Mare (pas de stress hydrique) présente des teneurs plus élevés en cellulose pour les fibres de tige usinable (Chapitre 4A, Tableau 4.6). Des **conditions de croissance optimales** favoriseraient la multiplication et la croissance cellulaire (jeunes cellules) et **orienterait donc la partition de la fibre préférentiellement vers la synthèse de cellulose** car c'est le premier composé lignocellulosique synthétisé durant la formation de nouvelles parois cellulaires mais également pendant la croissance cellulaire.

Pour la teneur en lignine des fibres des différentes composantes anatomiques on note une très faible variabilité entre sites et cultivars. On ne remarque pas d'effet pouvant être attribué à des stress. Cependant, le cultivar R570 présente des teneurs en lignine au niveau des fibres de la tige usinable supérieures en moyenne aux autres cultivars (Chapitre 4A, Tableau 4.7).

Malgré des différences significatives entre sites et cultivars les LHV **des différentes composantes anatomiques présentent une très faible variabilité** (Chapitre 4A, Tableau 4.8). Ceci signifie que parmi les variables constitutives du rendement énergétique les variables qualitatives (teneurs des fibres en hémicellulose, cellulose et lignine) n'ont pas d'effet majeur sur le pouvoir calorifique de la production. **Les variables quantitatives** (biomasse aérienne, partition en biomasse de composantes anatomiques et de fibres) **sont donc les principales sources de variations potentielles du rendement énergétique d'une production**.

Le choix du mode de coupe est un critère essentiel pour maximiser le rendement énergétique d'une production. L'exportation d'une plus grande quantité de biomasse de la parcelle a peu d'effet sur le pouvoir calorifique de la production mais a un impact considérable sur le rendement énergétique de la production. Si l'on examine la variabilité générée a tous les niveaux de partition détaillés précédemment entre une récolte manuelle (Millable stalk = tige usinable) et une récolte mécanique en canne entière (Whole green cane = biomasse aérienne – feuilles mortes) alors on s'aperçoit que seule la proportion de biomasse aérienne en composantes anatomiques (Chapitre 4A, Tableau 4.3) varie énormément et que **les autres variables constitutives du rendement énergétique ne sont quasiment pas affectés**.

Les rendements énergétiques obtenus pour les différents modes de récolte présentent des différences significatives entre sites et cultivars pour les deux cycles de culture (Chapitre 4A, Figure 4.4). Le site de La Mare (pas de stress hydrique) présente des rendements énergétiques significativement supérieurs aux autres sites quel que soit le mode de récolte. Le cultivar R585 présente un rendement énergétique significativement supérieur aux autres cultivars pour le mode de récolte manuel (Millable stalk) alors qu'en mode de récolte mécanique (Whole green cane) il présente un rendement toujours significativement supérieur au cultivars R579 mais similaire au cultivar R570 (Chapitre 4A, Figure 4.4).

6.2.3.3. Comment tenir compte de l'évolution de la variabilité de répartition des variables constitutives du rendement énergétique dans la mise au point de système de culture ciblant des objectifs de production multi-usages ?

Les conditions climatiques (température, rayonnement, pluviométrie) et les pratiques (irrigation, mode de récolte, choix du cultivar) ont un effet *in fine* sur le rendement énergétique de la production. **Les différents facteurs de variation agronomiques et climatiques agissent principalement sur les aspects quantitatifs de la production et peu sur ses aspects qualitatifs. Le rendement énergétique d'une production dépend donc majoritairement de la capacité d'un système de culture à générer le maximum de biomasse aérienne** (Chapitre 4A, Figure 4.5). Comme nous l'avons dit précédemment la maximisation des rendements en biomasse aérienne, et de fait énergétique, n'est pas antagoniste du rendement en sucre. L'hypothèse la plus probable est que les profils qualité de production générés sont susceptibles de ne pas répondre aux critères requis pour optimiser le rendement en sucre extractible obtenu par le procédé d'extraction du sucre classique. L'examen de l'évolution simultanée des rendements en sucre, fibre et énergie permettrait d'optimiser dans un premier temps des dates de coupe optimales ciblant différents idéotypes répondant aux objectifs de production visés. Dans un deuxième temps l'examen de l'évolution simultané des teneurs en sucre et fibre, et du rendement énergétique de la production permettrait d'optimiser les systèmes de culture canniers afin qu'ils répondent aux objectifs de production multi-usages (sucre/énergie dans un premier temps) nouvellement fixés.

6.2.4. Modélisation des dynamiques d'évolution des variables constitutives du rendement énergétique de la biomasse de canne à sucre

Nous avons développé les équations qui ont servi à mettre au point un module de partition capable de simuler les variables constitutives du rendement énergétique. La simulation de ces variables est un prérequis indispensable au développement d'un outil d'aide à la décision capable de tester à priori (ou d'affiner des préconisations d'ordre techniques) de nouveaux systèmes de culture visant une production multi-usages.

6.2.4.1. Quels sont les apports du nouveau module de partition par rapport à la précédente version du modèle de croissance « Mosicas » ?

Le nouveau module de partition inclut dans le modèle de croissance « Mosicas » présente plusieurs avancées comparativement à la version présentée par Martiné, (2003) :

- La partition de la biomasse aérienne en ses composantes anatomiques (tige usinable, biomasse sénescente et reste) reste identique à la version précédente seule la variable explicative change avec l'utilisation d'une variable climatique (temps thermique) au lieu d'une variable d'état du couvert (biomasse aérienne).
- La partition de la tige usinable a changé. Les composantes de la tige usinable étaient le sucre (richesse), les structures (fibre, non sucre et minéraux) et l'eau, ce qui permettait à la précédente version du modèle de simuler un rendement de tige usinable ou rendement canne en t/ha. Le nouveau module de partition a conservé le formalisme de la partition de la tige usinable en sucre mais **le formalisme concernant la partition vers les structures a changé**. Il était calculé par simple différence entre la matière sèche de tige usinable et de sucre. Désormais, la partition de la tige usinable en structures a son propre formalisme. De plus, **la fibre simulée par la nouvelle version correspond à la fibre vraie** ce qui n'était pas le cas avant.
- La précédente version ne simulait que des composantes du rendement susceptibles d'intéresser la filière sucrière (biomasse totale, rendement canne, richesse,…) et était donc centré sur la tige usinable. Dans la nouvelle version, les autres composantes anatomiques et leurs partitions en structures sont aussi formalisées. Il est donc désormais possible de simuler la partition de la biomasse aérienne, de la biomasse sénescente et du reste en leurs structures respectives.
- L'avancée majeure apportée par la nouvelle version du module de partition est l'ajout d'un niveau de partition supérieur. **La partition des structures des composantes anatomiques en leurs composantes lignocellulosiques (lignine et holocellulose) est ainsi possible**. De nouvelles sorties sont donc disponibles avec la simulation des rendements en lignine et holocellulose pour la biomasse totale, la biomasse sèche de lignine et holocellulose dans les tiges usinables et la biomasse sénescente.
- Le dernier point de modification, qui avait été pressentit par son concepteur, est **l'ajout de paramètres correspondant à plusieurs variétés de canne à sucre et à un cycle de culture supplémentaire**. La version initiale n'a été paramétrée que pour une variété (R570) et un cycle (première repousse). Dans la nouvelle version les paramètres de deux nouvelles variétés (R579 et R585), d'un cycle de vierge on été ajoutés.

6.2.4.2. Quelles sont les améliorations à apporter à la nouvelle version du module de partition de la biomasse aérienne ?

Le module de partition développé et inclut dans la nouvelle version du modèle « Mosicas » est fonctionnel mais dans sa version actuelle des améliorations sont nécessaires avant d'être opérationnel pour la recherche. Le nouveau module de partition est améliorable en tenant compte au niveau du formalisme décrivant la partition de la biomasse de tige usinable en ses composantes (structures et lignine dans structure) :

- des stress reflétant l'état de satisfaction hydrique journalier de la culture (stress hydrique de croissance). Le stress hydrique a pour principal effet de diminuer la croissance donc de diminuer l'allocation de la biomasse de tige usinable vers les structures et par la même d'augmenter le stockage du saccharose.
- de la différence entre croissance thermique potentielle (température seuil plus élevée) et apparition des entrenœuds et des nœuds (température seuil plus faible). Ceci aura pour effet de jouer sur la proportion entre entrenœuds et nœuds, et donc sur le taux de partition de tige usinable en biomasse de fibre, les entrenœuds ayant une proportion plus faible de structures que les nœuds.
- de même que pour les deux points précédents concernant la partition de la biomasse de tige usinable vers la biomasse de fibre NDFMS, la partition de la biomasse de fibre de tige usinable en biomasse de lignine LIGNDFMS pourrait être améliorée en tenant compte des conditions de croissance (stress hydrique de croissance et stress thermique de croissance) et pas seulement des conditions de développement (âge thermique de la tige usinable).

Le choix de partition de la biomasse aérienne adopté (biomasse de tige usinable, biomasse de feuille morte et reste) est également à revoir mais cette révision sera fonction des perspectives d'usages du modèle « Mosicas » (mise au point et optimisation de systèmes de culture visant une production au potentiel multi-usages, ou estimation du rendement énergétique et sucrier de la production,…).

Dans le cas ou les perspectives d'utilisation du modèle sont clairement la mise au point et l'optimisation de systèmes de culture permettant de générer une production adaptée à des enjeux locaux de valorisation de la biomasse par des voies multiples (bioénergie, biomatériaux et biomolécules) nécessitant des profils qualités de matière première différents, alors il faudrait atteindre un niveau de partition plus fin concernant surtout les composantes

anatomiques car ce sont elles qui présentent le maximum de variabilité de composition (fibre et composantes lignocellulosiques).

- Partitionner la biomasse aérienne en biomasses de tiges usinables, méristèmes, limbes, gaines et biomasse sénescente permettrait de simuler le rendement de chacune des composantes anatomiques.
- Partitionner ensuite la biomasse de chacune des composantes anatomiques en biomasse de structures puis en biomasse de lignine.

Cependant, un tel niveau de détail dans la description des processus de partition de la biomasse aérienne suppose une accumulation des erreurs. De plus, la question de la faisabilité technique d'une partition fine de la biomasse en ses différentes composantes anatomiques à l'échelle industrielle ce pose.

