

Production potentielle de bioéthanol, de biométhane et de pellets à partir des déchets de biomasse lignocellulosique du bananier (*Musa* spp.) au Cameroun

Irénée Kamdem ⁽¹⁾, Kodjo Tomekpe ⁽²⁾, Philippe Thonart ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Univ. Liège. Centre Wallon de Biologie Industrielle (CWBI). Sart-Tilman, B40. B-4000 Liège (Belgique).
E-mail : kamire88@gmail.com

⁽²⁾ Centre Africain de Recherches sur Bananiers et Plantains (CARBAP). B.P. 832 Douala (Cameroun).

Reçu le 12 février 2010, accepté le 7 décembre 2010.

Comme la plupart des pays africains producteurs et exportateurs de bananes, le Cameroun est confronté à un déficit énergétique majeur. Pourtant, le pays génère une importante quantité annuelle de déchets de biomasse lignocellulosique de bananiers inexploités. Ces déchets représentent environ 4 500 000 tonnes de matière fraîche, soit 402 750 tonnes de matière sèche contenant 80,57 % de matière organique. S'inscrivant dans une logique de développement durable lié au contexte de la protection de l'environnement, la biotransformation de ces déchets produirait potentiellement environ 93 800, 92 133 et 447 500 tonnes de bioéthanol, de biométhane et de pellets, respectivement. Tout en contribuant à la réduction du déficit énergétique et à la création de nombreuses opportunités d'emplois, l'exploitation de ces énergies renouvelables ou biocarburants constituerait de nouveaux débouchés devant assurer une importante source de revenus aussi bien aux cultivateurs de bananes qu'au pays tout entier.

Mots-clés. *Musa* (bananes), biocarburants, biomasse, énergie, Cameroun.

Potential production of bioethanol, biomethane and wood pellets from lignocellulosic biomass wastes of the banana plant (*Musa* spp.) in Cameroon. Like most African countries who are producers and exporters of banana, Cameroon is facing a major energy deficit. Yet, the country is generating annually about 4,500,000 tons of fresh banana plant lignocellulosic waste biomass matter equivalent to 402,750 tons of dry matter. The dry matter contained about 80,57% organic matter which are not exploited. Under the sustainable development, which is linked to environmental protection, the biotransformation of these residues can potentially produce about 93,800; 92,133; 447,500 tons of bioethanol, biomethane and pellets respectively. The waste transformation could reduce the energy deficit and create jobs opportunities. Productions of this renewable energy or biofuel also constitute a new area which could assure an important source of income for the banana cultivators and the entire country.

Keywords. *Musa* (banana), biofuel, biomass, energy, Cameroon.

1. INTRODUCTION

De nos jours, les changements climatiques, la dégradation et la pollution de la biosphère deviennent un sujet de préoccupation majeure dans un contexte d'explosion démographique, de menace de la sécurité alimentaire, d'industrialisation galopante et de demande d'énergie sans cesse croissante. Cette énergie, qui a rendu possible le développement industriel dans plusieurs régions du monde, est mal et sous-exploitée en Afrique en général et au Cameroun en particulier.

Potentiellement riche en ressources d'énergies renouvelables et plus particulièrement en biomasse végétale, le Cameroun possède paradoxalement une

très faible consommation énergétique par rapport à la moyenne africaine qui est de 0,6 tep par habitant. D'après Nkue et al. (2009), la consommation finale d'énergie au Cameroun, rapportée à la population nationale, était de 0,29 tep par habitant en 2006. En énergie traditionnelle (biomasse), ce ratio est de 0,23 tep par habitant.

Le bois de feu, surexploité et considéré comme source d'énergie du pauvre, est resté longtemps oublié de la comptabilité énergétique nationale. L'électricité reste un luxe auquel ne peuvent accéder les populations défavorisées des milieux ruraux dont le niveau de pauvreté est d'environ 70 %. Selon l'Agence d'Électrification Rurale (AER) citée par Wandji (2007),

seulement 2010 localités rurales camerounaises sur un total d'environ 7 500 dont la population est supérieure à 200 habitants, bénéficiaient du courant électrique en 2003. Il ressort de ces statistiques qu'une importante tranche de la population ne dispose pas de revenus suffisants pour payer sa facture d'électricité, malgré les multiples problèmes d'approvisionnement et les délestages intempestifs. Ceci se traduit par une forte utilisation du bois-énergie et du kérosène. Les milieux ruraux se caractérisent ainsi par une faible pénétration des énergies modernes (sous forme de kérosène et rarement d'électricité). Ces dernières servent essentiellement à l'éclairage, les autres besoins énergétiques étant desservis par le bois-énergie.

Grands consommateurs énergétiques au travers de ses activités économiques, les milieux urbains souffrent aussi de multiples problèmes énergétiques. Depuis la privatisation de la Société Nationale d'Électricité du Cameroun (Sonel), ses performances sont manifestement médiocres. C'est ainsi que les habitants de certaines agglomérations de plus de 60 000 habitants sont restés jusqu'à 55 jours par an sans alimentation en énergie électrique (Wandji, 2007). À Yaoundé et Douala, les deux principales métropoles du pays, les interruptions intempestives de courant électrique sont allées grandissant au fil des années.

Les enjeux énergétiques sont nombreux au Cameroun. Selon les études d'Ongono (2009), une augmentation de 1 % du PIB dans le secteur industriel entraîne une augmentation de 0,3 % de la consommation d'énergie ; et lorsque la consommation d'énergie augmente de 1 %, la croissance dans le secteur des services s'améliore de 0,6 % environ. Ainsi, le pays fait face à une demande d'énergie qui croît sous le cout du développement et de la pression démographique. L'inévitable épuisement des réserves de pétrole dont la production baisse depuis 1986 (Wandji, 2007), la déforestation massive pour la production d'énergie traditionnelle et la dépendance des grandes métropoles (Yaoundé et Douala) vis-à-vis des énergies fossiles pour la motorisation, embarrassent de plus en plus les autorités publiques. Girod (1994) affirme que près de 70 % de la population camerounaise utilise du bois issu de la déforestation pour satisfaire ses besoins énergétiques ; plusieurs régions, notamment au nord du pays, sont confrontées à des problèmes de déficit en bois de feu. Les enjeux suscités exigent des solutions qui devront répondre au développement durable pour ne pas compromettre l'avenir des générations futures.

Le Cameroun, en tant que pays à revenu essentiellement agricole, est le premier producteur et exportateur de bananes à dessert en Afrique (Lassoudière, 2007). Par conséquent, il est le premier générateur africain de déchets de bananiers.

Vu l'immensité du potentiel en nouvelles énergies renouvelables que possède le Cameroun, dans un souci

de préservation de la sécurité alimentaire, nous nous limiterons à la biomasse lignocellulosique et plus précisément celle du bananier (*Musa spp.*) ; le but de notre étude étant de contribuer à la protection de l'environnement à travers la lutte contre la déforestation massive et la participation au développement durable du Cameroun. Ce but sera atteint par la mise en exergue du potentiel énergétique des déchets de biomasse lignocellulosique du bananier dans le cadre d'une transformation en biocarburants de seconde génération (bioéthanol, biométhane et pellets ou granulés de bois). Dans un premier temps, nous présenterons brièvement le Cameroun. Nous enchaînerons avec la description du bananier et la production de la banane. Suivie d'une conclusion, la dernière partie fera l'objet de la valorisation énergétique potentielle par biotransformation des déchets de biomasse lignocellulosique du bananier.

