

Influences de méthodes de récolte virtuelles sur les caractéristiques qualitatives et le rendement énergétique de la biomasse de cultivars de canne à sucre réunionnais

Damien Sabatier^a, Jean-François Martiné^a et Bertrand Ney^b

^aCIRAD, UPR102 Systèmes de culture Annuels, Station de la Bretagne, BP 20, F-97408 Saint-Denis cedex 9, La Réunion

^bINRA, UMR 1091 EGC (Environnement et Grandes Cultures), INRA-AgroParisTech, F-78850 Thiverval-Grignon, France

Damien.Sabatier@sugar.org.za

Résumé

La production d'énergie renouvelable à partir de la biomasse de canne à sucre a pris une dimension considérable ces dernières années car elle a un réel impact économique pour les pays producteurs. A La Réunion, les deux centrales thermiques en services depuis le milieu des années 90 produisent par combustion de la bagasse pas moins de 11% de l'électricité consommée sur l'île en 2009. Au regard des nouveaux enjeux qui se dessinent autour des multiples usages de la canne à sucre et de la mécanisation de la production il est intéressant d'étudier l'influence de méthodes de récolte de la canne à sucre sur les caractéristiques qualitatives de la biomasse exportée de la parcelle et du rendement énergétique potentiel d'une production.

Mots-clés : canne à sucre, biomasse, tige usinable, canne entière, fibre, hémicellulose, cellulose, lignine, PCI, rendement énergétique.

Introduction

L'usage énergétique de la biomasse de canne à sucre a pris une dimension économique considérable ces dernières années (Cheavegetti *et al.*, 2011). Ainsi, parmi les cultures tropicales, elle va être de plus en plus sollicitée pour des usages énergétiques car elle possède les caractéristiques d'une culture à fort potentiel bioénergétique (Waclavowsky *et al.*, 2010). Elle présente un bilan énergétique positif, une efficacité photosynthétique et des rendements en biomasse supérieurs aux autres cultures (Goldemberg *et al.*, 2008). Elle dispose également, de systèmes associés optimisés (production, méthodes de récolte, transport et transformation) et présents sur de nombreux sites de production (Rein *et al.*, 2007). Toutefois, il apparaît que dans les systèmes de culture cannières actuels, plus d'un tiers de la biomasse fibreuse et de son contenu énergétique demeure inexploité par les filières sucrières traditionnelles (Pouzet, 2011).

A La Réunion, la principale cause de ce constat est directement liée au mode de paiement de la canne à sucre. En effet, les industriels encouragent les planteurs à livrer à l'usine des cannes propres (i.e. cannes propres = cannes dépauillées et étêtées = tiges usinables) afin de maximiser le rendement en sucre extractible des chargements. Des coefficients de réfaction et de bonification, dépendant respectivement du taux de fibre moyen et de la richesse moyenne pour l'ensemble des chargements livrés à l'usine durant la campagne sucrière, sont utilisés dans la formule de paiement des planteurs (CTICS Réunion, 2011). Le coefficient de réfaction augmente de concert avec la teneur en fibre des chargements alors que la quantité de sucre extractible diminue de manière inversement proportionnelle à l'augmentation du taux de fibre (Legendre, 1992). 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. Cependant, en 2010, la mise en place d'une prime à la bagasse vient balancer ce raisonnement.

La récolte de la canne à sucre est fortement mécanisée dans les « bas » de l'île de La Réunion et s'oriente logiquement vers une mécanisation des « hauts » (innovation, rentabilité,...), au détriment d'une récolte manuelle (pénibilité, manque de main d'œuvre,...). Or, il est couramment admis qu'une récolte manuelle permet théoriquement d'obtenir des cannes plus propres alors qu'une récolte mécanisée incorpore généralement une quantité plus importante de « non cannes » (i.e. non cannes = biomasse aérienne totale – tiges usinables) dans les chargements. L'incorporation de « non cannes » va probablement impacter la qualité des chargements livrés.