6.2.4.3. Le nouveau module de partition doit être validé sur un jeu de données plus conséquent et indépendant

Le premier point à résoudre est la réalisation d'une validation sur un jeu de données plus conséquent et surtout indépendant. La validation du module n'a pu être réalisée que sur un nombre très restreint de données (2 points de validation) et non suffisant pour attester de la validité du modèle. Dans cette thèse nous avons tenu à présenter les résultats de modélisation dans leur ensemble ce qui implique une étape d'évaluation des capacités prédictives du modèle. Cependant, les résultats présentés ne le sont qu'a titre indicatif et ne sont en aucun cas définitifs mais témoignent simplement de notre volonté d'aller au bout de la démarche de modélisation.

Les erreurs les plus élevées concernent l'estimation des biomasses aérienne dAB et de tige usinable dMS. L'explication la plus plausible provient du fait que le modèle a été calé sur des biomasses surestimées, ce qui engendre inévitablement une surestimation des biomasses simulées. De plus, des problèmes de germination des boutures ont été noté sur les expérimentations menées en Guadeloupe ce quia eu pour effet de retarder le développement de la culture et donc de renforcer la surestimation des biomasses simulées. Néanmoins, la validation est bien plus correcte pour les taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable NDFMS que pour les biomasses.

6.3. CONCLUSIONS

Les principaux points à retenir en lien avec les objectifs fixés sont :

(i) Sur le plan méthodologique

- L'outil SPIR de caractérisation de la biomasse de canne à sucre est opérationnel et peut être utilisé dans le cadre d'autres études sous réserve que les caractéristiques des échantillons de biomasse à analyser soient comprises dans la gamme de variation des échantillons inclus dans la base de calibration. Cela signifie qu'il n'est opérationnel que sur des échantillons de bagasse ou d'autres composantes anatomiques, séchés et broyés à une granulométrie inférieure ou égale à 2 mm.
- Le nouveau module de partition inclut dans le modèle de croissance « Mosicas » est fonctionnel mais pour l'instant pas opérationnel car non validé. Les données issues d'études similaires conduites par le Cirad sur l'évolution de composantes anatomiques, structurales et lignocellulosiques dans la biomasse aérienne de canne à sucre et autres devront être utilisées pour d'une part améliorer le formalisme et élargir la gamme de validité du modèle, et d'autre part valider ses capacités prédictives.

(ii) Sur l'apport de nouvelles connaissances

- Les teneurs en fibre sont fortement variables entre les différentes composantes anatomiques alors que les teneurs en composantes lignocellulosiques des fibres présentent une faible variabilité entre les différentes composantes anatomiques.
- La cellulose est la composante qui est la moins variable entre les différentes composantes anatomiques et la lignine est la composante lignocellulosique la plus variable entre composantes anatomiques.
- La tige usinable présente la plus forte teneur en lignine, les méristèmes et les limbes présentent les teneurs les plus faibles en lignine.
- Les teneurs en hémicellulose, cellulose et lignine des fibres des différentes composantes anatomiques s'avèrent être très peu variables entre sites et cultivars. Par ailleurs, l'âge est le principal facteur de variation affectant la teneur des fibres en lignine.
- Le pouvoir calorifique inférieur (LHV = *Low Heating Value*) est peu variable entre les différentes composantes anatomiques.

- Le choix du mode de coupe est un critère essentiel pour maximiser le rendement énergétique d'une production. En revanche, les teneurs en composantes lignocellulosiques de la biomasse récoltée ne sont pas variables entre les modes de coupe.
- Les différents facteurs de variation agronomiques et climatiques agissent principalement sur les aspects quantitatifs de la production (biomasse aérienne, partition de la biomasse aérienne en composantes anatomiques et partition de la biomasse des composantes anatomiques en structures) et peu sur ses aspects qualitatifs (partition de la biomasse de fibre des composantes anatomiques en hémicellulose, cellulose et lignine).
- Le rendement énergétique d'une production dépend donc majoritairement de la capacité d'un système de culture à générer un maximum de biomasse aérienne.

(iii) Sur les perspectives associées à ce travail

- Le modèle PIR de prédiction mis au point, peut et doit être amélioré afin de proposer des alternatives aux méthodes d'analyses chimiques classiques mais également si l'on envisage son utilisation à l'échelle industrielle.
- Concernant le modèle de croissance « Mosicas », l'accent devra être mis sur ses aptitudes à prédire efficacement les rendements en biomasse aérienne, les taux de partition de cette biomasse en ses principales composantes (tige usinable, biomasses vivante et sénescente) et les taux de partition de ces composantes en sucre (principalement pour la tige usinable) et structures.
- Concevoir et évaluer de nouveaux systèmes de culture ciblant des objectifs de production multi-usages sont les principales pistes à envisager en perspectives à ce travail.

RÉFÉRENCES

Aabad M., Martiné J.F., Bouaziz A., Falisse, A., 2009. Adaptation du modèle « Mosicas » et croissance de la canne à sucre aux conditions de la région du Gharb au Maroc. Partie 3 : relations eau-production agricole, page 166.

Alexander A.G., Allison W., Chu T.L., Velez-Santiago J., and Smith L., 1982. Production of sugarcane and tropical grasses as a renewable energy source. Final Report to the US Department of Energy, Contract No. DE-AS05-78ET20071.

Alexander A.G., 1985. The energy cane alternative. Sugar series, 6. Elsevier Science Publisher, B.V. 510 p.

Almazan O., Gonzalez L., and Galvez L., 1998. The sugar cane, its by-products and co-products. AMAS 1998. Food and Agricultural Research Council, Réduit, Mauritius.

Andrade J.B., Junior, E.F., Possenti R.A., Otsuk I.P., Zimback L., and Landell M.G.A., 2003. Selecao de 39 variedades de cana de azucar para a alimentacao animal. Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science. 40: 287-296.

De Andrade J.B., Ferrari Junior E., Aparecida Possenti R., Pozar Otsuk,I. Zimback L., Guimares De Andrade Landell M., 2004. Composiçao quimica de genotipos de cana-de-açucar em duas idades, para fins de nutriçao animal.

Alonso Pippo W., Garzone P., Cornacchia G., 2007. Agro-industry sugarcane residues disposal: The trends of their conversion into energy carriers in Cuba. 869–885.

ARER, 2009. Quel développement pour le petit espace insulaire ? Le cas de l'île de la Réunion. Claire Nativel.

Ashori A. and Nourbakhsh A., 2009. Polypropylen cellulose based composites: The effect of bagasse reinforcement and polybutadiene isocyanate treatment on the mechanical properties. Journal of Applied Polymer Science. 111 (4) 2: 1684-1689.

Atchison J.E., 1993. Bagasse, In: Paper, Paper Manufacture. Secondary fibres. Non-wood pulping. Eds Hamilton F; Leopold B. Tappi Press, Atlanta. 3: 22-70.

Atchison J.E., 1993. Making the right choices for successful bagasse newsprint prodution: Part 2. Tappi Journal. 76 (1): 187-193.

Azzouz T., Puigdom®nech A., Aragay M., and Tauler R., 2003. Comparison between different data pre-treatment methods in the analysis of forage samples using near-infrared diffuse reflectance spectroscopy and partial least-squares multivariate calibration method.

Analytica Chimica Acta. 484: 121-134.

Bamber N.G., Muchow R.C., Robertson M.J., 2002. Dry matter partinoning of sugarcane in Australia and South Africa. Field Crop Research. 76: 71-84.

Margarita Banda M., and Valdez R.E., 1976. Effect of stage of maturity on nutritive value of Sugar Cane.

Barnes R.J., Dhanoa M.S. and Lister S.J., 1989. Standard normal variate transformation and de-trending of near infrared diffuse reflectance spectra. Applied Spectroscopy. 43(5): 772-777.

Barnes R.J., Dhanoa M.S., and Lister S.J. 1993. Correction of the description of Standard Normal Variate (SNV) and De-Trend (DT) transformation in practical spectroscopy with applications in food and beverage analysis-2nd edition. J. Near Infrared Spectrosc. 1: 185-186.

Alonso Pippo W., Garzone P., and Cornacchia G., 2007. Agro-industry sugarcane residues disposal: The trends of their conversion into energy carriers in Cuba. Waste Management. 27: 869–885.

Barnes R.J., Dhanoa M.S., Lister S.J., 1989. Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. Appl. Spectrosc. 43(5): 772-777.

Batten G.D., 1998. Plant analysis using near infrared reflectance spectroscopy: the potential and the limitations. Australian Journal of Experimental Agriculture. 38: 697-706.

Bellon-Maurel V., Fernandez-Ahumada E., Palagos B., Roger J-M., and McBratney A., 2010. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy. Trends in Analytical Chemistry. 29(9): 1073-1081.

Berndesa G., Hoogwijk, M., van den Broekc R., 2003. The contribution of biomass in the future global energysupply: a review of 17 studies. Biomass and Bioenergy. 25: 1-28.

Berding N., Brotherton G.A., LeBrocq D.G., and Skinner J.C., 1989. Application of near infrared reflectance (NIR) spectroscopy to the analysis of sugar cane in clonal evaluation trial. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. 8-15.

Berding N., and Marston D.H, 2010. Operational validation of the efficacy of Spectracane™, a high-speed analytical system for sugarcane quality components. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. 32: 445-459.

Bertrand D. and Dufour E., 2000. La spectroscopie proche infrarouge et ses applications analytiques. Collection sciences et techniques agroalimentaires, eds. J.-L. Multon. Paris, France.

Blanco M., Coello J., Iturriaga H., Maspoch S., Gonzales F., and Pous R., 1992. Near infrared spectroscopy: briding the gap between data analysis and NIR applications, eds. Hildrum K.I., Isaksson T., Naes T. and Tanberg A., Ellis Horwood, Chichester, UK.

Boudet A., Kajita S., Grima-Pettenati J., Goffner D., 2003. Lignins and lignocellulosics: a better control of synthesis for new and improved uses. Trends in Plant Science. 8 (12).

Braunbecka O., Bauenb A., Rosillo-Calleb F., Corteza L. 1999. Prospects for green cane harvesting and cane residue use in Brazil. Biomass and Bioenergy. 17: 495-506.

