

CHAPITRE 3

LA FILIERE BIOMASSE ENERGIE AU CAMEROUN

3.1. La conversion énergétique de la biomasse

Les combustibles solides, qu'ils soient fossiles ou de biomasse, sont de loin les plus abondants sur notre planète. Leur mise en œuvre remonte à la maîtrise du feu par l'homme et le bois de chauffe ou de cuisson des aliments constitue encore à ce jour l'application la plus répandue, souvent la moins performante au plan énergétique, mais néanmoins la plus vitale pour une grande partie de l'humanité. Pour beaucoup de pays africains, la biomasse représente souvent près de 90% du bilan énergétique global.

La conversion énergétique de la biomasse permet de récupérer l'énergie dégagée par l'oxydation du combustible. Dans son état brut, l'exploitation de la biomasse comme combustible n'est pas aisée. Néanmoins, une première transformation permet d'obtenir des combustibles plus usuels, aisément utilisables dans les moteurs, les chaudières ou les turbines, qu'ils soient sous forme :

- solide, comme les pellets, les plaquettes, les poudres, etc.,
- liquide, comme l'éthanol, le biodiesel, les huiles pyrolytiques,
- ou gazeuse, comme les gaz de décharge, le biogaz, le gaz de bois ou d'autres résidus.

Cette transformation peut être de type thermochimique, biochimique ou mécanique : le choix est fonction du type et de la quantité de biomasse disponible, de la forme d'énergie finale souhaitée, des conditions économiques et environnementales, etc ...

La figure 3.1. présente les trois principaux groupes de technologies de conversion énergétique de la biomasse et les formes d'énergie finale qui en résultent. Il s'agit :

- des procédés de conversion thermochimique (combustion, gazéification, pyrolyse) pour la biomasse sèche,
- des procédés de conversion biochimique (digestion, fermentation) généralement pour les biomasses humides,
- de l'extraction qui est un procédé mécanique permettant de produire les huiles, par exemple, du bio diesel à partir du colza ou du pourghère.

L'objectif de ce paragraphe est la présentation succincte et l'analyse des performances et caractéristiques des technologies associées à ces procédés. Compte-tenu de l'orientation de ce travail, principalement axé sur l'amélioration du taux d'accès à l'électricité en milieu rural camerounais et l'approvisionnement énergétique des entreprises de transformation de bois, les filières de conversion thermochimique retiendront notre attention et en particulier la gazéification fera l'objet d'une investigation plus poussée (§.3.3, 3.4 et 3.5). Ce choix est d'autant plus conforté par le fait que les groupes gazo-électrogènes offrent le meilleur rendement électrique pour les niveaux de puissance requis en production décentralisée aussi bien pour l'alimentation des entreprises isolées que pour les mini-réseaux publics (tableau 3.2).

Néanmoins, la problématique des déchets urbains (500 tonnes par jour à Yaoundé et environ 1000 tonnes par jour à Douala) et de l'assainissement des eaux usées des abattoirs et de certaines industries agroalimentaires nous interpelle et invite à étudier la contribution potentielle de la biométhanisation à la diminution de la pointe électrique toujours croissante en milieu urbain (chapitre 4).