2. LE CAMEROUN ET LE BANANIER

2.1. Présentation du Cameroun

Le Cameroun a la forme d'un triangle et est situé en Afrique centrale au fond du golfe de Guinée. Il s'étire entre les 2° et 13° parallèles de latitude Nord et les 9° et 16° parallèles de longitude Est. Le **tableau 1** présente la compilation des données chiffrées du pays issues de plusieurs publications. Ces données sont relatives à la population, l'économie, l'énergie, la végétation et la production de bananes et bananes plantains.

2.2. Description sommaire du bananier

Originaire d'Asie du Sud-Est, le bananier est une herbe géante appartenant à la famille des musacées, ordre des Zingibérales (Scitaminales). Monocotylédone de grande taille sans tige végétative et à fleurs zygomorphes, il est composé de plusieurs organes morphologiques de taille et de constitution chimique variables :

- La tige souterraine, improprement appelée bulbe, est le centre vital du bananier. Elle est le lieu de formation des racines, des feuilles et de l'inflorescence. C'est à ce niveau que se différencient les rejets assurant la pérennité naturelle de l'espèce ;
- Le pseudo-tronc ou faux tronc résulte de l'imbrication des gaines foliaires les unes dans les autres ;
- Dans certains cas, son limbe foliaire possède une longueur de 5 m et une largeur de 1,1 m (Champion, 1967). Le système foliaire est très développé et sa structure présente des particularités liées aux contraintes de l'alimentation hydrique (Lassoudière, 2007) ;

Tableau 1. Données chiffrées du Cameroun — *Cameroon data figures.*

Population^{a,b}	
Superficie	475 442 km ²
Population (2009)	18 879 301 habitants
Densité (2009)	40 habitants par km ²
Taux de croissance démographique (2009)	2,19 %
Population active (2008)	6 716 000 habitants
Population active par secteur (2001)	Agriculture : 70 %, industrie : 13 %, services : 17 %
Population sous le seuil de pauvreté (2000)	48 %
Langue officielle	Français et anglais
Économie^{a,b}	
PIB (2005)	15,35 milliards USD
PIB par secteur (2005)	Agriculture : 44,8 %, industrie : 17 %, services : 38,2 %
Taux de croissance du PIB (2003)	4,1 %
Taux d'inflation (2003)	4,5 %
Énergie^{a,b}	
Production de pétrole brut (2008)	87 400 barils par jour
Production d'électricité (2006)	3,903 milliards de kWh
Production et consommation de gaz naturel (2006)	20 millions de m ³
Consommation de pétrole brut (2006)	24 500 barils par jour
Consommation d'électricité (2006)	3,323 milliards de kWh
Consommation énergétique (2007)	Énergies traditionnelles (bois, charbon de bois, déchets forestiers) : 65 % Énergies fossiles : 21 % Électricité (hydraulique, fuel lourd et gaz naturel) : 14 %
Taux d'accès au réseau électrique (2002)	Taux d'accès officiel : 13,41 % des ménages Taux d'accès non officiel : 35,01 % des ménages (du fait des branchements clandestins)
Augmentation annuelle de la demande électrique (2007)	6 %
Végétation^b	
Forêt : 55 % du territoire (1992)	Forêt dense : 67,3 % Forêt dégradée : 17,3 % Forêt de savane : 15,4 %
Savane (humide et sèche) et steppe : 45 % du territoire (1992)	
Production de bananes et bananes plantains	
Bananes et plantains ^c	2 250 000 tonnes
Déchets humides de bananiers et de bananiers plantains après la récolte des fruits	4 500 000 tonnes (environ)

^a : Central Intelligence Agency (CIA), <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-ctbook/geos/CM.html>, (13/07/2009) ;

^b : Wandji, 2007 ; ^c : FAO, 2002. *FAOSTAT statistics data base, agriculture*. Roma: FAO, cité par Emaga et al., 2007.

– L'inflorescence se forme au niveau de la tige souterraine, parcourt tout le centre du faux tronc avant son apparition à l'extérieur de la plante. Les fleurs femelles forment le régime de bananes qui constituent la partie comestible (Champion, 1967).

2.3. Production de la banane à dessert et à cuire au Cameroun

La tendance habituelle consiste à ne prendre en compte que la banane à dessert (essentiellement du

sous-groupe Cavendish) lorsqu'on parle de production et de commerce de banane. Selon Lassoudière (2007), les bananes dites « à dessert » représentent 56 % de la production mondiale, mais plus de 97 % des exportations ; les bananes à cuire, quant à elles, correspondent à 44 % de la production totale de bananes.

Le Cameroun est le premier producteur et exportateur de bananes en Afrique juste avant la Côte-d'Ivoire (Lassoudière, 2007). Selon les statistiques de la FAO (2006), les exportations de bananes dessert du Cameroun étaient estimées à environ 300 000 tonnes en 2003 et en 2004. Selon la même organisation, deux grands groupes dominant le secteur de la production de bananes dessert au Cameroun : la Compagnie fruitière de Marseille (groupe Dole, 46 %) et la CDC (société d'état, en partenariat avec Del Monte Cameroon, 41 %). Un troisième opérateur (groupe SPM, 13 %) s'est installé plus récemment et est en pleine croissance. La principale destination d'exportation de bananes dessert est l'Union européenne. La production paysanne est destinée aux marchés locaux et sous-régionaux. Les bananes à cuire (plantains et autres) quant à elles ne font pas encore l'objet d'une production à l'échelle industrielle. Leur production concerne principalement les paysans.

Programme de reconversion économique de la filière banane plantain (Prébat) au Cameroun.

En décembre 2008, le Cameroun a lancé un projet dénommé Programme de reconversion économique de la filière banane plantain (Prébat). Ce dernier vise le développement de la filière banane plantain et le transfert aux principaux acteurs du savoir et du savoir faire en matière de techniques modernes de production, de transformation et de commercialisation des variétés améliorées de la banane plantain. Dans sa phase d'extension débutant en 2011, le Prébat prévoit de faire passer en cinq ans la production annuelle de plantain à 4 millions de tonnes, ce qui aboutirait à une surproduction des déchets du bananier.

Estimations des déchets du bananier produits au Cameroun. Après la récolte des fruits du bananier, une importante partie de la biomasse est généralement abandonnée dans des bananeraies ou gaspillée par incinération. Constituée essentiellement d'organes non souterrains, cette biomasse non valorisée se regroupe principalement en cinq parties morphologiques (limbes, nervures/pétiotes, gaines foliaires, hampe du régime/rachis, tige florale). Suivant les calculs effectués sur base des données publiées par Lassoudière (2007), Vargas et al. (2005), ladite biomasse représente plus de la moitié (52,85 %) de la biomasse humide totale de la plante. Les bananes (fruits récoltés et commercialisés) représentent quant à elles 34,65 % ; le reste (12,5 %)

étant représenté par la tige souterraine et les racines. Il en ressort que :

- les déchets représentés par les parties morphologiques aériennes de la plante représentent (en biomasse humide ou fraîche) environ 1,5 fois les fruits commercialisés ;
- les déchets de toutes les parties morphologiques non commercialisées (tige souterraine et racines comprises) représentent quant à eux environ 2 fois les fruits commercialisés (en biomasse humide ou fraîche).