La production d'énergie par combustion étant le principal usage pour valoriser la bagasse, le premier objectif de cette étude est de comparer les caractéristiques qualitatives (fibre NDF selon la méthode décrite par van Soest *et al.*, hémicellulose, cellulose et lignine en % de la matière sèche) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI en MJ kg⁻¹) de biomasses de canne à sucre, obtenues à partir de deux méthodes de récolte générées virtuellement (récolte manuelle = « canne propres » et récolte mécanique = « canne entière »). Ces deux méthodes de récolte représentent les extrêmes théoriques de ce que l'on peut obtenir réellement à partir de méthodes de récolte traditionnelles. Le deuxième objectif de cette étude est de comparer pour ces deux méthodes de récolte virtuelles le rendement énergétique (MJ m⁻²) attendu.

Matériels et méthodes

Dispositif expérimental et conditions climatiques

Des expérimentations ont été réalisées au champ, sur trois cultivars de canne à sucre (R570, R579 et R585) implantées dans quatre sites de l'île de La Réunion (La Mare, Menciol, Etang Salé et Vue Belle) et suivies durant deux cycles de culture consécutifs (plantation ou « vierge » en 2008-2009 et première repousse en 2009-2010). Les cultivars sélectionnés ont des caractéristiques agronomiques contrastées et notamment des taux de fibre différents à la récolte (R579 < R570 < R585). Deux des quatre parcelles expérimentales sont situées en zones côtières irriguées au Nord-Est et au Sud-Ouest de l'île (La Mare et Etang Salé respectivement). Les deux autres parcelles sont situées sur des zones de moyenne et haute altitude pluviale de l'Est et de l'Ouest de l'île (Menciol et Vue belle respectivement). Ces zones sont contrastées sur le plan pédoclimatique et couvrent une large gamme de conditions (culture côtière, de moyenne et haute altitude, conduite irriguée ou pluviale), que l'on rencontre généralement dans les principales zones de production cannières de l'île de La Réunion (Tableau 1).

Tableau 1. Cycle cultural, date de plantation et durée de cycle, altitude, température moyenne journalière de l'air, pluviométrie cumulée et irrigation pour 3 années d'expérimentations (2008-2010) dans 4 sites contrastés de l'île de La Réunion (La Mare, Menciol, Etang Salé and Vue Belle).

Sites	Cycles	DDP ^a (j/m/a)	Age (mois)	Altitude (m)	Température (°C)	Pluviométrie (mm)	Irrigation (mm)
<i>La Mare</i>	Vierge	22/4/08	18	70	23,9	1 813	2 734
	Repousse	29/10/09	13		24,7	1 849	1 025
<i>Etang Salé</i>	Vierge	28/7/08	16	20	23,8	779	669
	Repousse	2/11/09	13		24,5	981	300
<i>Menciol</i>	Vierge	21/3/08	19	400	21,1	3 325	0
	Repousse	23/10/09	13		21,7	3 977	0
<i>Vue Belle</i>	Vierge	27/1/09	20	720	19,5	1 953	0
	Repousse	-/9/10	-		-	-	-

^aDDP = date de début de cycle

Les essais agronomiques présentent 3 répétitions en blocs randomisés comprenant 3 variétés par bloc soit 9 parcelles élémentaires par essais. Chaque parcelle élémentaire est constituée de 9 lignes de 11 m de long plantées avec un inter ligne de 1,5 m. Les 4 essais sont fertilisés, à la plantation au niveau du sillon et au cours du cycle avec un apport de surface sur le rang. L'apport de surface est réalisé à 6 mois après la plantation ce qui constitue 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).

Échantillonnage et partition de la biomasse aérienne totale

Les échantillonnages de biomasse (1 m linéaire) sont réalisés sur des lignes différentes pour chaque date. Pour chaque cycle de culture nous avons également échantillonné des lignes différentes situées de part et d'autre de la ligne médiane des parcelles élémentaires. Après récolte, la biomasse aérienne est partitionnée selon 5 composantes anatomiques :

- feuilles mortes
- feuilles vertes = limbes verts + gaines vertes
- tiges = tiges usinables + tiges sommitales

Les feuilles mortes sont collectées au sol, sur la surface échantillonnée, et prélevées sur les tiges de canne (feuilles mortes adhérentes). Après dépaillage, les tiges de canne sont scindées en deux parties distinctes (i.e. tige usinable et tige sommitale) au niveau d'un point de section situé sur l'entre-nœud portant la quatrième feuille verte à compter de la première feuille verte avec un ochréa visible (méthode décrite par Martiné, 2003). A partir des données de partition de la biomasse aérienne totale on peut recréer virtuellement des méthodes de récolte. La méthode de récolte manuelle correspondant à des « cannes propres » (i.e. tiges usinables uniquement) et la méthode de récolte mécanique correspondant à des « cannes entières » (i.e. tiges + feuilles vertes).