Briceño C.O., Cock J.H., and Torres J.S., 2001. Electric power from green harvesting residues of sugar cane in Columbia. Sugar Cane International. March 2001: 15-19.

Briceño C.O. and Torres J.S., 2001. Changes in green cane harvest residues during storage. Proceedings of the International Society of the Sugar Cane technologists. Brisbane, Sept 2001. 24: 197-202.

Brown A.H.D., Daniels J., and Latter B.D.H., 1969. Quantitative genetics of sugarcane. II. Correlation analysis of continuous characters in relation to hybrid sugarcane breeding. Theoretical and Applied Genetics. 39: 1-10.

Bull C.R.1991. Compensation for particle size effects in near infrared reflectance. Analyst. 116: 781-786.

Buchanan B. B., Gruissem W., and Jones R. L., 2002. Biochemistry & molecular biology of plants. Ed. Buchanan B. B., Gruissem W., Jones R. L. American Society of Plant Physiologists. Jones Wiley, ISBN 0943088399. 1408 pp.

Burner D.M., Tew T.L., Harvey J.J., and Belesky, D.P., 2008. Dry matter partitioning and quality of Miscanthus, Panicum and Saccharum genotypes in Arkansas, USA. Biomass and Bioenergy. 33: 610-619.

Catesson A.M., 1980. Les tissus végétaux. Ultrastructure biogenèse. In : Les Polymères Végétaux.Polymères Pariétaux et alimentaires non azoté. Vol 2, Part I. Ed. Monties B. Bordas-Gauthier-Villars.1-29.

Chabalier P., Van de Kerchove V., Saint Macary H., 2006. Guide de la fertilisation organique ¨ La R®union. Montpellier : CIRAD, 302 p.

Cheavegatti-Gianotto A., Marília Couto de Abreu H., Arruda P., Bespalhok Filho J.C., Lee Burnquist W., Creste S., di Ciero L., Aparecido Ferro J., Vargas de Oliveira Figueira A., de Sousa Filgueiras T., de Fátima Grossi-de-Sá M., Guzzo E.C., Hoffmann H.P., Guimarães de Andrade Landell M., Macedo N., Matsuoka S., de Castro Reinach F., Romano E., da Silva W.J., de Castro Silva Filho M., Ulian E.C., 2011. Sugarcane (Saccharum X officinarum): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. Tropical Plant Biol. 4: 62–89.

Christy A.A., Liang Y-Z., Hui C., and Kvalheim O.M. 1993. Effect of particle size on diffuse reflectance infrared spectra of polystyrene spheres. Vibrational Spectroscopy. 5: 233-244.

Clarke S. J., and Giamalva M. J., 1986. Material and energy balance for processing high fiber sugarcane. Biomass Energy Development. 607-620.

Clarke S.J., and Keenliside W., 1986. Cane varieties for power production. Proc Inter-American Sugar Cane Seminar.102-115.

Clements H.F., 1980. Sugarcane crop jogging and crop control: Principles and practices. The Pitman International Series in Applied Biology. 520 p.

Conçalves A.R., Benra P., Costa S.M., Ruzene D.S., Moriva R.Y., Luz S.M. and Ferretti L.P., 2005. Integrated processes for use of pulps and lignins obtained from sugarcane bagasse and straw. Applied Biochemistry and Biotechnology. 121-124, 821-826.

Cozzolino D., Fassio A. and Giminez A., 2000. The use of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to predict the composition of whole maize plants. J. Sci. Food Agric. 81: 142-146.

Cozzolino D., Fassio A., Fernández E., Restaino E., La Manna A., 2006. Measurement of chemical composition in wet whole maize silage by visible and near infrared reflectance spectroscopy. Animal Feed Science and Technology. 129: 329–336.

Dahm D.J., 2005. Effect of particle size on absorbance. NIR news. 16(3): 5-6.

Dahm D.J., Ciurczak E.W. and Norris K.H., 2005. Effect of particle size on absorbance (for real). NIR news. 16(4): 4-5.

Dalley C.D. and Richard Jr. E.P., 2010. Herbicides as Ripeners for Sugarcane weed science 58(3): 329-333.

Dardenne P., 2010. Some considerations about NIR spectroscopy: Closing speech at NIR-2009. NIR news. 21(1): 8-14.

Stephen R. Delwiche and James B. Reeves III., 2004. The effect of spectral pre-treatments on the partial least squares modelling of agricultural products. J. Near Infrared Spectrosc. 12(3): 177–182.

Demirbas A., 2001. Bioman resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. Energy Conversion and Management. 42: 1357-1378.

Demirbas M.F., Balat M., Balat H., 2009. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. Energy Conversion and Management. 50: 1746–1760.

Devaux M-F., Nathier-Dufour N., Robert P. and Bertrand D., 1995. Effects of particle size on the near-infrared reflectance spectra of wheat and rape seed meal mixtures. Applied Spectroscopy. 49(1): 84-91.

Dhanoa M.S., Lister S.J., Sanderson R. and Barnes R.J., 1994. The link between multiplicative scatter correction (MSC) and standard normal variate (SNV) transformations of NIR spectra. J. Near Infrared Spectrosc. 2: 43-47.

D'Hont A., Rao P.S., Feldmann P., Grivet L., Islam-Faridi N, Taylor P., and Glaszmann, J.C., 1995. Identification and characterisation of sugarcane intergeneric hybrids, Saccharum officinarum x Erianthus arundinaceus, with molecular markers and DNA in situ hybridisation. Theoritical and Applied Genetics. 91 (2): 320-326.

D'Hont A., Grivet L., Feldmann P., Glaszmann J.C., Rao S. and Berding N., 1996. Characterisation of the double genome structure of modern sugarcane cultivars (Saccharum spp.) by molecular cytogenetics. Biomedical and Life Sciences, Molecular and General Genetics MGG. 250 (4): 405-413. DOI: 10.1007/BF02174028.

D'Hont A., 2005. Techniques et savoirs des communautés rurales: approche ethnographique du développement O D'Hont - 2005 - Karthala.

Dillon S.L., Shapter F.M., Robert H.J., Cordeiro G., Izquierdo L., Lee S.L., 2007. Domestication to crop improvement: genetic resources for Sorghum and Saccharum (Andropogoneae). Ann Bot. 5: 975–989.

Dinant S., 2008. Phloème, transport inter organe et signalisation à longue distance. Comptes Rendus Biologies. 331: 334-346.

Don C.E., Mellet P., Ravno B.D., Bodger R., 1977. Calorific values of South African Bagasse. Proceeding of the South African Sugar Technologists Associations.

David R. Ely, Thommes M., and Carvajal M.T., 2008. Analysis of the effects of particle size and densification on NIR spectra. Colloids and surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 331: 63-67.

Doat J., Valette J-Ch., 1981. Le pouvoir calorifique supérieur d'espèces forestières méditerranéennes. Ann. Sci. Forest. 38 (4): 469-486.

Dupré J-Y., 2011. Rapport, compte rendu de mission à la Réunion sur la valorisation de la biomasse.

Ebrahim M.K.H., Vogg G., Osman M. N. E. H., Komore E., 1998. Photosynthetic performance and adaptation of sugarcane at suboptimal temperatures Journal of plant physiology ISSN 0176-1617.

Eggleston G., Legendre B., Tew T., 2004. Indicators of freeze-damaged sugarcane varieties which can predict processing problems. Food Chemistry. 87: 119–133.

Farrokhi N., Burton R.A., Brownfield L., Hrmova M., Wilson S.M., Bacic A. and Fincher G.B., 2006. Plant cell wall biosynthesis: genetic, biochemical and functional genomics approaches to the identification of key genes. Plant Biotechnol. J. 4: 145–167.

Faughey G.H., and Sharma H.S.S., 2000. A preliminary evaluation of near infrared spectroscopy for assessing physical and chemical characteristics of flax fibre. J. Near Infrared Spectrosc. 8: 61-69.

Fearn T., 2009. Comparing standard deviations (continued). NIR News. 20 (7): 24-25.

Fearn T., 2011. Improving accuracy by rejecting outliers ?. NIR news. 22 (6): 12-14

Fernàndez B., Andrés S., Prieto N., Mantecón A.R. and Giràldez F.J., 2008. Prediction of chemical composition of sugar beet pulp by near infrared spectroscopy. J. Near Infrared Spectrosc. 16: 105-110.

Fernandes M.A., de Queiroz A.C., Pereira J.C., de Paula Lana R., Pereira Barbosa M.H., da Fonseca D.M., Detmann E., da Silva Cabral L., Pereira E.S., Vittori A., 2003. Composição Químico-Bromatológica de Variedades de Cana-de-Açúcar (Saccharum spp L.) com Diferentes Ciclos de Produção (Precoce e Intermediário) em Três Idades de Corte. R. Bras. Zootec. 32 (4): 977-998.

Gillon D., Hernando C., Valette J.C., and Joffre R., 1997. Fast estimation of the calorific values of forest fuels by near-infrared reflectance spectroscopy. Can. J. For. Res. 27: 760-765.

Glaz B., Shine J.M. Jr, Irey M. S., Perdomo R., Powell G., Comstock J.C., 2011. Seasonal fiber containt of three sugar cane cultivars in three crop cycles on sand and muck soils. Agronomy Journal. 103(1): 211-220.

Godoy R., Elliott R., 1981. Effect of tropical forages on rumen function and flow of nutrients to the proximal duodenum in cattle fed a molasses/urea diet. Trop Anim Prod. 6 (2): 159

Goldemberg J., Teixeira Coelho S., Guardabassi P., 2008. The sustainability of ethanol production from sugarcane Energy Policy. 36: 2086– 2097.

Gooding E.G.B., 1982. Effect of quality of cane on its value as livestock feed. Tropical Animal Production. 7 (2): 71-91.

Gravois K.A., and Milligan S.B., 1992. Genetic relationships between fiber and sugarcane yield components. Crop Sci. 32: 62-67.

Gruenspecht H., 2001. Center for Strategic and International Studies Howard Gruenspecht, Acting Administrator September 19, 2011. International Energy Outlook 2011, Washington, DC.