Ainsi, une production annuelle de 2,25 millions de tonnes de bananes et plantains au Cameroun (FAO (2002)¹ cité par Emaga et al. (2007)) signifierait la génération de 4,5 millions de tonnes de déchets de bananier humide. Et pour une production de 4 millions de tonnes de plantain, comme le prévoit le Prébat, on aurait environ 8 millions de tonnes de déchets. Ces déchets seraient nettement plus importants si on prend en compte toute la végétation découlant de la souche mère. Ainsi, d'après Reddy et al. (2003), chaque hectare de bananeraie génère annuellement environ 220 tonnes de déchets humides (rejets et rejets compris). À noter, selon Uma et al. (2005), que la biomasse lignocellulosique des bananiers du groupe génomique AAB serait plus riche en matière sèche et en fibres que celle du groupe génomique AAA. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature les données relatives à la composition chimique détaillée de la tige souterraine/racines (parties morphologiques souterraines). Néanmoins, certaines études montrent que cette partie morphologique serait riche en amidon. Nous pourrions assimiler sa composition chimique à la moyenne des compositions chimiques de déchets constitués par l'ensemble des cinq parties morphologiques précédemment citées.

Lassoudière (2007) d'une part et Oliveira et al. (2007) d'autre part, ont publié les données portant sur la composition chimique de certaines parties morphologiques de bananiers du sous-groupe Cavendish (groupe génomique AAA). Ces données associées à celles d'autres auteurs (Polyamozhi et al., 1986 ; Viswanathan et al., 1989) nous ont permis de déterminer par pondération la composition chimique moyenne de ces déchets. Les **tableaux 2** et **3** présentent une compilation desdites données. Partant de cette composition chimique, nous avons mis en évidence la valorisation énergétique potentielle des déchets de biomasse lignocellulosique du bananier par le biais d'une transformation en bioéthanol, biométhane et pellets.

¹ FAO, 2002. *FAOSTAT statistics data base, agriculture*. Roma: FAO.

Tableau 2. Composition chimique de la biomasse lignocellulosique des parties morphologiques du bananier appartenant au sous-groupe Cavendish : *Musa AAA* — *Chemical composition of lignocellulosic biomass of Cavendish sub-group banana's morphological parts: Musa AAA.*

	Parties morphologiques (PAM)				
	Limbes	Nervures + pétioles	Gaines foliaires	Tige florale	Hampe du régime + rachis
Biomasse sèche et humide (%)					
mfPAM ^a (% mfPE)	13,00	9,25	17,83	8,92	3,85
mfPAM ^a (% mfPAM _T)	24,60	17,50	33,74	16,88	7,28
msPAM ^{ab} (% mfPAM)	16,50	9,80	3,40	7,80 ^b	9,80 ^b
msPAM ^d (% mfPE)	4,06	1,72	1,15	1,32	0,71
Composition chimique^c (% msPAM^{ab})					
Cellulose	20,70	39,50	37,10	14,40	28,40
Hémicellulose	8,60	21,50	11,40	5,50	7,50
Lignine	24,30	18,00	13,30	10,70	10,50
Amidon	1,10	0,40	8,40	26,30	1,40
Protéines	8,30	1,60	1,90	3,20	2,00
Lipides	8,40	2,10	3,50	2,50	2,90
Cendres	19,40	11,60	19,00	26,10	26,80
ESSE	1,23	0,57	3,03	2,13	0,94
Pectines et autres	7,97	4,73	2,37	9,17	19,56
Composition chimique^c (% mfPAM)					
Cellulose	0,84	0,68	0,43	0,19	0,20
Hémicellulose	0,35	0,37	0,13	0,07	0,05
Lignine	0,99	0,31	0,15	0,14	0,07
Amidon	0,04	0,01	0,10	0,35	0,01
Protéines	0,34	0,03	0,02	0,04	0,01
Lipides	0,34	0,04	0,04	0,03	0,02
Cendres	0,79	0,20	0,22	0,34	0,19
ESSE	0,05	0,01	0,03	0,03	0,01
Pectines, tanins, etc.	0,32	0,08	0,03	0,12	0,14

PAM : partie morphologique — *morphological part* ; mfPAM : matière fraîche des parties morphologiques — *fresh matter of morphological parts* ; msPAM : matière sèche des parties morphologiques — *dry matter of morphological parts* ; mfPE : matière fraîche de la plante entière — *fresh matter of the entire plant* ; mfPAM_T : matière fraîche totale des parties morphologiques — *total fresh matter of morphological parts* ; ESSE : extraits de sucres solubles dans l'eau — *solubles sugar extracts in water* ; ^a : Lassoudière, 2007 ; ^b : Subramanian et al., 1988 & Viswanathan et al., 1989 ; ^c : Oliveira et al., 2007 ; ^d : déduction de ^a, ^b, ^c — *deduction from ^a, ^b, ^c*.

Tableau 3. Composition chimique totale de la biomasse lignocellulosique des parties morphologiques du bananier appartenant au sous-groupe Cavendish : *Musa* AAA — *Total chemical composition of lignocellulosic biomass of Cavendish sub-group banana's morphological parts: Musa* AAA.

Composants chimiques	Teneur (%)	Total
Composition chimique totale des PAM étudiées (% msPAM_t)		100
ESSE	1,45	
Cellulose	26,09	
Hémicellulose	10,89	
Amidon	5,63	
Lignine	18,58	
Protéines	4,94	
Lipides	5,26	
Pectines et autres	7,73	
Cendres	19,43	
Monosaccharides^c (% sucre simple)		
Pentoses - Xyl	16,5	25,5
- Ara	9,0	
Hexoses - Glu	69,0	74,5
- Gal	2,5	
- Man	2,0	
- Rha	1,0	
Éléments minéraux^c (% cendres)		100
Si	34	
Ca	19	
K	40	
P	2	
Mg	3	
Autres	2	

Source : déduction de ^a, ^b et ^c du **tableau 2** — *deduction from ^a, ^b and ^c of table 2* ; ESSE : extraits de sucres solubles dans l'eau — *soluble sugar extracts in water* ; msPAM_t : matière sèche totale des parties morphologiques étudiées — *total dry matter of studied morphological parts* ; PAM : partie morphologique — *morphological part* ; ^a : Oliveira et al., 2007.

3. VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES DÉCHETS DU BANANIER

3.1. Potentiel énergétique

Les données reprises dans les **tableaux 3** et **4** nous ont permis de calculer le potentiel énergétique des déchets du bananier (DBA) (sous-groupe Cavendish : *Musa* AAA), ainsi que celui d'autres matières premières.

En prenant en compte le taux de MS qui est de 8,95 % (**Tableau 2**) et sachant, d'après Uma et al.