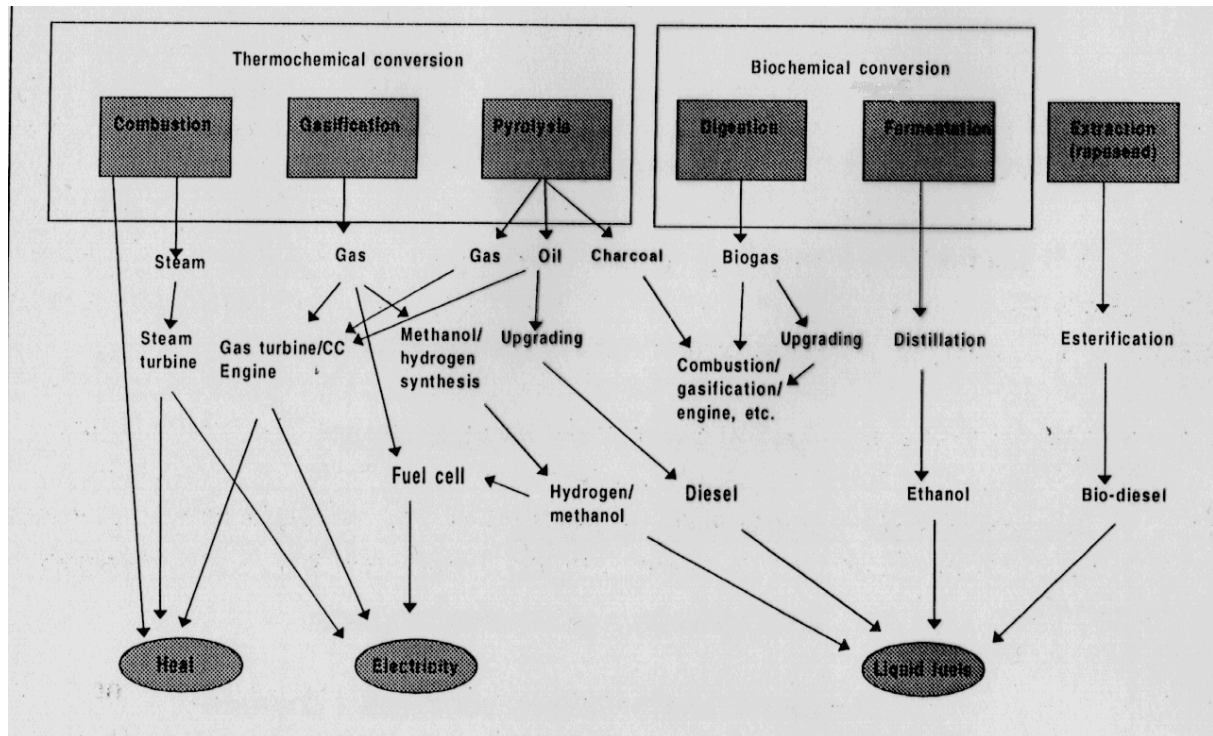
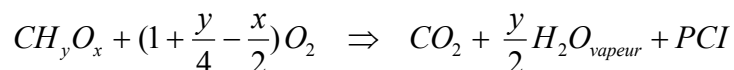


Figure 3.1. Les technologies de conversion énergétique de la biomasse (Faaij, 1997).

3.1.1. La conversion thermochimique de la biomasse

Les réactions fondamentales des procédés de conversion thermochimique de la biomasse ligno-cellulosique font intervenir le carbone C comme réactif, et se basent sur l'oxydation de ce combustible :



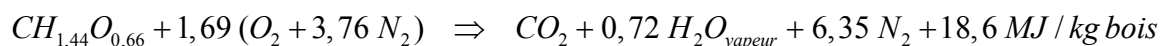
Elle fait apparaître la formule générale de la biomasse (CH_yO_x) et l'apport d'oxygène. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) d'un combustible peut être calculé à partir de la formule :

$$PCI_{CH_yO_x} \approx 393500 + 102225 y - \frac{x}{1 + 0.5y} (110100 + 102225 y) \quad (kJ/kmole)$$

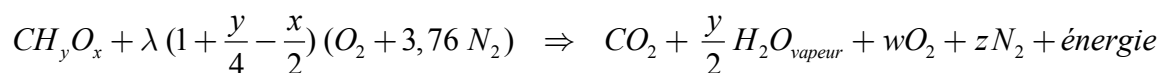
Appliquée à un combustible ligno-cellulosique de composition $CH_{1,44}O_{0,66}$ hors cendres, cette formule donne la valeur

$$PCI = 441971 \text{ kJ/kmole} = 18415 \text{ kJ/kg}.$$

Tenant compte du fait que l'oxygène utilisé provient le plus souvent de l'air ambiant, cette équation devient :



L'oxydation complète d'un kg de bois sec dégage ainsi 18,6 MJ, valeur diminuée par la présence des cendres. Toutefois, le volume d'air apporté au processus de conversion n'est pas toujours égal au volume d'air stœchiométrique strictement nécessaire à l'oxydation complète du combustible. Il convient alors de définir le coefficient d'excès d'air λ qui est le rapport entre la quantité d'air réellement utilisée et la quantité stœchiométrique et le prendre en compte dans la formulation des réactions de conversion. Il vient :



Ce coefficient λ est très déterminant et sa valeur varie selon les procédés tels que décrits dans le tableau 3.1.