Prédiction par SPIR des composantes lignocellulosiques et calcul du rendement énergétique

Après séchage et broyage, les échantillons de biomasse ont été scannés en mode réflectance entre les longueurs d'onde 400-2 498 nm à l'aide d'un spectromètre proche infrarouge (FOSS, NIRSystems XDS, Inc. 7703 Montpelier Road, Suite 1, Laurel, MD 20723, USA). A partir des spectres acquis sur les poudres des échantillons de biomasse, les teneurs en composés lignocellulosiques (fibre NDF, hémicellulose, cellulose et lignine) ont été prédites grâce à un modèle proche infrarouge précédemment développé (Sabatier *et al.*, 2012).

Les PCI des échantillons de biomasse (PCI_B en MJ kg⁻¹) sont calculés à partir de leurs teneurs en fibre NDF et composantes lignocellulosiques prédites par SPIR (%Fibre, %Hem, %Cel et %Lig), et de valeurs de PCI (PCI_{Hem} , PCI_{Cel} et PCI_{Lig}) provenant de la littérature (Sarlos *et al.*, 2003) comme suit :

$$(1) \quad PCI_B = (PCI_{Hem} * \%Hem + PCI_{Cel} * \%Cel + PCI_{Lig} * \%Lig) / (\%Fibre)$$

avec les teneurs en fibre NDF et composantes lignocellulosiques prédites par SPIR (%Fibre, %Hem, %Cel et %Lig) en % de la matière sèche et les PCI respectifs des composantes lignocellulosiques $PCI_{Hem} = PCI_{Cel} = 17,4$ et $PCI_{Lig} = 26,63$ en MJ kg⁻¹ de matière sèche.

Les rendements énergétiques des échantillons de biomasse (E_B en MJ ha⁻¹) sont calculés à partir de leurs rendements (B), de leurs teneurs en fibre NDF prédites par SPIR (%Fibre) et de leurs PCI_B calculés dans l'équation (1), comme suit :

$$(2) \quad E_B = B * \%Fibre * PCI_B$$

avec les rendements des échantillons de biomasse (B) en $t\ ha^{-1}$.

Résultats et discussions

Biomasse et caractéristiques qualitatives

Comparaisons variétales

Les biomasses aériennes sèches totales de trois cultivars réunionnais (R570, R579 et R585) ont été mesurées au terme de 2 cycles de culture consécutifs (vierge et repousse) dans 4 sites de l'île de La Réunion (La Mare, Menciol, Le Gol et Vue Belle) présentant des conditions climatiques contrastées (Tableau 1).

Les biomasses aériennes sèches totales ne sont pas différentes entre cultivars et on ne relève pas d'interactions génotypes*environnements significatives (données non présentées). Toutefois, le cultivar R585 a des rendements toujours supérieurs aux deux autres cultivars (Tableau 2). Le cultivar R585 a des rendements en « canne propre » et « canne entière » toujours significativement supérieurs aux deux autres cultivars (Tableau 2).

Les cultivars sont toujours classés dans le même ordre pour les taux de fibre NDF (Tableau 2) quel que soit le type de canne et le cycle de culture (i.e. R585 > R570 > R579).

Les taux d'hémicellulose de la biomasse sèche du cultivar R585 (Tableau 2) sont significativement supérieurs à ceux des deux autres cultivars (i.e. R585 > R570 ≥ R579).