(2005), que les bananiers du groupe génomique AAB seraient plus riches en fibres et par conséquent en MS que ceux du groupe génomique AAA, on aurait ainsi une production potentielle minimale de MS de DBA estimée à 402 750 tonnes au Cameroun. En tenant compte du Prébap, on aurait environ 716 000 tonnes de DBA. Selon Reddy et al. (2003), on a environ 19,69 tonnes de MS de DBA·ha⁻¹.

Énergétiquement, le potentiel national annuel des DBA représente en baril équivalent pétrole (bep) 1,14 x 10⁶ bep, soit 0,167 x 10⁶ tep. Considérant le Prébap, il revient à 2 x 10⁶ bep ou 0,3 x 10⁶ tep.

3.2. Production potentielle du bioéthanol

De formule brute C₂H₅OH et usuellement désigné par l'abréviation EtOH, l'éthanol est un produit à usages multiples (pharmaceutique, parfumerie, alimentaire, combustible, etc.). Il est produit chimiquement par hydratation catalytique directe de l'éthylène (CH₂=CH₂) et biologiquement par fermentation alcoolique. Lorsque le substrat de la fermentation est une biomasse lignocellulosique, on procède d'abord à un prétraitement qui vise à modifier les propriétés physiques et physicochimiques, telles que le degré de polymérisation de la matière lignocellulosique, et donc des fractions celluloses et hémicellulosiques. Ce prétraitement est suivi de l'hydrolyse des polysaccharides (cellulose et hémicellulose) en monosaccharides (hexoses et pentoses) avant la fermentation proprement dite qui conduira à la production du bioéthanol (Didderen et al., 2008).

La conversion des pentoses et des hexoses en éthanol fait l'objet de différentes voies de transformation. En effet, ces sucres peuvent être transformés par la voie des pentoses phosphates, la glycolyse, la voie d'Entner-Doudorof, etc. Dans la mesure où certaines enzymes sont spécifiques à un microorganisme, il est à noter que la voie de transformation des sucres en éthanol diffère suivant les microorganismes utilisés pour la fermentation. L'équation générale de production du bioéthanol à partir des monosaccharides est la suivante :



La **figure 1** présente la production potentielle du bioéthanol en litres par tonne de MS. Trois types de production y sont représentés : la production par fermentation des hexoses uniquement, la production par fermentation successive des hexoses et pentoses et la co-fermentation simultanée des hexoses et pentoses (Didderen et al., 2008).

Le cout de production dépend de plusieurs facteurs. Les deux facteurs les plus coûteux du processus de conversion sont le prétraitement et l'hydrolyse

Tableau 4. Conversion des données — *Data conversion.*

Production du biogaz^a contenant en moyenne 60 % de CH₄ (conditions normales de température et de pression)	
Molécules	Biogaz contenant en moyenne 60 % de CH₄ (l·kg⁻¹)
Protéines	700
Lipides	1250
Sucres fermentescibles	746
Production du bioéthanol^b en l ou kg (par kg de sucre)	
1 kg de sucre (hexoses et pentoses)	0,49 ¹ kg ou 0,62 ¹ l de bioéthanol
Production des pellets^c en kg (par kg de biomasse sèche)	
1 kg de biomasse lignocellulosique sèche	1,11 kg de pellets
Conversion énergétique	
Molécules	Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) en J·kg⁻¹ ou J·m⁻³
Glucides	18,72 x 10 ⁶ J·kg ⁻¹
Protéines	16,92 x 10 ⁶ J·kg ⁻¹
Lipides	37,69 x 10 ⁶ J·kg ⁻¹
Lignine	26,64 x 10 ⁶ J·kg ⁻¹
CH ₄ gazeux	35,78 x 10 ⁶ J·m ⁻³
Biogaz (contenant en moyenne 60 % de CH ₄)	21,46 x 10 ⁶ J·m ⁻³
EtOH	21,28 x 10 ⁶ J·kg ⁻¹

^a : Héteu, 2007 ; ^b : Didderen et al., 2008 ; ^c : Naessens, 2008 ; ¹ : production moyenne des autres herbacées (paille^b et *Miscanthus*^b) — *average production of other herbaceous (straw^b and Miscanthus^b)*.

enzymatique. En effet, ceux-ci représentent, respectivement, environ 33 % et 40 % du cout de production total. Le cout de la matière première est également un facteur important dans le cout de production, même si celui-ci intervient pour une moindre proportion. De manière générale, les couts de production du bioéthanol de seconde génération dépendent de la matière première exploitée et de la technique de production employée (Wyman, 1999 ; Reith et al., 2001 ; Zaldivar et al., 2001 ; Van Thuijl et al., 2003 ; Didderen et al., 2008). Actuellement, ces couts varient entre 0,17 et 0,22 Eur par litre (Van Thuijl et al., 2003). À plus long terme, le prix de revient de la production du bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique devrait atteindre, dans le meilleur des cas, l'ordre de 0,13 Eur par litre pour 2020 (Didderen et al., 2008).

Comme l'indique la **figure 1**, la production potentielle du bioéthanol à partir des DBA est de 294 l·t⁻¹ de MS (soit 232,8 kg·t⁻¹ de MS) suivant le procédé SSCF. Au niveau national, elle est de 118,4 x 10⁶ l (93,8 x 10⁶ kg). Si l'on prend en compte le projet Prébap, la production potentielle nationale atteindrait 210,5 x 10⁶ l (166,7 x 10⁶ kg). Par hectare, cette production revient à 5,8 x 10³ l (4,6 x 10³ kg).

Sachant que le pouvoir calorifique inférieur du bioéthanol est de 5,91 Kwh·kg⁻¹, le potentiel de production énergétique de la transformation des DBA en bioéthanol revient à 27,2 x 10³ Kwh·ha⁻¹ ; 554,4 x 10⁶ Kwh sur le territoire national et 985,2 x 10⁶ Kwh (Prébap inclus).

Dans des conditions physico-chimiques optimales, la production du bioéthanol varie en fonction de la teneur en sucres du substrat utilisé. D'après Didderen et al. (2008), l'épicéa, le peuplier, la paille de céréales, le maïs et le *Miscanthus*, plus riches en sucres, possèdent un rendement de production du bioéthanol plus élevé que celui des DBA (**Figure 1**). Avec une teneur en sucres comprise entre 14 et 15 % (Didderen et al., 2008), le jus de canne à sucre a un rendement de production du bioéthanol beaucoup moins élevé que celui des DBA. Ces derniers contiennent environ 52 % de sucres.

Économiquement, il devient évident que la production du bioéthanol à partir des DBA constituera une importante source de revenus pouvant réduire efficacement la pauvreté au Cameroun. De ce fait, elle s'inscrit dans la logique du développement durable. Malheureusement, l'investissement est important et le risque financier particulièrement grand.