Procédé	Excès d'air	Température	Produit principal	Principales utilisations possibles
Combustion	$\lambda > 1$	800-1300 °C	gaz d'échappement chauds	Production d'eau chaude, de vapeur ou de gaz chauds, y compris pour la production d'électricité
Gazéification	$0.2 < \lambda < 0.5$	700-900 °C	gaz à PCI faible à moyen	gaz combustible pour moteurs à gaz et dual-fuel, turbines à gaz et piles à combustible
Pyrolyse - carbonisation	$0 < \lambda < 0.2^*$	400-700 °C	huiles pyrolytiques, liquide PCI moyen	carburants pour moteurs Diesel ou pour turbines à gaz. Production de charbon de bois

Tableau 3.1 : Principes de base des transformations thermochimiques de la biomasse

La **combustion** est largement utilisée pour convertir une grande quantité de biomasse en chaleur et/ou en électricité par le biais des cycles à vapeur. Le processus de combustion comprend 2 phases :

- La volatilisation et la combustion en phase gazeuse : au fur et à mesure que la température de la biomasse croît, la matière volatile est libérée sous forme d'un mélange de vapeur d'huile et de goudrons dont la combustion suscite la flamme visible autour de la particule.
- Puis vient la combustion en phase solide où le charbon de bois, principalement composé de carbone, réagit avec l'oxygène pour produire du CO_2 alors que la matière inerte se transforme en mâchefer ou cendres.

La quantité d'air doit être contrôlée car si elle est

- insuffisante, la combustion est incomplète et il y a production d'un gaz toxique, le CO ;
- excédentaire, elle emporte une partie de la chaleur dans les fumées.

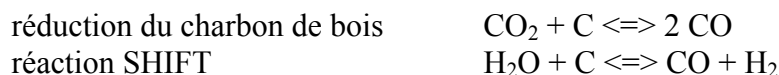
Le principe de la **pyrolyse** consiste à décomposer thermiquement (400-700°C) et en absence d'air la biomasse jusqu'à la libération de la matière volatile. Le résidu obtenu est le charbon en cas de pyrolyse conventionnelle ou pyrolyse lente (si l'opération a lieu dans les fours de carbonisation) ou les huiles pyrolytiques si l'opération a lieu dans les pyrolyseurs flash. La conversion de la biomasse en huiles pyrolytiques fait l'objet de nombreuses expérimentations et les rendements peuvent atteindre 70%.

La **gazéification** est la conversion thermochimique par oxydation partielle de la biomasse à haute température en un gaz. L'opération peut être scindée en 3 phases :

- le séchage dans la partie supérieure du gazogène : à partir de la température du milieu, il permet d'évaporer l'humidité résiduelle ;
- la pyrolyse : la biomasse solide chauffée à 300-500°C en une quasi absence d'air pyrolyse et produit du charbon, des goudrons et des gaz ;

- la gazéification proprement dite : les produits de pyrolyse vont réagir avec l'agent oxydant -air- pour produire un gaz de PCI 5-6MJ/Nm³ composé de CH₄, CO, H₂, CO₂, N₂, de fines particules de poussières et de goudrons.

En plus des réactions de carbonisation, on observe la réduction du charbon en CO et la production d' H₂ par la réaction de shift :



Le gaz pauvre ainsi obtenu peut être utilisé après épuration et refroidissement dans les turbines ou moteurs pour la production d'électricité et/ou chaleur ou comme gaz de synthèse pour la production des produits chimiques (ex. méthanol, hydrogène).

Le tableau 3.2 résume les performances, les secteurs d'application et une approximation de l'investissement des principales technologies de conversion énergétique de la biomasse sèche.

Secteur	Technologie	Puissance	Combustible accepté	Rendement net	Investissement
				élec.	
Domestique	Poêles		bûches, granulés	15-75%	-
	Chaudières		bûches, granulés, chips	70-90%	-
Chauffage collectif et PME	Chaudières		sciures, chips,...	80-100%	-
	Groupes gazo-électrogènes	0.1 à 0.5 MW _e	chips,...	50-60%	20-26% 1500-4000 EUR/kW _{el}
Production d'électricité centralisée	Cycles à vapeur	> 3...5 MW _e	sciures, chips, écorces,...	50-75%	15-35% 1000-5500 EUR/kW _{el}
	Co-combustion	> 5 MW _e	sciures, chips, écorces,...	35-45%	600-1200 EUR/kW _{el}
	Cycles à gaz	> 5 MW _e	sciures, chips, écorces,...	30-50%	1000-5500 EUR/kW _{el}

Tableau 3.2: Performances et caractéristiques des technologies de conversion thermochimique de la biomasse