Hames R.B., Thomas S.R., Sluiter A.D., Roth C.J. and Templeton D.W., 2003. Rapid biomass analysis - New tools for compositional analysis of corn stover feedstocks and process intermediates from ethanol production, Applied Biochemistry and Biotechnology. 3: 105-108.

Hassuani S.J., Leal M.R., and de Carvalho Macedo I., 2005. Biomass power generation. Sugar cane bagasse and trash. Report PNUD-CTC.

Hoareau W., 2005. Valorisation de la bagasse de canne à sucre. Chimie, photochimie et élaboration de panneaux et composites. Thèse de doctorat en chimie. Novembre 2005. Université de La Réunion. 216p.

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

Ibrahim S.M.A., 1985. Predicted and measured global solar radiation in Egypt. Solar energy. 35 (2): 185-188.

Ilari J.L., Martens H., and Isaksson T., 1988. Determination of particle size in powders by scatter correction in diffuse near-infrared reflectance. Applied Spectroscopy. 42(5): 722-728.

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

Inman-Bamber N.G., 1995. CANEGRO: Its history, conceptual basis, present and future uses. In: Robertson M.J. (Ed.), Research and Modeling Approaches to Assess Sugarcane

Production Opportunities and Constraints. Workshop Proceedings, University of Queensland, St. Lucia, 31-34.

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

Inman-Bamber N.G.; Bonnette G.D., Spillman M.F., Hewitt M.L., and Jaxkson J., 2008. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. Australian journal of agricultural research. 59c(1): 13-26.

Irvine J.E., and Benda G.T.A., 1979. Genetic potential and restraints in Saccharum as an energy source. Symposium proceedings : Alternative uses of sugarcane for development. Caribe Hilton Hotel, San Juan, March 26 and 27, 1979.

Jackson P.A., 1994. Genetic relationships between attributes in sugarcane clones closely related to Saccharum Spontaneum. Euphytica. 79: 101-108.

Jackson P.A., 2005. Breeding for improved sugar content in sugarcane Field Crops Research 92: 277-290.

Jin S., and Chen H., 2007. Near-infrared analysis of the chemical composition of rice straw. Industrial Crops and Products. 26: 207-211.

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

Jung H-J. G., 1997. Analysis of forage fiber and cell wall in ruminant nutrition. American Society for Nutritional Sciences. Conference: New developments in forage science contributing to enhanced fiber utilization by ruminants.

Kawashima T., Sumamal W., Pholsen P., Narmsilee R. and Boonpakdee W., 2003. Sugarcane Stalk as a Roughage for Dairy Cattle. JIRCAS Working Report. 30: 69-73.

Kaack K., Schwarz K-U, and Brander P.E., 2003. Variations in morphology, anatomy and chemistry of stems of Miscanthus genotypes differing in mechanical properties. Industrial Crops and Products. 17: 131-142.

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

Kelley S. S., Rowell R. M., Davis M., Jurich C. K., and Ibach R., 2004. Rapid analysis of the chemical composition of agricultural fibers using near infrared spectroscopy and pyrolysis molecular beam mass spectrometry. Biomass and Bioenergy. 27: 77-88.

Kessari M.E., and Langellier P., 2005. Evaluation des productions mondiales de bagasse et de résidus de récolte. Disponibilité pour le futur. Projet UCLOS. CIRAD CA, 30 p.

Kevelenge J.E.E, Said A.A., Kiflewahid B., 1983. The nutritive value of four arable farm by-products commonly fed to dairy cattle by small-scale farmers in Kenya. Tropical animal productions. 8: 162-170.

Klass D., 1998. Biomass for renewable energy fuels, and chemical. Ed. Elsevier - Academic Press ISBN 13 : 978-0-12-410950-6. 651 p.

Kuijper J., 1915. De Groei van Bladschijf, Bladscheede em Stengel van het suikerriet. Arch Suikerind Ned Indië. 23: 528–556

Kung L. Jr, Stanley, R.W., 1982. Effect of stage of maturity on the nutritive value of whole-plant sugarcane preserved as silage. American Society of Animal Science.

Lam E., Shine J. Jr, Da Silva J., Lawton M., Bonos S., Calvino M., Carrer H., Silva-Filho M.C., Glynn N., Helsel Z., Ma J., Richard E., Souza G.M., and Ming R., 2009. Improving sugarcane for biofuel: engineering for an even better feedstock. Global Change Biology Bioenergy. 1: 251-255.

Legendre B. L., 1992. The core/press method for predicting the sugar yield from cane for use in cane payment. Sugar J. 54 (9): 2-7.

Legendre B. L. and Burner D.M., 1995. Biomass production of sugarcane cultivars and early-generation hybrids. Biomass & Bioenergy. 8 (2): 5541.

Leao A.L., Sartori M.M.P., 2000. Available energy from sugar-cane post harvest residues Congrès, Renewable energy : the energy for the 21st century: (Brighton, 1-7 July 2000) World renewable energy congress N°6, Brighton , ROYAUME-UNI.

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

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

Liu L., Ye X.P., Saxton A.M. and Womac A., 2010. Pretreatment of near infrared spectral data in fast biomass analysis. J. Near Infrared Spectrosc. 18(3): 317-331.

Lovett D.K., Deaville E.R., Givens D.I., Finlay M. and Owen E., 2005. Near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to predict biological parameters of maize silage: effects of particle comminution, oven drying temperature and the presence of residual moisture. Animal feed science and technology. 120: 323-332.

Macedo I. de Carvalho, Leal M. R. and Hassuani S. J., 2001. Sugar cane residues for power generation in the sugar/ethanol mills in Brazil", Energy for Sustainable Development, 5(1): 77-82.

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

Martine, J-F., and Lebret P, 2001. Modelling the water content of the sugarcane stalk. Proceedings of the Annual Congress South African Sugar Technologists' Association. 75: 211-214.

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

Martiné J-F. and Todoroff P., 2002. Le modèle de croissance Mosicas et sa plateforme de simulation Simulex: Etat des lieux et perspectives. 10e Congrès S.T.A.S.M. 133-147.

Martiné, J-F., 2003. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle Diplôme. Thèse de doctorat, Agronomie, Paris, INAPG. 131 p.

Matsuoka S., Garcia A.A.F., Calheiros G.C., 1999. Hibridação em canade-açúcar. In: Borém A (ed) Hibridação Artificial de Plantas. Viçosa: Editora UFV, 221–254

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

Melchor C. Pasikatan, James L. Steele, Charles K. Spillman and Ekramul Haque., 2001. Near infrared reflectance spectroscopy for online particle size analysis of powders and ground materials. J. Near Infrared Spectrosc. 9(3): 153-164.

Mertens D. R., 2002. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in breakers or crucibles: collaborative study. Journal of AOAC international. 85(6): 1217-1240.

Mislevy P, Martin FG, Adjei MB, Miller JD. Agronomic characteristics of US 72-1153 energycane for biomass. Biomass Bioenergy. 9: 449–57.

Murray I., 1986. In: Hollo J., Kaffka K. J., Gonczy J. L., (Eds.), Proceedings of the international NIR/NIT conference, Budapest, p. 13.

Naseeven M. R., 1988. Sugarcane tops as animal feed. FAO Animal Production and Health Paper.

Naydenova Y., Tomov P. and Dardenne P., 1998. Near infrared spectroscopy estimation of feeding value of forage perennial grasses in breeding programmes by global and specific calibrations. Estimation of chemical composition and digestibility. J. Near Infrared Spectrosc. 6, 153-165.

Newgard E. C., 2001. Near-Infrared Spectroscopy for Analysis of Agricultural Material.

Nobrega J.C.M. de Dornelas M.C., 2006. Biotecnologia e Melhora-mento da Cana-de-Açúcar. In: Segato S.V., pinto A.S., Jendiroba E., Nóbrega J.C.M., (eds) Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba 1: 39–56.

Norris K. H., Barnes R. F., Moore J. E. and Shenk J. S., 1976. Predicting Forage Quality by Infrared Reflectance Spectroscopy. J Anim Sci. 43(4): 889-897.

Norris K.H. and Williams P.C., 1984. Optimization of mathematical treatments of raw near-infrared signal in the measurement of protein in hard red spring wheat. I. influence of particle size. Cereal Chem. 61(2): 158-165.

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

O'Neil A.J., Jee R.D., and Moffat A.C., 1998. The application of multiple linear regression to the measurement of the median particle size of drugs and pharmaceutical excipients by near-infrared spectroscopy. Analyst. 123: 2297-2302.

O'Neil A.J., Jee R.D., and Moffat A.C., 1998. Measurement of the cumulative particle size distribution of microcrystalline cellulose using near infrared spectroscopy. Analyst. 124: 33-36.

Osborne B. G., 1993. Encyclopedia of analytical chemistry, eds. Robert A. Meyers. Near-infrared spectroscopy in food analysis. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.

O'Shea M. G., Staunton S. P. and Burleigh M., 2010. Implementation of on-line near infrared (NIR) technologies for the analysis of cane, bagasse and raw sugar in sugar factories to improve performance. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. 27: 1-15.

Otsuka M., 2004. Comparative particle size determination of phenacetin bulk powder by using Kebulka-Munk theory and principal component regression analysis based on near-infrared spectroscopy. Powder Technology. 141: 244-250.

Ouensanga A., 1989. Variation of fiber composition in sugar cane stalks. Wood and fiber science. Journal of the Society of Wood Science and Technology, Madison, WI, USA. Issn 0735-6161. 21 (2) : 105-111.

Paillat J-M., Fraboulet P., and Lorré M., Mai 1997. Dessication et conditionnement de paille de canne à sucre. Mesures sur canne récoltées en vert. M Caruel à Sainte-Suzanne. Document 79/77 CIRAD Réunion, 32 p.

Pandey A., Soccol C.R., Nigam P., and Soccol V.T., 2000. Biotechnological potential of agroindustrial residues I: Sugarcane bagasse. Bioresource Technology. 74 (1): 69-80.

Pankhurst C., 2005. Should sugarcane trash be used as a biofuel for cogeneration or left in the field for its long-term benefits to soil health and crop productivity.

Papini M., 1995. Study of the radiative properties of powdered and fibrous polymers. Vibrational spectroscopy. 11: 61-68.