Tableau 2. Biomasse aérienne totale sèche ($t\ ha^{-1}$), biomasse sèche (B en $t\ ha^{-1}$), teneurs en fibre NDF et composantes lignocellulosiques (%Fibre, %Hem, %Cel et %Lig en % de matière sèche) et PCI de la biomasse sèche (PCI_B en $MJ\ kg^{-1}$ de matière sèche) pour deux cycles de culture consécutifs (Vierge et Repousse).

		Vierge			Repousse		
		R570	R579	R585	R570	R579	R585
Biomasse aérienne totale ($t\ ha^{-1}$)		82,6	78,5	94,4	65,0	60,1	73,5
Biomasse ($t\ ha^{-1}$)	Canne propre	45,6 a	46,6 a	65,2 b	26,5 a	25,4 a	36,0 b
	Canne entière	56,2 A	54,6 A	76,7 B	33,9 A	30,9 A	45,7 B
Fibre NDF (%)	Canne propre	41,2 b	38,5 a	45,0 c	40,3 b	37,4 a	43,5 c
	Canne entière	46,4 B	42,7 A	48,4 C	46,1 B	42,6 A	48,2 C
Hemicellulose (%)	Canne propre	15,3 a	15,4 a	17,1 b	15,1 a	15,6 a	17,3 b
	Canne entière	18,2 A	17,7 A	19,2 B	18,2 A	18,1 A	19,8 B
Cellulose (%)	Canne propre	21,0 b	18,8 a	22,8 b	20,2 b	17,9 a	21,4 b
	Canne entière	22,7 B	20,1 A	23,6 B	22,1 B	19,5 A	22,6 B
Lignine (%)	Canne propre	4,9 b	4,2 a	5,2 b	5,0 b	4,0 a	4,8 b
	Canne entière	4,9 B	4,1 A	5,0 B	5,0 B	4,0 A	4,8 B
PCI ($MJ\ kg^{-1}$)	Canne propre	17,7	17,7	17,7	17,8	17,6	17,7
	Canne entière	17,7	17,6	17,6	17,7	17,6	17,6

Les moyennes d'une même ligne pour un même cycle de culture ayant la même lettre (minuscule pour « canne propre », majuscule pour « canne entière » et italique pour « Repousse ») ne sont significativement pas différentes selon le test HSD de Tukey ($P > 0,05$). Les moyennes sont calculées par cultivar pour l'ensemble des données tous sites confondus ($n = 12$ en vierge et $n = 9$ en repousse).

Les taux de cellulose de la biomasse sèche des cultivars R585 et R570 (Tableau 2), ne sont pas significativement différents et ils sont tous deux significativement supérieurs au taux de cellulose du cultivar R579 (i.e. R585 ≥ R570 > R579). On observe pour les taux de lignine de

la biomasse sèche des trois cultivars le même classement que pour les taux de cellulose (i.e. $R585 \geq R570 > R579$).

Les PCI ne sont significativement pas différents entre cultivars (Tableau 2) quel que soit le type de canne et le cycle de culture (i.e. $R585 = R570 = R579$).