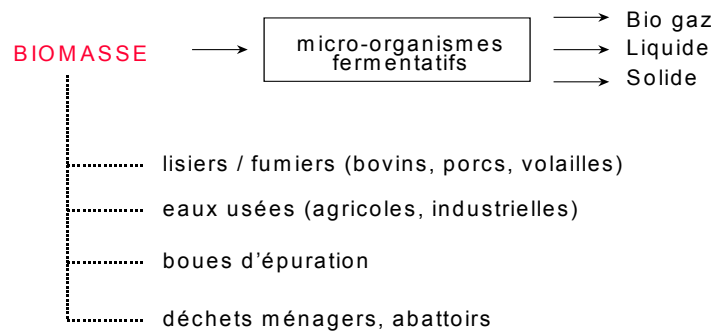
3.1.2. La conversion biochimique de la biomasse

La conversion biochimique de la biomasse est un processus naturel de décomposition par action des bactéries. Mais elle peut être contrôlée de façon à obtenir un combustible facilement exploitable. Deux filières de conversion biochimique de la biomasse sont particulièrement intéressantes :

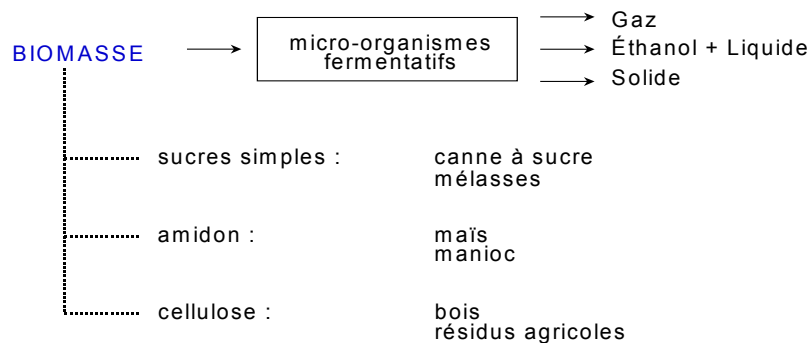
- la biométhanisation pour la production du biogaz,
- la fermentation alcoolique pour la production de carburant.

La **biométhanisation ou digestion anaérobie** consiste en la biodégradation de matières organiques en absence d'air, sous l'action de communautés microbiennes, conduisant à la production d'un gaz appelé biogaz, essentiellement composé de méthane (CH₄) et de gaz carbonique (CO₂), qui peut être récupéré à des fins énergétiques. La biométhanisation présente l'avantage de pouvoir traiter les matériaux humides, peu intéressants pour les voies de conversion thermochimique, ou les liquides problématiques pour le compostage. Outre la production de méthane convertible en électricité, chaleur et force motrice, la biométhanisation présente un intérêt pour son action d'épuration dans la mesure où les substrats organiques

constituant les inputs sont des déchets dont on veut se débarrasser. Elle apporte de la valeur ajoutée à des « déchets » en les transformant en produits valorisables : compost riches en éléments nutritifs (N, P, oligo-éléments) et en humus, effluent liquide fertilisant. La biométhanisation permet une réduction des émissions de gaz à effet de serre pour autant que le méthane produit soit brûlé. Elle peut apporter une solution dans les grandes agglomérations parce qu'elle peut à la fois renforcer la couverture de la pointe électrique et contribuer au traitement des eaux usées, des déchets ménagers et des résidus des industries agroalimentaires. Les applications en milieu rural sont nombreuses en Chine et des projets de vulgarisation en Guinée ont donné des résultats et perspectives intéressants, surtout pour l'électrification et l'approvisionnement énergétique des concessions ou habitations groupées.



La **fermentation alcoolique** relève du même principe sauf que les substrats sont à haute teneur en glucides, l'objectif de la transformation étant la fermentation de ces sucres pour la production d'alcools, principalement l'éthanol et ses dérivés. Le biogaz devient un co-produit et peut être valorisé pour la satisfaction de certains besoins énergétiques. Les alcools issus de la fermentation sont souvent utilisés comme combustibles liquides dans les véhicules à moteurs.



3.2. Ressources et potentiel en biomasse

Il s'agit dans ce paragraphe de faire l'inventaire des ressources en biomasse disponibles au Cameroun, de les classer en catégories et d'en évaluer le potentiel. La biomasse au Cameroun est essentiellement constituée des rémanents forestiers, des résidus de transformation de bois, des résidus agricoles et des industries agroalimentaires. Pour chaque catégorie, l'évaluation du potentiel est effectuée dans le cadre de ce travail en se basant sur le degré d'utilisation, lorsqu'il est connu. Il s'agit du ratio ou coefficient représentant le rapport entre la quantité de résidus et celle du produit à l'état brut, c'est-à-dire avant le processus de transformation.