Park R. S., Agnew R. E., Gordon F. J. and Steen R. W. J., 1998. The use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) on undried samples of grass silage to predict chemical composition and digestibility parameters. Animal Feed Science and Technology. 72 (1-2): 155-167.

Pate F.M., 1979. Nutritive changes of sugarcane with advancing maturity. Beef and Cattle report. University of Florida. Agricultural Research and Education Center, Belle Glade. Chapter 3 : 42-45. www.animal.ufl.edu/extension/beef

Paturau J.M., 1982. By-Products of the Cane Sugar Industry: An Introduction to Their Industrial Utilization. Elsevier Pub. Co. USA. 436 p.

Paturau J.M. 1982. By-Products of the Cane Sugar Industry: An Introduction to Their Industrial Utilization. Elsevier Pub. Co. USA. 436 p.

Paturau J.M., 1989. By-products of sugarcane in industry. Edt Elsevier, Amsterdam, 3rd edition.

Pessoa Jr A., Mancilha I.M., and Sato S., 1997. Acid hydrolysis of hemicellulose from sugarcane bagasse. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 14 (3): 1.

Piperidis G., D'Hont A., 2001. Chromosome composition analysis of various Saccharum interspecific hybrids by genomic in situ hybridization (GISH). Proc Int Soc Sugcane Technol. 24: 565–566

Pouzet D., Velle A., and Rassaby A., Février 2002. Estimation des résidus de récolte de la canne à sucre. Bilan des études menées au cours des campagnes 2000 et 2001 sur l'île de La Réunion. CIRAD CA Programme CAS – Pôle Canne à Sucre. Saint Denis, 14 p.

Pouzet D., 2011. Production durable de biomasse. La lignocellulose des poacées (Coll. synthèses). Parution 06-2011.

Preston T. R., 1977. Nutritive value of sugar cane for ruminants. Trop Anim Prod. 2 (2): 125-142.

R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL http://www.r-project.org/ (2010).

Rae A.L., Bonnett, G.D., and Karno., 2006. Understanding stem development and sucrose accumulation to increase CC. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. 28.

Rao Seshagiri P., 2007. Varieties for Sugar Association of Caribbean Sugar Cane Industries. Presentation power Point. 35 slides. In Wisben Workshop, Guyana, 21-27 October 2007. West Indies Central Sugar Cane Breeding Station (WICSCBS).

Razafimbelo T., Barthes B., Larre Larrouy M.C., Luca E.F. –de Laurent J.Y., Cerri C.C. and Feller C. 2006. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. Agriculture, Ecosystems and Environment. 115 (1-4): 285-289.

Rhèn C., 2004. Chemical composition and gross calorific value of the above-ground biomass components of young Picea abies. Scand. J. Forest Res. 19: 72.
doi: 10.1080/02827580310019185
Rhén C., Ohman M., Gref R., Wästerlund I., 2007. Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics. Biomass and Bioenergy, 31 (1) 66–72.

Rinaudo M., Joseleau J.P., 2008. La biomasse végétale peut-elle concurrencer le pétrole ? Centre de Recherche Sur les Macromolécules Végétales, CNRS. 32 diapo, 5 décembre 2008. www.cermav.cnrs.fr/etat_art/biomasse_petrole.pdf

Rípoli, T.C.C., Molina Jr., W.F., Rípoli, M.L.C., 2000. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil.

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

Saad M.B.W., Oliviera L.M.R., Cãndido R.G., Quintana G., Rocha G.J.M., and Gonçalves A.R., 2008. Preliminary studies on fungal treatment of sugarcane straw for organosolv pulping. Enzyme and Microbiological Technology. 43: 220-225.

Sabatier D., Dardenne P. and Thuriès L., 2011. Near Infrared Reflectance calibration optimization to predict lignocellulosic compounds in sugarcane samples with coarse particle size, J. Near Infrared Spectrosc. 19(3): 199-209.

Salas M., Aumont G., Biessy G., and Magnié E., 1992. Effect of variety, stage of maturity and nitrate fertilization on nutritive values of sugar canes. Animal Feed Science and Technology. 39 (3/4): 265-277.

Salgado G.S., Nuñiez E.R., Cabriales P.J.J., Etchevers B.J.D., Palma-Lopez D.J., and Soto H.M.R., 2001. Efficiencia de recuperacion del nitrogeno fertilizante en soca de caña de azucar sometida a differentes manejos de fertilizacion. Terra. 19: 155-162.

Salgo A., Nagy J. and Nikó É., 1998. Application of near infrared spectroscopy in the sugar industry, J. Near Infrared Spectrosc. 6: A101-A106.

Sanderson M. A., Aglevor F., Collins M. and Johns D. K., 1996. Compositional analysis of biomass feedstocks by near infrared reflectance spectroscopy. Biomass and Bioenergy. 1(5): 361-370.

Sartori M.M.P., and Leão A.L., 2000. Available enregy from sugarcane post harvest residues. World renewable energy congress VI. Ed. Sayigh A.A.M., Elsevier. 1328-1331.

Sene L., Converti A., Felipi M.G.A., and Zilli M., 2002. Sugarcane bagasse as alternative packing material for biofiltration of benzene polluted gazeous streams : A preliminary study. Bioresource Technology. 83: 153-157.

Setty T.K.R. Vishwanatha G.K., and Panth M.G., 1995. Newsprint, paper and chemicals from sugarcane bagasse. Sugarcane Agro-Industrial Alternatives. Ed. Singh, G.B., Solomon, S. 5: 79-97.

Sharma B.L., Jaipal S., Chaudhary O.P., 2000. Screening of sugarcane genotypes against stalk borer, Chilo Auricilius Dudgeon. Cooperative sugar. 39 (4): 27.

Sharma R.K., Yadav K.R., Maheshwari V.L. and Kothari R.M., 2000. Bagasse preservation, A need for a biotechnological approach. Critical Review in Biotechnology. 20 (4): 237-263.

Sharma H. S. S., Kilpatrick M. and Burns L., 2000. Determination of phase II mushroom (Agaricus bisporus) compost quality parameters by near infrared spectroscopy, J. Near Infrared Spectrosc. 8: 11-19.

Singels A., Bezuidenhout C.N.. 2002. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. Field Crops Research. 78: 151–164.

Singels A., Donaldson R.A., and Smith M.A., 2005. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. Field Crop Research. 92: 291-303.

Sinnaeve G., Dardenne P. and Agneessens R., 1994. Global or Local ? A choice for NIR calibrations in analyses of forages quality. J. Near Infrared Spectrosc. 2: 163-175.

So C.L. et Eberhardt T.L., 2010. Chemical and calorific characterization on longleaf pine using near infrared spectroscopy. Near infrared spectrosc. 18: 417-423.
Somerville C., Youngs H., Taylor C., Davis S.C., Long S.P., 2010. Feedstocks for lignocellulsic biofuels. Science. 329: 790-792.

Staunton S.P., Grimley S. C. and Mackintosh D. L., 1998. Cane fibre measurement by near infrared spectroscopy. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. Poster papers, 20: 550-568.

Stryer L., 1995. “Biochemistry”, (4th ed.). New York, W.H. Freeman and Company.

Sunil, H.K., and Lawrence, M.J. 1996. Quantitative genetics of sugarcane. I. A large-scale evaluation of Saccharum germplasm. Sugar Cane. 6: 3-10.

Sunn, and Coir, 1983. in Handbook of Fiber Science and Technology, vol. IV, M. Lewin and E. M. Pearce, Eds., Marcel Dekker, New York, 727-807.

Taira E., Ueno M. and Kawamitsu Y., 2010. Automated quality evaluation system for net and gross sugarcane samples using near infrared spectroscopy, J. Near Infrared Spectrosc. 18: 209-215.

Thuriès L., Bastianelli D., Darvieux F., Bonnal L., Olivier R., Pansu M. and Feller C., 2005. Prediction by near infrared spectroscopy of the composition of plant raw materials from the organic fertilizer industry and of crop residues from tropical agrosystems, J. Near Infrared Spectrosc. 13: 187-199.

Trebbi G., 1993. Power production options from biomass: the vision of a southern European utility. Bioresource Technology. 46: 23-29.

Vance C. P., Kirk T. K., and Sherwood R. T., 1980. Lignification as a mechanism of disease resistance. Annual Review of Phytopathology. 18: 259-288.

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

Van Heerden P.D.R., Donaldson R.A., Watt1 D.A., and Singels A., 2010. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. Journal of Experimental Botany. 61 (11): 2877–2887. doi:10.1093/jxb/erq144

Van Soest P.J. and Wine R.H., 1967. Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages. J. Ass. Of. agric. Chem. 50: 50.

Van Soest P.J., Robertson J.B. and Lewis B.A., 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. J. Dairy Sci. 74: 3583-3597.

Ververis C., Georghiou K., Christodoulakis N., Santas P., and Santas R., 2004. Fiber dimension, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. Industrial Crops and Products. 19: 245-254.

Waclawovsky A. J., Sato P. M., Lembke C.G., Moore P.H. and Glaucia M. Souza G. M., 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. Plant Biotechnology Journal. 8: 263–276

Wilfred Vermerris. 2011. Survey of Genomics Approaches to Improve Bioenergy Traits in Maize, Sorghum and Sugarcane. Journal of Integrative Plant Biology 2011, 53 (2): 105–119.

Viator R.P., Johnson R.M., Richard jr E.P., Waguespack H.L., and Jackson W., 2008. Influence of non-optimal ripener applications and post harvest residues retention on sugarcane second ratoon yield. Agronomy Journal. 100: 1769-1777.

Williams P.C. and Thompson B.N., 1978. Influence of whole meal granularity on analysis of HRS wheat for protein and moisture by near infrared reflectance spectroscopy (NRS). Cereal Chem. 55 (6): 1014-1037.

Williams P. C. and Sobering D. C., 1993. Comparison of commercial near infrared transmittance and reflectance instruments for analysis of whole grains and seeds, J. Near Infrared Spectrosc. 1: 25-32.

Wood I.M., 1981. The utilization of field crops and crop residues for paper pulp production. Commonwealth Bureau of Pasture and Field Crops. Field Crop Abstracts. 34 (7): 557-568.