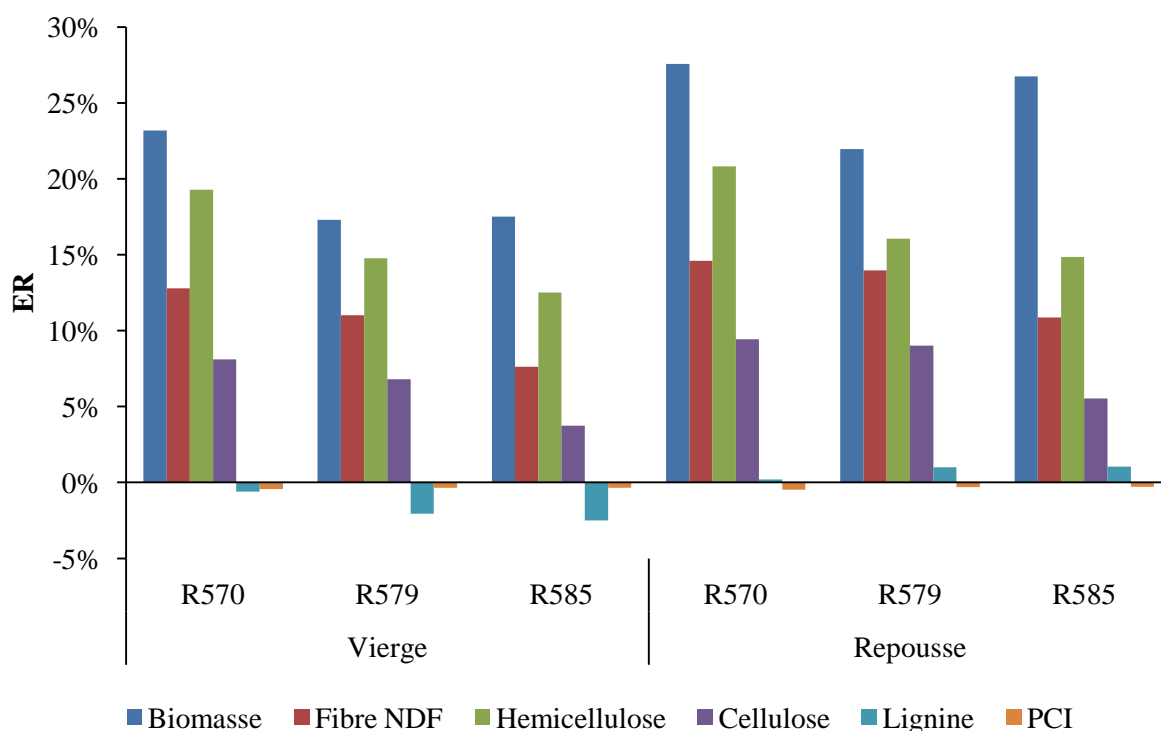
Comparaisons entre méthodes de récolte virtuelles

La figure 1 montre les écarts relatifs entre les différentes méthodes de récolte virtuelles (« canne propre » et « canne entière ») pour les biomasses et les caractéristiques qualitatives de ces biomasses (fibre NDF, hémicellulose, cellulose, lignine et PCI). Il apparaît des différences notables entre les méthodes de récolte virtuelles.

Les écarts relatifs entre les biomasses pour les deux méthodes de récolte virtuelles sont les plus importants (augmentation de 17,3 et 27,6%). Le cultivar R570 présente les écarts les plus élevés ce qui signifie que sa biomasse a potentiellement une quantité de « non cannes » plus élevée comparativement aux deux autres cultivars.

La fibre NDF peut augmenter de 7,6 à 14,6% entre les deux méthodes de récoltes. Le cultivar R570 a les écarts relatifs les plus élevés ce qui signifie que le « non cannes » de sa biomasse a des taux de fibre NDF plus élevés comparativement aux deux autres cultivars.

L'hémicellulose présente des écarts relatifs très élevés entre les méthodes de récoltes (augmentation de 12,5 à 20,8%). Le cultivar R570 a les écarts relatifs les plus élevés ce qui signifie que le « non cannes » de sa biomasse a des taux d'hémicellulose plus élevés comparativement aux deux autres cultivars.



ER = [(canne entière – canne propre)/canne propre].

Figure 1. Ecarts relatifs (ER) des biomasses et de leurs composantes qualitatives pour des « cannes propres » et des « cannes entières » pour trois cultivars (R570, R579 et R585) et deux cycles de cultures (Vierge et Repousse)

La cellulose peut augmenter de 3,7 à 9,4% entre les deux méthodes de récoltes. La cellulose est la composante lignocellulosique qui a les écarts les plus faibles entre les deux méthodes de récolte virtuelles.

La lignine en vierge diminue de 0,6 à 2,5% entre les méthodes de récolte. Par ailleurs, en repousse la lignine augmente sensiblement (moins de 1%) entre les méthodes de récolte virtuelles.

Le PCI diminue très sensiblement (de 0,3 à 0,5%) entre les deux méthodes de récolte. Le PCI n'est pas affecté quelle que soit le cultivar et la méthode de récolte.

Rendement énergétique

Comparaisons variétales

Le cultivar R585 a un rendement énergétique en « cannes propres » toujours significativement supérieur à celui des autres cultivars. Les cultivars R570 et R579 ont des rendements énergétiques en « cannes propres » qui ne sont pas significativement différents (i.e. $R585 > R570 \geq R579$).