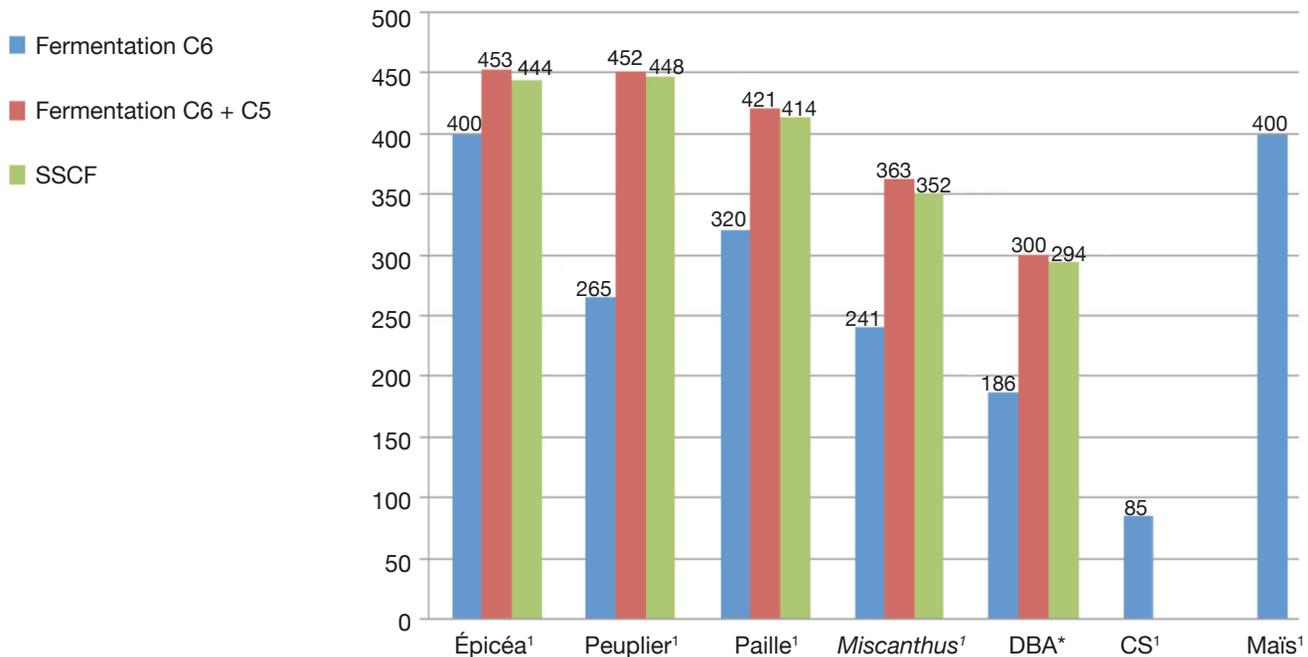


Figure 1. Production potentielle comparative du bioéthanol ($l \cdot t^{-1}$ de matière sèche) à partir des déchets de biomasse lignocellulosique du bananier et d'autres matières organiques — *Comparison of the potential production of bioethanol ($l \cdot t^{-1}$ of dry matter) from banana lignocellulosic wastes biomass with other organic matters.*

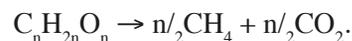
¹ : Dideren et al., 2008 ; * : production du bioéthanol calculée en comparaison avec la biomasse lignocellulosique des autres herbacées (paille¹ et *Miscanthus*¹) — *potential production of bioethanol calculated in comparison with other herbaceous (straw¹ and Miscanthus¹)*; DBA : déchets de bananiers — *wastes of banana plant*; CS : canne à sucre — *sugar canne*; C5 : pentose — *pentose*; C6 : hexose — *hexose*; SSCF : saccharification et co-fermentation simultanées — *simultaneous saccharification and co-fermentation*.

Sur le plan environnemental, la production du bioéthanol de seconde génération permet non seulement de lutter contre les gaz à effet de serre, mais aussi de pallier à certains problèmes liés à la production du bioéthanol de première génération. En effet, on n'aura plus besoin d'élargir les surfaces cultivables pour des monocultures destinées à la production du bioéthanol et au détriment de la biodiversité et de l'équilibre des sols.

3.3. Production potentielle du biométhane

Le méthane, de formule brute CH_4 , est un combustible dont la température d'auto-inflammation dans l'air est de 540 °C. Il peut être d'origine naturelle, par exemple lorsqu'il se dégage des zones humides naturelles, d'origine animale lors d'une fermentation entérique ou bien d'origine humaine, lorsqu'il provient de l'agriculture (rizières inondées), de l'extraction de gaz ou des prairies. Il est le principal constituant du gaz issu de la fermentation de matières organiques (animales ou végétales) en l'absence d'oxygène et à l'abri de la lumière par l'action combinée de plusieurs communautés de microorganismes fermentaires (CMF), d'où l'appellation « biométhane ». La biométhanisation se déroule en quatre phases :

l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Il en ressort de multiples intérêts parmi lesquels la production d'énergie thermique et électrique, la production de digestat servant d'amendement agricole et la diminution des émissions des gaz à effet de serre. La réaction de production du biométhane à partir des monosaccharides est la suivante :



Le pouvoir calorifique du biogaz est essentiellement issu du méthane qu'il contient. Par définition, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de quantité dudit combustible. Cette chaleur est diminuée de la chaleur latente d'évaporation de l'eau issue de ladite combustion. D'après Héteu (2007), promoteur de DEECC Consulting Sprl (Belgique), le PCI du biogaz est proportionnel à sa teneur en CH_4 , d'où la formule suivante :

$$PCI \text{ biogaz} = Q \times 9,94 \text{ kwh} \cdot m^{-3}$$

Q étant le pourcentage du CH_4 dans le biogaz.

Le PCI du CH_4 est de $9,94 \text{ kwh} \cdot m^{-3}$. Sachant que la

teneur moyenne en CH_4 dans le biogaz est de 60 %, le PCI moyen du biogaz revient à $5,96 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$.

Les données des **tableaux 3 et 4** nous ont permis de calculer le potentiel de production du biogaz. Pour réaliser ce calcul, nous avons tenu compte de la masse moléculaire de l' H_2O utilisée lors de l'hydrolyse des polymères de sucres fermentescibles contenus dans les déchets. Nous avons aussi évalué le potentiel de production de l'électricité à partir dudit biogaz. Le rendement de production d'électricité est d'environ 1/3 d'énergie totale issue de la combustion du biogaz contenant en moyenne 60 % de CH_4 . Les résultats sont présentés à la **figure 2**.

Il est important de noter que dans des conditions physico-chimiques optimales, le rendement de production du biogaz dépend de la composition en molécules fermentescibles (glucides, lipides et protéines) des matières premières utilisées. Cette production exige des conditions particulières de température, de potentiel d'oxydo-réduction, de pH, de rapport Carbone/Azote et d'absence d'inhibiteurs. D'après Héteu (2007), les lipides ont un rendement de production du biogaz plus élevé que celui des glucides et protéines. Avec environ 62 % de molécules fermentescibles dont 5,26 % de lipides, la matière sèche des DBA génère moins de biogaz ($526 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ de MS) que les graisses usagées ($800 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ de MS) essentiellement constituées de matières grasses (**Figure 2**). Les déchets ménagers

organiques moins riches en matières fermentescibles produisent par conséquent moins de biogaz.