Si a désigne ce coefficient ou ratio, Q_b la quantité de produit à l'état brut, Q_n la quantité de produit noble et Q_r la quantité de résidu, il convient d'écrire :

$$Q_r = a \cdot Q_b \quad \text{ou} \quad Q_r = \frac{a}{1-a} Q_n$$

Le potentiel net de résidus disponibles pour une valorisation énergétique sera évalué sur base de la différence entre la production brute de résidus et les utilisations actuelles.

3.2.1. Ressources forestières

Le secteur forestier joue un rôle énorme dans l'économie camerounaise. L'importance de l'exploitation forestière dans ce pays s'est chiffrée, en l'an 2000, par la contribution à près de 25% de la valeur des exportations et 7% du PIB (Fomété, 2001). Les diverses réformes entreprises dans le secteur au début des années 1990 ont abouti, en 1992, à la création du Ministère de l'environnement et des forêts et, sur le plan juridique, à la promulgation de la loi n°94/01 du 24 janvier 1994 portant sur le régime des forêts, de la faune et de la pêche et qui fixe les objectifs nationaux en matière de politique forestière :

- une gestion rationnelle et durable des ressources forestières ;
- une industrie de transformation efficace et à forte valeur ajoutée ;
- une création et distribution équitable des revenus générés par une plus grande implication des communautés locales.

Deuxième plus grande réserve d'Afrique après la République Démocratique du Congo, la forêt camerounaise couvre de 22 (Djeumo, 2001) à 26 millions d'hectares (MINEF, 1992) dont 17,5 millions essentiellement occupés par la forêt dense sont économiquement exploitables. Le couvert végétal restant est constitué de forêts dégradées, de savanes humides (pluviométrie supérieure à 1200-1300 mm/an), de savanes sèches ou encore d'altitude. Les inventaires réalisés entre 1980 et 1990 ont couvert 14 millions d'hectares de forêt dense qui font l'objet d'un plan de zonage avec un potentiel de bois sur pied estimé à plus d'un milliard de mètre cube (m³) sur trois cents essences répertoriées (AMIE, 2001). Parmi celles-ci, une soixantaine d'essences font l'objet d'une exploitation commerciale dont une vingtaine de façon systématique et le reste au gré de la conjoncture. Six millions d'ha sont classés en Domaine forestier permanent destiné principalement à la production de bois d'œuvre suivant un plan d'aménagement dont la rotation a été fixée à 30 ans. La possibilité annuelle de coupe officielle est de 3,5 millions m³, sur la base de 19 essences, exploitées à hauteur de 15 m³/ha en moyenne dans les Unités forestières d'aménagement (UFA), et de 5 m³/ha dans les ventes de coupe (Fomété, 2001). Ce volume équivaut en tenant compte des densité moyenne (tableau 3.3) au potentiel en biomasse ligneuse théoriquement exploitable de 300 millions de tonnes par an dont Millington (1994) résume la distribution dans le tableau 3.4. Le volume sur pied est défini comme la biomasse ligneuse hors sol séchée à l'air tandis que le volume exploitable est défini comme la croissance moyenne annuelle de la biomasse ligneuse hors sol séchée.

Type de bois	Densité moyenne après séchage à l'air (tonnes/m ³)
Forêt claire à <i>Acacia-Commiphora</i>	0,6
Forêt claire de type <i>miombo</i> à <i>Brachystegia-Julbernardia</i>	0,9
Forêt tropicale	0,65
Forêt claire sud africaine	0,6

Tableau 3.3 : Masses volumiques des biomasses forestières.

Selon Amie (2001), la production forestière camerounaise a régulièrement augmenté depuis 20 ans pour atteindre de nos jours un régime de croisière qui semble se stabiliser aux environs de 2,5 millions de mètres cubes de grumes par an.