Wright L., 2006. Worldwide commercial development of bioenergy with a focus on energy crop-based projects. Biomass and Bioenergy. 30: 706–714.

Xiccato G., Trocino A., De Boever J.L., Maertens L., Rosa Carabaño, Pascual J.J., Perez J.M., Gidenne and Luisa Falcao-E-Cunha T., 2003. Prediction of chemical composition, nutritive value and ingredient composition of European compound feeds for rabbits by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS), Animal Feed Science and Technology. 104: 153-168.

Yin C-Y., 2011. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. Fuel. 90: 1128–1132.

ANNEXES

ANNEXE 1

Tableau 7.1 Valeurs statistiques des données issues de nos essais (étendue = Range, moyenne = Mean, SD = écart type et CV = coefficient de variation) et résultats de l'analyse de variance ANOVA à $p > 0,05$ (NS = non signifiatif, S = significatif et * = le résultat de l'ANOVA change quand on utilise les sommes de temperature TTMS ou TTAB comme variable explicative à la place du nombre de jour après plantation).

Crop cycle	Plant cane					1st Ratoon				
	Ci					Ci				
	Millable stalk	Meristem	Green leaf blade	Green leaf sheath	Trash	Millable stalk	Meristem	Green leaf blade	Green leaf sheath	Trash
Range	0.07-0.75	0.02-0.29	0.05-0.44	0.002-0.21	0.05-0.27	0.07-0.73	0.03-0.33	0.04-0.47	0.003-0.09	0.04-0.23
Mean	0,60	0,07	0,15	0,05	0,13	0,53	0,11	0,19	0,04	0,13
SD	0,14	0,06	0,08	0,04	0,05	0,18	0,08	0,11	0,02	0,05
CV	**23%**	**81%**	**55%**	**89%**	**38%**	**34%**	**79%**	**60%**	**58%**	**38%**
bloc(site)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
variety	S	S	S	NS	NS	NS*	NS	NS	NS	NS
site	S	S	S	S	S	NS*	S	NS	S	NS
age	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
age*site	S	S	S	S	S	NS	NS	NS	S	S
age*variety	S	S	S	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS
site*variety	S	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
age*site*variety	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Crop cycle	Plant cane					1st Ratoon				
	NDFi					NDFi				
	Millable stalk	Meristem	Green leaf blade	Green leaf sheath	Trash	Millable stalk	Meristem	Green leaf blade	Green leaf sheath	Trash
Range	0.34-0.58	0.57-0.73	0.66-0.75	0.63-0.81	0.70-0.81	0.35-0.59	0.59-0.73	0.65-0.76	0.65-0.81	0.69-0.81
Mean	0,46	0,67	0,72	0,76	0,77	0,45	0,67	0,71	0,74	0,76
SD	0,06	0,04	0,02	0,04	0,03	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03
CV	**13%**	**6%**	**3%**	**5%**	**4%**	**13%**	**5%**	**4%**	**5%**	**4%**
bloc(site)	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS
variety	S	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS
site	S	S	S	S	S	NS	S	S	S	S
age	S	NS	S	S	S	S	S	S	S	NS
age*site	S	S	S	S	S	NS	S	S	S	S
age*variety	S	NS*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
site*variety	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
age*site*variety	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

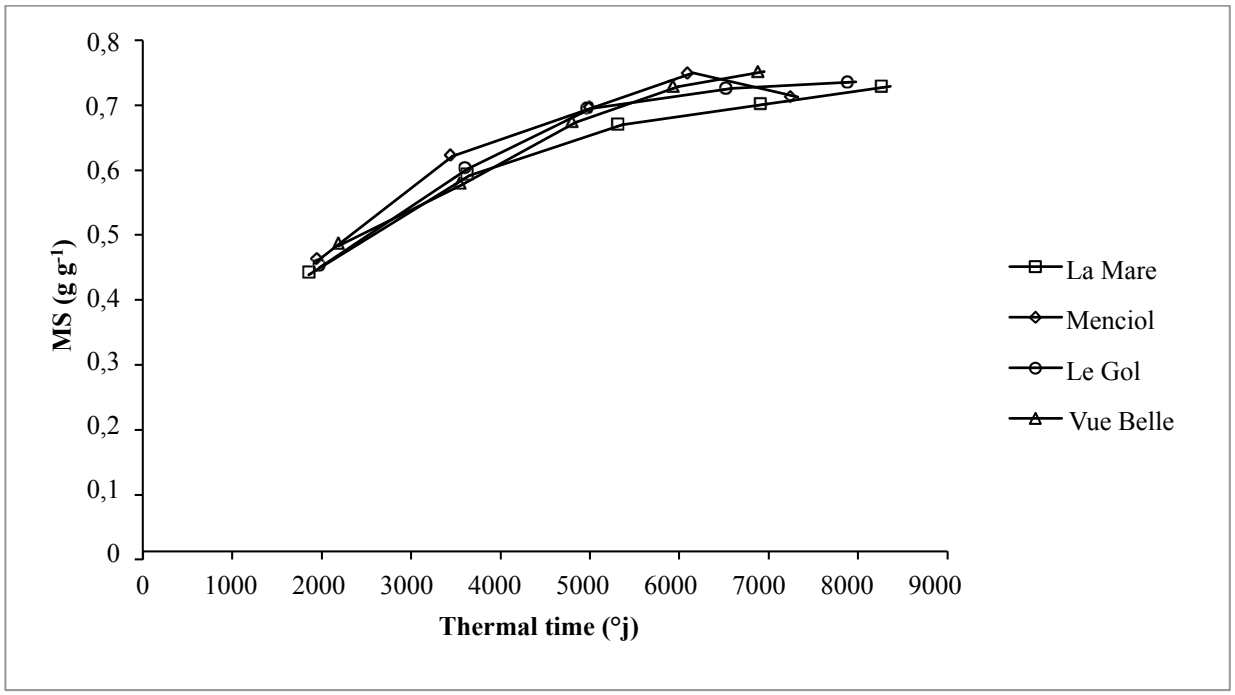
Crop cycle	Plant cane					1st Ratoon				
	HEMNDF					HEMNDF				
	Millable stalk	Meristem	Green leaf blade	Green leaf sheath	Trash	Millable stalk	Meristem	Green leaf blade	Green leaf sheath	Trash
Range	0.34-0.43	0.42-0.49	0.44-0.50	0.40-0.48	0.04-0.12	0.36-0.42	0.403-0.48	0.42-0.49	0.40-0.48	0.05-0.11
Mean	0,38	0,45	0,47	0,43	0,08	0,39	0,44	0,46	0,44	0,09
SD	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
CV	**5%**	**4%**	**4%**	**5%**	**25%**	**5%**	**5%**	**4%**	**5%**	**11%**
bloc(site)	NS	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS
variety	NS	NS	NS	S	S	S	S	NS	S	NS
site	S	S	S	S	S	S	S	NS	S	NS*
age	S	S	NS	S	S	NS	S	S	S	S
age*site	S	S	S	S	NS	S	NS	NS	S	NS
age*variety	S	S	NS	S	S	S	NS	NS	S	NS
site*variety	S	NS	NS	S	S	NS	NS	NS	NS	NS
age*site*variety	S	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS

	CELNDF					CELNDF				
	Millable stalk	Meristem	Green leaf blade	Green leaf sheath	Trash	Millable stalk	Meristem	Green leaf blade	Green leaf sheath	Trash
Range	0.47-0.54	0.43-0.52	0.42-0.49	0.42-0.50	0.38-0.45	0.46-0.54	0.40-0.53	0.41-0.50	0.407-0.52	0.38-0.44
Mean	0,51	0,48	0,45	0,46	0,42	0,50	0,47	0,45	0,45	0,41
SD	0,02	0,02	0,02	0,02	0,016	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01
CV	**4%**	**5%**	**4%**	**4%**	**4%**	**4%**	**6%**	**5%**	**5%**	**3%**
bloc(site)	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS
variety	NS	NS	NS	S	NS	S	NS*	NS	S	NS
site	S	S	S	S	NS	NS	S	NS	S	S
age	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
age*site	S	S	S	S	S	S	S	NS	S	S
age*variety	S	NS*	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS
site*variety	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
age*site*variety	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Crop cycle	Plant cane					1st Ratoon				
	LIGNDF					LIGNDF				
	Millable stalk	Meristem	Green leaf blade	Green leaf sheath	Trash	Millable stalk	Meristem	Green leaf blade	Green leaf sheath	Trash
Range	0.06-0.12	0.01-0.08	0.04-0.08	0.06-0.11	0.44-0.49	0.05-0.12	0.03-0.096	0.038-0.078	0.058-0.111	0.442-0.508
Mean	0,10	0,06	0,06	0,09	0,47	0,10	0,06	0,06	0,09	0,46
SD	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
CV	**20%**	**27%**	**13%**	**15%**	**3%**	**20%**	**23%**	**16%**	**17%**	**4%**
bloc(site)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
variety	NS	NS	S	NS	NS	S	S	NS	S	S
site	S	S	S	S	S	S	S	NS	S	S
age	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
age*site	S	S	S	S	NS	S	S	NS	S	NS
age*variety	NS	NS	S	S	NS	S	NS	NS	S	NS
site*variety	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS*	NS*
age*site*variety	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

ANNEXE 2

Figure 7.1 Taux de partition de la biomasse aérienne en biomasse de tige usinable MS en fonction de l'âge thermique de la tige usinable TTMS (Thermal time en haut) et du nombre de jours après plantation (Days after plantation en bas). Exemple du cultivar R570 dans 4 sites (La Mare, Menciol, Le Gol et Vue Belle) pour un cycle de vierge.