Les résultats de la **figure 2** montrent une différence moins accentuée entre la production du biogaz à partir des DBA et celle à partir des matières premières utilisées pour la production du bioéthanol de la **figure 1**. En effet, la production du biogaz à partir de l'épicéa, du peuplier, de la paille et du *Miscanthus* (exploités pour la production du bioéthanol) est respectivement de 567, 567, 642 et $515 \text{ m}^3\cdot\text{t}^{-1}$ de MS. Cette faible différence est due à la contribution des protéines et des lipides (respectivement 4,94 et 5,26 % de MS de DBA) à la production du biogaz. Cependant, la forte teneur en cendres des DBA (19,43 %) joue aussi en leur défaveur dans le processus de production du biogaz. Mais cette baisse de productivité est compensée économiquement par les éléments minéraux contenus dans les digestats ou résidus de fermentation qui, après traitement, serviront d'engrais ou d'amendement agricole.

Sur le plan national, la production potentielle du biogaz à partir des DBA est d'environ $211,8 \times 10^6 \text{ m}^3$. En prenant en compte les DBA du Prébap, cette production revient à environ $376,6 \times 10^6 \text{ m}^3$. La production par hectare revient à $0,0106 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Techniquement, la conversion d'énergie du biogaz en électricité aboutit généralement à un rendement d'environ 35 %. Le reste (65 % d'énergie de départ) est dissipé sous forme de chaleur dans des gaz d'échappement

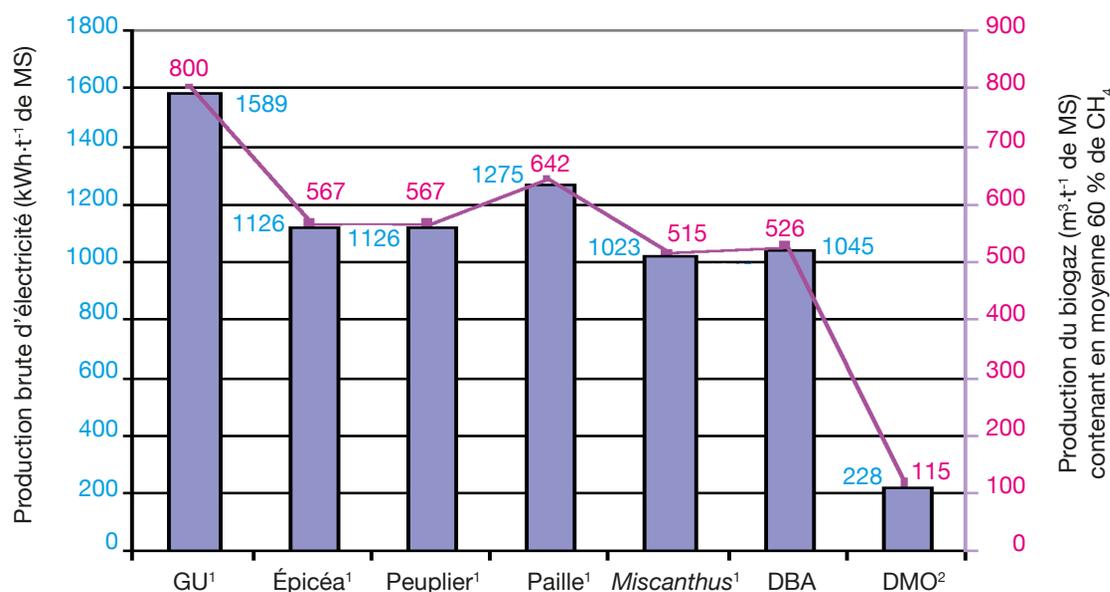


Figure 2. Production potentielle du biogaz issu des déchets de biomasse lignocellulosique du bananier et production d'électricité découlant dudit biogaz en comparaison avec les données d'autres matières organiques (le rendement de production d'électricité étant d'environ 1/3 ; le biogaz contenant en moyenne 60 % de CH_4) — *Potential production of biogas from banana lignocellulosic wastes biomass and electricity production from the same biogas in comparison with data of other organic matter (the yield of electricity production is about 1/3; the biogas contents an average of 60% CH_4).*

¹ : Didderen et al., 2008 ; ² : Héteu, 2007 ; GU : graisses usagées — *second-hand fat* ; DBA : déchets du bananier — *wastes of banana plant* ; DMO : déchets ménagers organiques — *house organics wastes* ; MS : matière sèche — *dry matter*.

des générateurs. Cette énergie peut être récupérée par cogénération et exploitée pour le séchage des aliments qui, au Cameroun, sont traditionnellement séchés au feu de bois ou au soleil. Ainsi, les agriculteurs pourront se passer des aléas climatiques et du bois issu de la déforestation.

En tenant compte de la teneur moyenne du CH₄ dans le biogaz (60 %), sachant que la masse volumique du CH₄ est de 0,435 kg.l⁻¹, et considérant que la liquéfaction à -167 °C diminue d'environ 600 fois le volume initial, on obtient au final une production potentielle nationale en CH₄ épuré et liquéfié de 211,8 x 10⁶ l (92 133 tonnes). En tenant compte du Prébap, on aurait 376,6 x 10⁶ l (163 821 tonnes). Par hectare, nous avons 0,0106 x 10⁶ l (4,6 tonnes).

3.4. Production potentielle des pellets en comparaison avec la production potentielle du bioéthanol et du biométhane

Les pellets ou granulés de bois sont des bâtonnets cylindriques de biomasse lignocellulosique (BLC) compactée. Ils sont principalement issus du compactage des résidus de scierie tels que les sciures et les copeaux. Leur production à partir de la BLC de certaines plantes est pressentie comme une des solutions devant nous permettre de pallier à la déforestation massive constatée dans la plupart des pays tropicaux. Le procédé de production est très simple et pratique. Les

étapes couramment utilisées sont le déchiquetage, le broyage, l'humidification ou le séchage, la granulation par compactage et le refroidissement. La simplicité de production des pellets vient du fait que la matière première ne subit aucune transformation chimique. Néanmoins, une diminution de la teneur en cendres est nécessaire quand celle-ci s'avère trop élevée. De manière générale, le potentiel énergétique des pellets reflète le potentiel énergétique de la matière première de départ si les teneurs en eau sont identiques. Dans la mesure où la teneur en eau des pellets est d'environ 10 %, la production potentielle sera déterminée en tenant compte de ladite teneur. Avec une production de DBA estimée à 19,69 tonnes de MS·ha⁻¹, 402 750 tonnes sur le territoire national et 716 000 tonnes en tenant compte du Prébap, nous aurons une production potentielle de pellets estimée respectivement à 21,9 t·ha⁻¹, 447 500 tonnes et 795 556 tonnes.

En guise de comparaison des différents biocombustibles faisant l'objet de cette étude, le **tableau 5** présente les données récapitulatives relatives à la production potentielle desdits biocombustibles à partir des DBA. Il présente également les données de leur potentiel énergétique.