Le cultivar R585 a un rendement énergétique en « cannes entières » toujours significativement supérieur au cultivar R579. Le cultivar R570 a des rendements en « cannes entières » qui ne sont pas significativement différents des deux autres cultivars (i.e. $R585 \geq R570 \geq R579$).

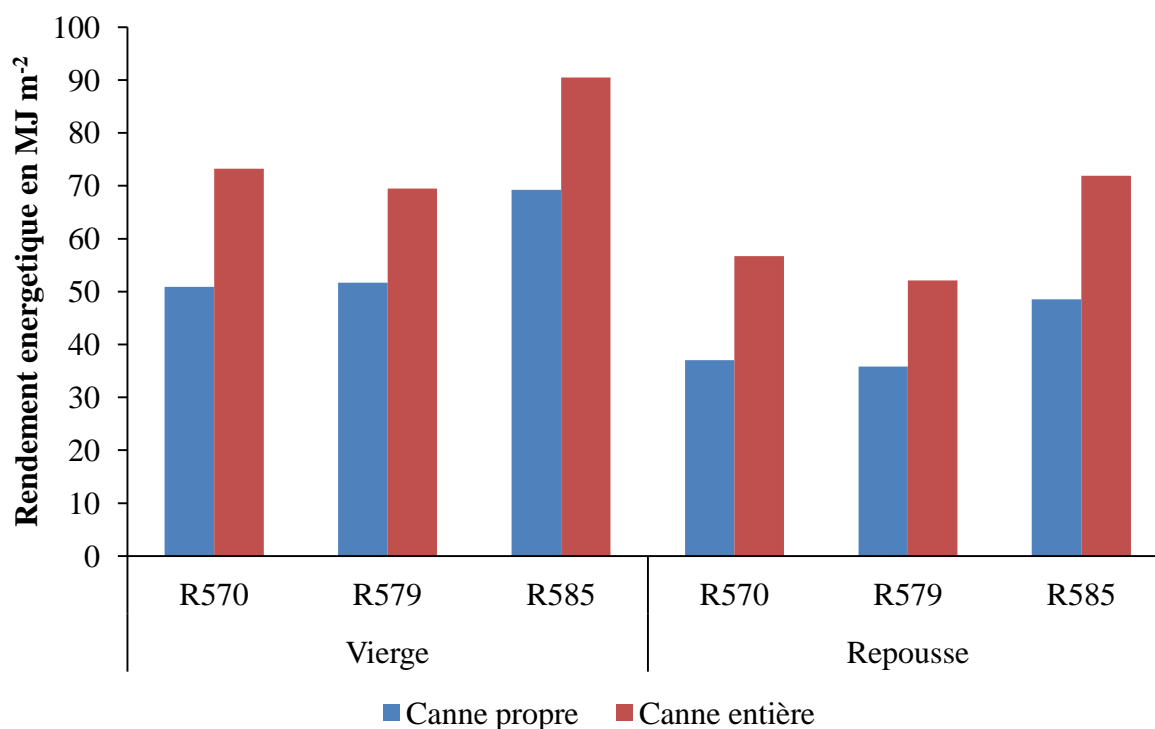


Figure 2. Rendements énergétiques (E en MJ m⁻²) de « cannes propres » et de « cannes entières » pour 3 cultivars (R570, R579 and R585) et 2 cycles de culture (Vierge et Repousse).

Les valeurs présentées sont des moyennes calculées par cultivar pour l'ensemble des données tous sites confondus ($n = 12$ en vierge et $n = 9$ en repousse).

Comparaisons entre méthodes de récolte virtuelles

La figure 2 montre les écarts relatifs entre les différentes méthodes de récolte virtuelles (« canne propre » et « canne entière ») pour les rendements énergétiques. Les écarts relatifs

entre les rendements énergétiques augmentent de 31 à 53% entre les deux méthodes de récolte virtuelles. Le cultivar R570 présente les écarts les plus élevés (Tableau 3).