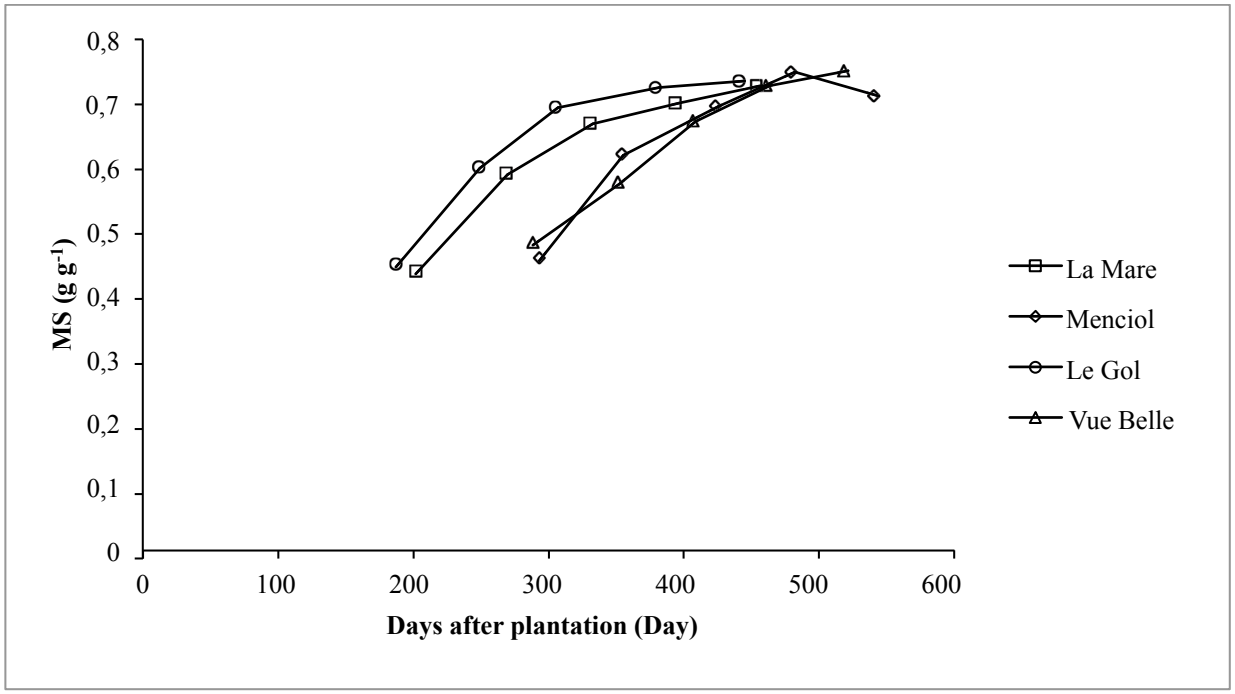
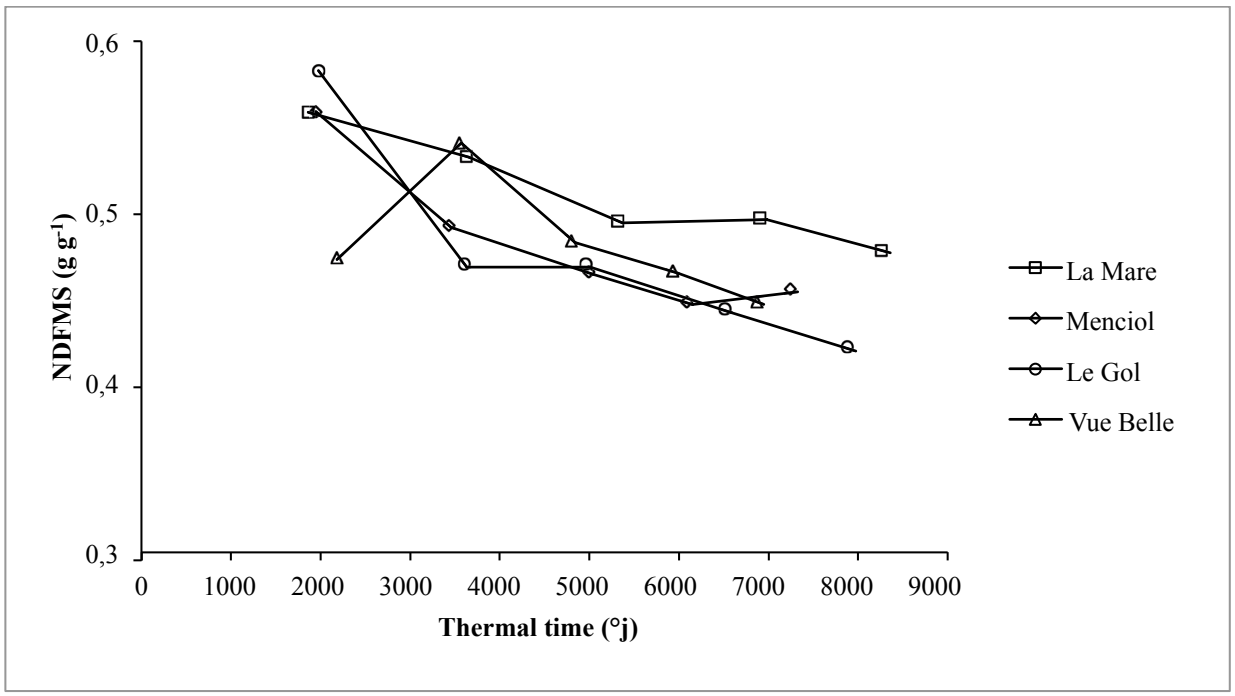


Figure 7.2 Taux de partition de la biomasse de tige usinable en biomasse de fibre NDFMS en fonction de l'âge thermique de la tige usinable TTMS (Thermal time en haut) et du nombre de jours après plantation (Days after plantation en bas). Exemple du cultivar R570 dans 4 sites (La Mare, Menciol, Le Gol et Vue Belle) pour un cycle de vierge.



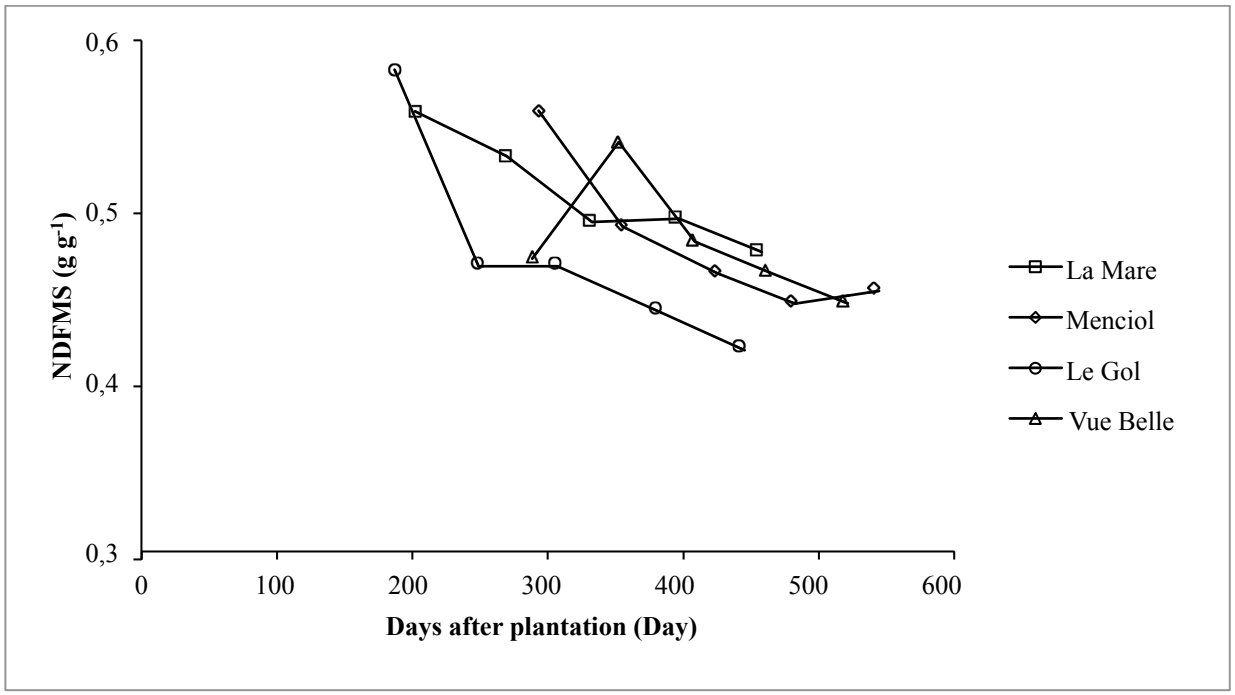
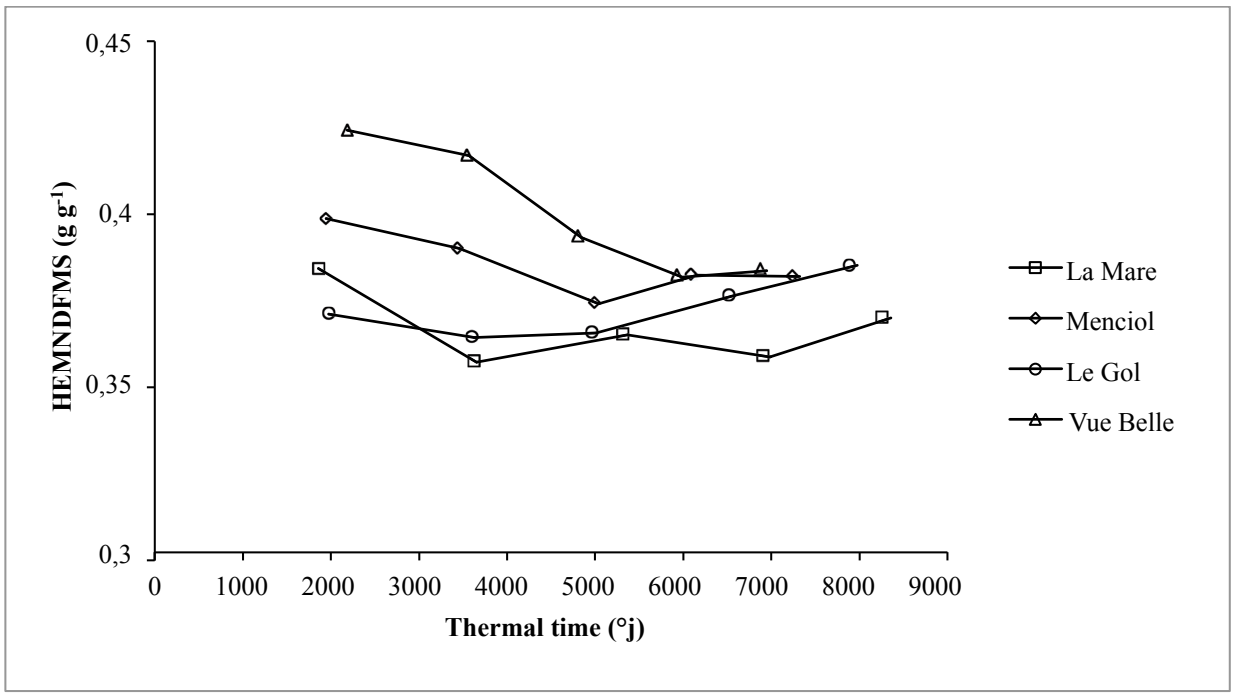


Figure 7.3 Taux de partition de la biomasse de fibre de tige usinable en biomasse d'hémicellulose HEMNDFMS en fonction de l'âge thermique de la tige usinable TTMS (Thermal time en haut) et du nombre de jours après plantation (Days after plantation en bas). Exemple du cultivar R570 dans 4 sites (La Mare, Menciol, Le Gol et Vue Belle) pour un cycle de vierge.