Il ressort de ces résultats que le potentiel énergétique annuel des déchets du bananier (1,95 milliards de kWh) sur l'étendue du territoire camerounais représenterait environ 50 % de la demande nationale actuelle d'électricité (3,957 milliards de kWh)². En prenant

Tableau 5. Données récapitulatives du potentiel de production et du potentiel énergétique des différents biocombustibles — *Summarized data of the potential production and the potential energy of different biofuels.*

Quantités de déchets de bananiers transformées (tonnes de matière sèche)	Biocombustibles ¹					
	Bioéthanol		Biométhane liquéfié		Pellets	
	Production potentielle (l ou t)	Potentiel énergétique (kWh ou KJ)	Production potentielle (l ou t)	Potentiel énergétique (kWh ou KJ)	Production potentielle (t)	Potentiel énergétique (kWh ou KJ)
19,69 ² (par ha) 4,6 t	0,0058 x 10 ⁶ l	0,0272 x 10 ⁶ kWh 97,92 x 10 ⁶ KJ	0,0106 x 10 ⁶ l 4,6 t	0,123 x 10 ⁶ kWh 442,8 x 10 ⁶ KJ	21,9	0,096 x 10 ⁶ kWh 345,6 x 10 ⁶ KJ
402 750 ³ (Territoire national)	118,4 x 10 ⁶ l 93 800 t	554,4 x 10 ⁶ kWh 1 995 840 x 10 ⁶ KJ	211,8 x 10 ⁶ l 92 133 t	1 262 x 10 ⁶ kWh 4 543 200 x 10 ⁶ KJ	447 500	1 950 x 10 ⁶ kWh 7 020 000 x 10 ⁶ KJ
716 000 ⁴ (Territoire national et Prébap)	210,5 x 10 ⁶ l 166 700 t	985,2 x 10 ⁶ kWh 3 546 720 x 10 ⁶ KJ	376,6 x 10 ⁶ l 163 821 t	2 245 x 10 ⁶ kWh 8 082 000 x 10 ⁶ KJ	795 600	3 470 x 10 ⁶ kWh 12 492 000 x 10 ⁶ KJ

¹ production potentielle et potentiel énergétique calculés à partir des données des **tableaux 3 et 4** — *potential production and potential energy calculated from data of table 3 and 4* ; ² matière sèche calculée à partir de la production des déchets de bananiers par hectare — *dry matter calculated from the wastes production of banana plant per hectare* (Reddy et al., 2003) ; ³ matière sèche calculée à partir de la production nationale de bananes et plantains (FAO, 2002 cité par Emaga et al., 2007) — *dry matter calculated from the national production of bananas and plantains* (FAO, 2002 cited by Emaga et al., 2007) ; ⁴ matière sèche calculée à partir de la production nationale de bananes et plantains et du projet Prébap débutant en 2011 — *dry matter calculated from the national production of bananas and plantains and the Prebap project starting in 2011.*

en compte le projet Prébap, ce potentiel couvrirait environ 88 % de cette demande.

L'estimation en litres de la production du biométhane nous permet d'établir une comparaison avec la production du bioéthanol. Compte tenu du contexte socio-économique du Cameroun, il serait peu réaliste d'envisager la liquéfaction et le stockage en bonbonne du biométhane produit à partir des déchets du bananier. La production d'électricité par cogénération à partir du biogaz produit serait plus appropriée. Il en est de même de la transformation des DBA en pellets. La production locale du bioéthanol à partir desdits déchets serait aussi intéressante si on parvient à maîtriser la technologie et à réduire les coûts d'exploitation.

4. CONCLUSION

Dans le souci de contribuer à la protection de l'environnement et au développement durable du Cameroun, le présent travail nous aura permis de mettre en exergue le potentiel énergétique des déchets de biomasse lignocellulosique du bananier produits et non valorisés sur l'étendue du territoire camerounais. Dans un contexte de changement climatique menaçant, d'industrialisation croissante, de démographie galopante, de menace de notre sécurité alimentaire, de déforestation massive et de réserves d'énergies fossiles limitées, les résultats obtenus montrent qu'une transformation de ces déchets en bioéthanol, biométhane et pellets serait bénéfique pour les pays producteurs de bananes et plantains en général et pour le Cameroun en particulier.

Parallèlement à la pollution biosphérique, le niveau de consommation d'énergies modernes (électricité et énergie fossile) au Cameroun est nettement inférieur à la moyenne africaine qui aussi, est largement en dessous de la moyenne mondiale. La demande énergétique sans cesse croissante est loin d'être satisfaite, alors que les sources de nouvelles énergies renouvelables y sont abondantes. En tant que premier pays africain producteur et exportateur de bananes, le Cameroun génère une importante quantité de déchets de biomasse lignocellulosique du bananier. Nous avons estimé la production actuelle de ces déchets à environ 402 750 tonnes de matière sèche. Avec le projet Prébap à moyen terme, nous

estimons cette production à 716 000 tonnes. Par hectare, nous obtenons 19,69 tonnes de matière sèche de déchets (rejets et rejets compris).

Sans tenir compte du Prébap, la conversion potentielle desdits déchets en biocarburants de seconde génération nous donnerait 93 800, 92 133 et 447 500 tonnes de bioéthanol, de biométhane et de pellets respectivement. Sans tenir compte de la production d'électricité par cogénération, les potentiels énergétiques qui découlent de cette conversion montrent qu'une éventuelle production des pellets (1950×10^6 KWh) serait énergétiquement plus bénéfique qu'une production du biométhane ($1262,6 \times 10^6$ KWh) et de l'éthanol ($554,4 \times 10^6$ KWh). Le rendement de production d'électricité à partir du biogaz étant techniquement d'environ 1/3, l'électricité produite annuellement (421×10^6 KWh) à partir du biogaz issu des déchets étudiés et sans tenir compte du Prébap, représenterait 10,6 % de la demande nationale actuelle en électricité. Les 2/3 d'énergie dissipée (842×10^6 KWh) seraient exploitées en cogénération pour le séchage des aliments.

Il découle de cette étude que l'énergie potentielle du biogaz issu de la fermentation méthanique des DBA représenterait au Cameroun environ 32 % de la demande nationale actuelle. Tenant compte du Prébap, cette énergie atteindrait environ 50 % de ladite demande.

Compte tenu des multiples usages de l'éthanol et de son prix sur le marché local (environ 1,5 Eur.l⁻¹), il serait économiquement plus rentable de transformer ces déchets en bioéthanol. Cependant, les investissements sont malheureusement élevés, c'est le cas de la société Biowanze en Belgique. Sur le plan environnemental, une transformation desdits déchets en biométhane permettrait non seulement de générer de l'électricité et de la chaleur par une cogénération mais aussi de fournir aux agriculteurs des digestats traités devant être utilisés comme engrais ou amendements agricoles. Comme tout processus de transformation énergétique des biomasses lignocellulosiques, le succès de la transformation des déchets du bananier en un des biocarburants mentionnés dans cette étude dépend aussi bien du rendement énergétique final que du bilan écologique.

Sur le plan pratique, il serait peut être difficile de réaliser la biotransformation de tous les déchets de biomasse lignocellulosique du bananier produits dans tout le pays. Mais en réalisant la conversion de seulement 30 % de cette biomasse, on soulagerait la biosphère, l'économie nationale à travers les créations d'emploi et une bonne partie de la population souffrant du déficit énergétique. Cette biotransformation serait évidemment en phase avec le développement durable du pays.