Tableau 3. Rendements énergétiques (E en MJ m⁻²) et écart relatif (ER) des rendements énergétiques de « cannes propres » et de « cannes entières » pour trois cultivars (R570, R579 et R585) et deux cycles de cultures (Vierge et Repousse)

		Vierge			Repousse		
		R570	R579	R585	R570	R579	R585
Energie (MJ m ⁻²)	Canne propre	50,9 a	51,7 a	69,2 b	37,1 a	35,8 a	48,5 b
	Canne entière	73,2 AB	69,5 A	90,5 B	56,7 AB	52,1 A	71,9 B
ER		44%	34%	31%	53%	45%	48%

ER = [(canne entière – canne propre)/canne propre]. Les moyennes d'une même ligne pour un même cycle de culture ayant la même lettre (minuscule pour « canne propre », majuscule pour « canne entière » et italique pour « Repousse ») ne sont significativement pas différentes selon le test HSD de Tukey ($P > 0,05$). Les moyennes sont calculées par cultivar pour l'ensemble des données tous sites confondus ($n = 12$ en vierge et $n = 9$ en repousse).

Conclusions

Le cultivar R585 présente des rendements énergétiques supérieurs à celui des deux autres cultivars en « canne propre » cependant, en « canne entière » il n'est pas différent de celui du cultivar R570. L'incorporation de « non cannes » dans les chargements influence le rendement énergétique de la biomasse exportée et agit également sur ses caractéristiques qualitatives. Le taux d'hémicellulose est le plus sensible à l'incorporation de « non cannes » dans les chargements, par ailleurs la lignine et le PCI y sont beaucoup moins sensibles. Le rendement énergétique augmente considérablement entre une « canne propre » et une « canne entière ». Toutefois, nous avons vu que le taux de fibre NDF augmentait également avec l'incorporation de « non cannes » ce qui pose des problèmes lors du procédé d'extraction du sucre. Il apparaît clairement un antagonisme entre les usages sucrier et énergétique de la canne à sucre. Des études complémentaires doivent donc être conduites au niveau de l'usine dans le but de quantifier l'impact de l'inclusion de « non cannes » sur le procédé d'extraction du sucre.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier toute l'équipe technique de la station d'eRcane de la Bretagne, Camille Roussel et Laurent Corcodel ainsi que son directeur Bernard Siegmund pour la mise à disposition de la chaîne d'analyse sucrière en dehors de la période de campagne. Les auteurs souhaitent également remercier chaleureusement messieurs Michel Jeanette et Lilian Gauvin pour leur contribution et leur sérieux lors des phases d'échantillonnages car sans eux ce projet n'aurait pu aboutir.

Références bibliographiques

Chabalier P., Van de Kerchove V., Saint Macary H., 2006. Guide de la fertilisation organique à La Réunion. 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.
- Goldemberg J., Teixeira Coelho S., Guardabassi P., 2008. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy.* 36: 2086-2097.
- Legendre B. L., 1992. The core/press method for predicting the sugar yield from cane for use in cane payment. *Sugar Journal.* 54 (9): 2-7.
- 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. *Thèse de Doctorat INA-PG*, 132 p.
- Pouzet D., 2011. Production durable de biomasse. La lignocellulose des poacées (Coll. synthèses). Parution 06-2011.
- Rein P.W., 2007. Prospects for the conversion of a sugar mill into a biorefinery. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists.* Durban. V-26: 44-60.
- Sabatier D., 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. *Thèse de Doctorat AgroParisTech*, 229 p.
- Sabatier D., Thuries L., Bastianelli D. and Dardenne P., 2012. Rapid prediction of the lignocellulosic compounds of sugarcane biomass by near infrared reflectance spectroscopy: comparing classical and independent cross-validation. *Journal of Near Infrared Spectroscopy.* 20 (3): 371-385.
- Sarlos G., Haldi P.A. et Verstraete P., 2003. *Traité de Génie civil de l'EPFL*, Volume 21, Systèmes énergétiques.
- Site Officiel du Centre Technique Interprofessionnel de la Canne à Sucre (CTICS) de l'île de La Réunion, 2011. Protocole de campagne. <http://www.ctics.fr/protocole2011.pdf>
- 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. *Journal of Dairy Science.* 74: 3583-3597.
- 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.