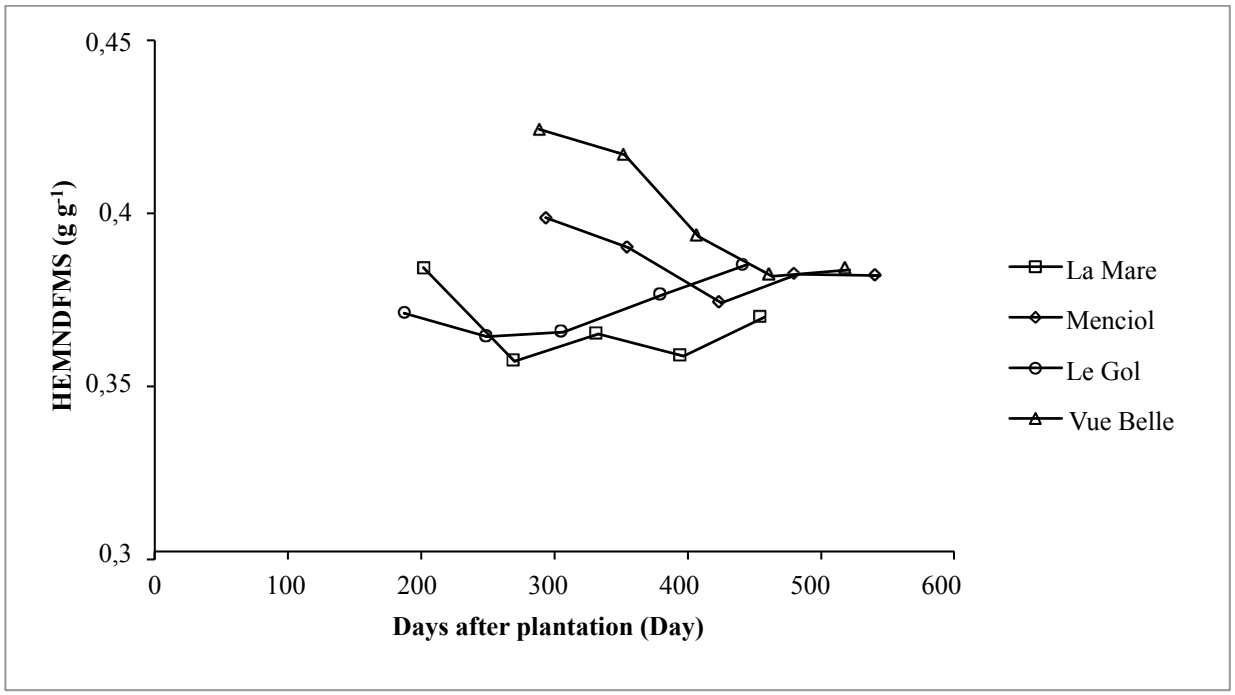
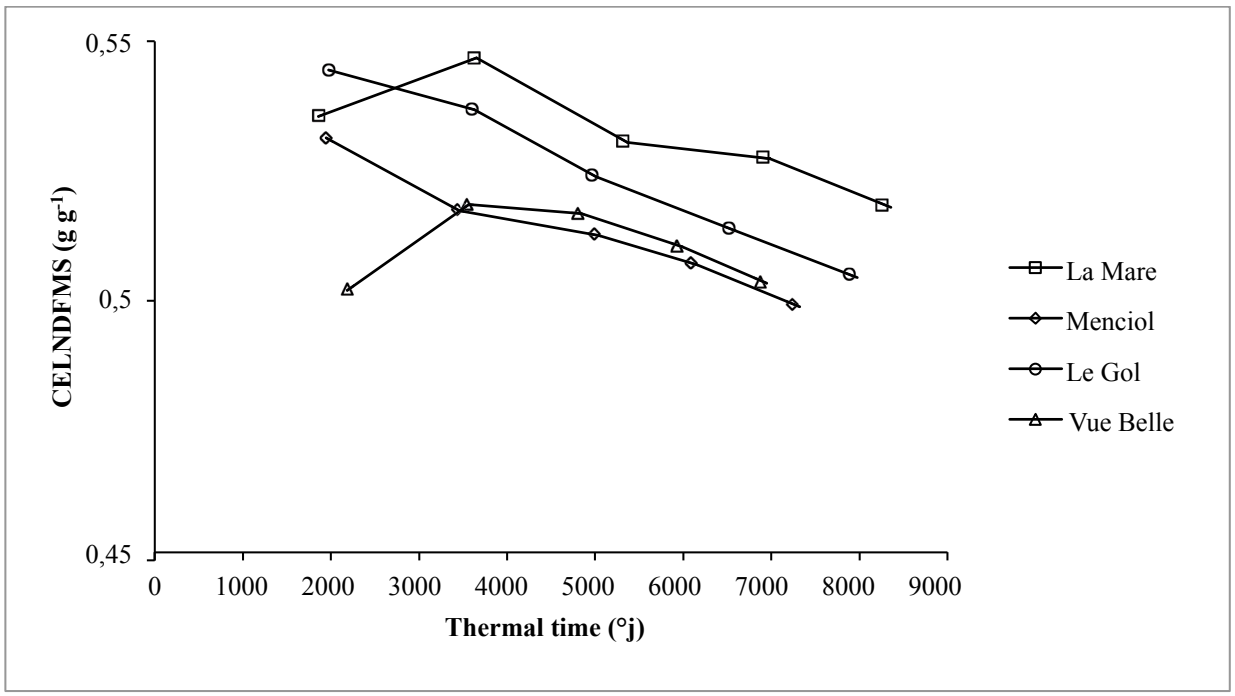


Figure 7.4 Taux de partition de la biomasse de fibre de tige usinable en biomasse de cellulose HEMNDFMS en fonction de l'âge thermique de la tige usinable TTMS (Thermal time en haut) et du nombre de jours après plantation (Days after plantation en bas). Exemple du cultivar R570 dans 4 sites (La Mare, Menciol, Le Gol et Vue Belle) pour un cycle de vierge.



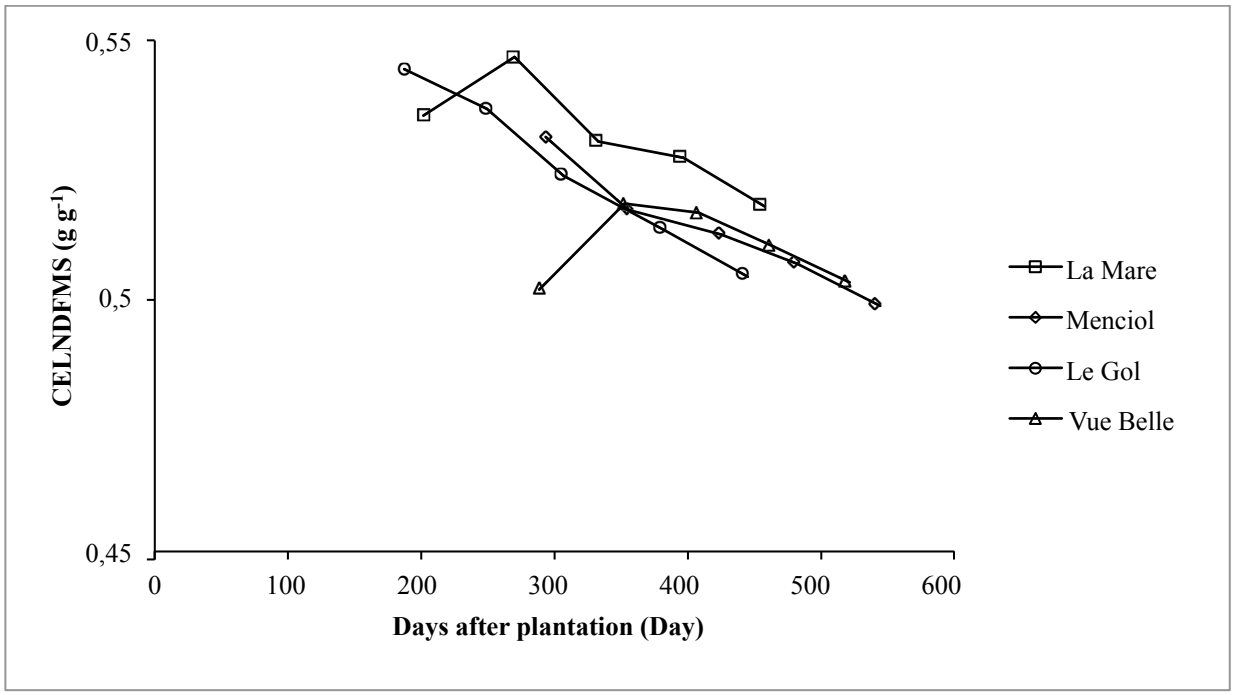


Figure 7.5 Taux de partition de la biomasse de fibre de tige usinable en biomasse de lignine HEMNDFMS en fonction de l'âge thermique de la tige usinable TTMS (Thermal time en haut) et du nombre de jours après plantation (Days after plantation en bas). Exemple du cultivar R570 dans 4 sites (La Mare, Menciol, Le Gol et Vue Belle) pour un cycle de vierge.