² Calculé à partir de la consommation d'électricité nationale de 2006 : 3,323 milliards de kWh (Central Intelligence Agency (CIA), <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-ctbook/geos/CM.html>, (13/07/2009)) et en tenant compte de la croissance de la demande annuelle (6 %) ; voir **Tableau 1**.

Liste des abréviations

AER : Agence d'Électrification Rurale
 CDC : *Cameroon Development Corporation*
 CIA : *Central Intelligence Agency*
 bep : baril équivalent pétrole
 BLC : Biomasse lignocellulosique
 CMF : Communautés de Microorganismes Fermentaires
 CS : Canne à Sucre
 DBA : Déchets du Bananier
 DEECC : *Development Energy Environment and Climate Change*
 DMO : Déchets Ménagers Organiques
 ESSE : Extraits de Sucres Solubles dans l'Eau
 EtOH : Éthanol
 GU : Graisses Usagées
 mfPAM : matière fraîche des Parties Morphologiques
 mfPAM_T : matière fraîche totale des Parties Morphologiques
 mfPE : matière fraîche de la Plante Entière
 MS : Matière Sèche
 msPAM : matière sèche des Parties Morphologiques
 msPAM_T : matière sèche totale des Parties Morphologiques
 PAM : Partie Morphologique
 PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
 PIB : Produit Intérieur Brut
 Prébap : Programme de reconversion économique de la filière banane plantain
 SONEL : Société Nationale d'Électricité du Cameroun (devenu AES-SONEL)
 SPM : Société des Plantations de Mbanga
 SSCF : *Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation*
 tep : tonne équivalent pétrole

Bibliographie

- Champion J., 1967. *Botanique et génétique des bananiers. Tome 1. Note et document sur les bananiers et leur culture*. Paris : IFAC, SETCO, 171-202.
- Didderen I., Destain J. & Thonart P., 2008. *Le bioéthanol de seconde génération : la production du bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique*. Gembloux, Belgique : Les Presses agronomiques de Gembloux.
- Emaga H.T. et al., 2007. Effects of the stage of maturation and varieties on the chemical composition of banana and plantain peels. *Food Chem.*, **103**, 590-600.
- FAO, 2006. *FAOSTAT statistics data base, agriculture*. Roma: FAO.
- Girod J., 1994. *L'énergie en Afrique : la situation énergétique de 34 pays de l'Afrique subsaharienne et du Nord*. Paris : Éditions Karthala.
- Héteu T.M.P., 2007. *Vade mecum technique de la biométhanisation de biomasse humide pour les installations de puissance inférieure à 10 MWh*. Namur, Belgique : Bureau d'études IRCO, adapté par DEECC Consulting (Pont-à-Celles, Belgique), [http://www.riaed.net/spip.php?article544&debut_brothers=20,\(18/05/2008\)](http://www.riaed.net/spip.php?article544&debut_brothers=20,(18/05/2008)).
- Lassoudière A., 2007. *Le bananier et sa culture*. Versailles, France : Éditions Quae.
- Naessens W., 2008. *Definition of business strategy for wood pellets production in Belgium*. Bertrix, Belgique : Énergies Renouvelables des Ardennes (ERDA S.A.), [http://www.clusters.wallonie.be/servlet/Repository/cliquez-ici.pdf?IDR=31295&saveFile=true,\(06/04/2009\)](http://www.clusters.wallonie.be/servlet/Repository/cliquez-ici.pdf?IDR=31295&saveFile=true,(06/04/2009)).
- Nkue V. & Njomo D., 2009. Analyse du système énergétique camerounais dans une perspective de développement soutenable. *Rev. Énergie*, **588**, [http://cameroun-foret.com/system/files/20_01_04.pdf,\(19/07/2011\)](http://cameroun-foret.com/system/files/20_01_04.pdf,(19/07/2011)).
- Oliveira L. et al., 2007. Chemical composition of different morphological parts from "Dwarf Cavendish" banana plant and their potential as non-wood renewable source of natural products. *Ind. Crops Prod.*, **26**, 163-172.
- Ongono P., 2009. *Energy consumption and economic performance in Cameroon*. Yaounde: University of Yaounde II, Faculty of Economics and Management, [http://mpa.ub.uni-muenchen.de/23525/1/MPRA_paper_23525.pdf,\(09/07/2011\)](http://mpa.ub.uni-muenchen.de/23525/1/MPRA_paper_23525.pdf,(09/07/2011)).
- Polyamozhi S.V. & Kardivel R., 1986. The value of banana stalk as a feed for goats. *Anim. Feed Sci. Technol.*, **15**, 95-100.
- Reddy V.G. et al., 2003. Utilization of banana waste for the production of lignolytic and cellulolytic enzymes by solid substrate fermentation using two *Pleurotus* species (*P. ostreatus* and *P. sajor-caju*). *Process Biochem.*, **38**, 1457-1462.
- Reith J.H. et al., 2001. Co-production of bioethanol, electricity and heat from biomass wastes: potential and R&D issues. In: *1st European Conference on Agriculture and Renewable Energy, 6-8 May 2001, RAI, Amsterdam, The Netherlands*. Petten, The Netherlands: Netherlands Energy Research Foundation.
- Subramanian R.P., Kardivel R., Viswanathan K. & Chandrasekaran D., 1988. *In vitro* studies and short-term feeding trial in lambs to evaluate plantain sheath (*Musa sapientum*) as a feed for ruminants. *Anim. Feed Sci. Technol.*, **20**, 343-348.
- Uma S., Kalpana S., Sathiamoorthy S. & Kumar V., 2005. Evaluation of commercial cultivars of banana (*Musa* spp.) for their suitability for the fibre industry. *Plant Genet. Resour. Newsl.*, **142**, 29-35.
- Van Thuijl E., Roos C.J. & Beurskens L.W.M., 2003. *An overview of biofuel technologies, markets and policies in Europe. Projet ECN-C--03-008*, [http://www.ecn.nl/docs/library/report/2003/c03008.pdf,\(02/03/2009\)](http://www.ecn.nl/docs/library/report/2003/c03008.pdf,(02/03/2009)). Amsterdam, The Netherlands: Energy Research Centre of the Netherlands.
- Vargas A. & Sandoval A.J., 2005. Évaluation agronomique de production et de qualité de 'Yangambi km 5' (AAA) et de 'Dàtil' (AA). *InfoMusa*, **14**(1).
- Viswanathan K., Kardivel R. & Chandrasekaran D., 1989. Nutritive value of banana stalk (*Musa cavendishi*) as

- a feed for sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.*, **22**, 327-332.
- Wandji F.D.Y., 2007. *Le Cameroun et la question énergétique*. Paris : Éditions l'Harmattan.
- Wyman C.E., 1999. Biomass ethanol: technical progress, opportunities, and commercial challenges. *Annu. Rev. Energy Environ.*, **24**, 189-226.
- Zaldivar J., Nielsen J. & Olsson L., 2001. Fuel ethanol production from lignocellulose: a challenge for metabolic engineering and process integration. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **56**, 17-34.

(22 réf.)