Type de couvert végétal		Superficie (km ²)	Volume sur pied (x 1000 tonnes)	Volume exploitable (x 1000 tonnes/an)
0	Désert	105	0	0
1	Formation herbeuse			
12	hydromorphique	2687	610	27
	<i>Sous-total</i>	2687	610	27
2	Formation herbeuse boisée			
21	semi-désertique	105	35	1
22	à acacia	2635	870	26
23	de plateau	790	261	8
	<i>Sous-total</i>	3530	1165	35
4	Formation buissonnante et fourré			
41	à <i>Acacia-Commiphora</i> et fourré secs	158	220	3,3
43	à <i>Acacia-Commiphora</i> et fourré humides	632	1069	14
44	boisée sahélo-soudannienne à <i>Acacia</i>	10961	1545	384
	<i>Sous-total</i>	11751	2834	400
5	Mosaïque de biomasse ligneuse basse			
52	est-africaine	685	1473	43
	<i>Sous-total</i>	685	1473	43
6	Forêt claire			
62	soudanienne sèche	34779	92860	2678
63	soudano-éthiopienne et fourré	685	1829	30
64	soudanienne	21974	58671	1011
65	soudanienne humide	65289	174322	3134
	<i>Sous-total</i>	122727	327681	6853
7	Mosaïque de biomasse ligneuse haute			
73	forêt dense remaniée et de cultures	42525	71612	808
74	forêt claire guinéenne	59915	100897	1138
	<i>Sous-total</i>	102440	172509	1946
8	Forêt dense			
81	mangrove	8906	219800	26264
84	forêt dense de montagne	53	525	21
85	mésophile tropicale humide	88370	1129192	130788
86	marécageuse tropicale humide	45792	585130	67772
87	ombrophile tropicale humide	62750	658185	92870
	<i>Sous-total</i>	205871	2592832	291451
	Lacs	2161	0	0
	Total	451957	3099104	300755

Tableau 3.4 : Récapitulatif de la biomasse ligneuse au Cameroun (Millington et al., 1994).

3.2.2. Les rémanents forestiers

Il s'agit des parties arbustives non valorisables par les industries de première transformation, principalement la cime et les branches de diamètre inférieur à 8 cm, et donc laissées en forêt.

Elles représentent, selon le type de bois, 25 à 30% du volume récolté. A cela peuvent s'ajouter les souches et racines (~ 25% du volume récolté), les arbres défectueux, les arbustes endommagés ou abattus en même temps que le peuplement principal. En effet, l'exploitation forestière au Cameroun utilise encore la technique de la tronçonneuse à chaîne, avec ébranchement et découpe sur place. Le débardage s'effectue avec un tracteur et une remorque équipée ou non d'un grappin jusqu'à une route carrossable, à partir de laquelle le bois est évacué par camion vers les centres de consommation. Alors que le potentiel de la cime et des branches peut être déduit du volume des grumes récoltées, il est souvent difficile d'évaluer celui des arbres défectueux et des arbustes endommagés ou abattus en même temps que le peuplement principal. Si l'on considère une production annuelle de 2,5 millions de m³ de grumes, on peut estimer les cimes et branches à 625.000 – 750.000 m³, les souches et racines à environ 625.000 m³, ce qui fait plus de 1,2 à 1,4 millions de m³ de rémanents forestiers chaque année, soit environ **600 à 700.000 tonnes**.

Une évaluation plus simple considère que dans une exploitation classique, les forêts tropicales comportant 275 m³ à l'hectare de bois d'œuvre permettent de récolter 0,2 tonnes de résidus anhydre par mètre cube de bois d'œuvre (Laclavère, 1980), ce qui donne un potentiel annuel d'environ **500.000 tonnes**. Mais compte tenu de la dispersion et de la grande hétérogénéité des résidus ainsi que des difficultés de travail en forêt, la valorisation ne serait-ce que d'une partie de ces résidus d'exploitation forestière nécessitera une main d'œuvre et des investissements importants. Le potentiel énergétique ainsi disponible est très important bien que la rentabilité pourrait être compromise par le coût élevé du conditionnement et du transport, mais on peut espérer que le développement des forêts communautaires en favorisera la valorisation.

3.2.3. Résidus de l'industrie de transformation du bois

La transformation du bois génère une grande quantité de résidus (tableau 3.3 et 3.4) dont les propriétés physico-chimiques et énergétiques sont très diversifiées. Le nombre croissant d'industries de bois et l'augmentation des volumes transformés depuis 1996/1997 traduisent l'essor de l'industrie camerounaise de première transformation du bois. La mise en application de la loi interdisant l'exportation des grumes, entrée en vigueur à la fin de l'année 1999, a renforcé l'activité de transformation de bois, augmentant ainsi la disponibilité des résidus. Ce phénomène est confirmé dans l'enquête réalisée par le CERNA en 1999 qui a permis de recenser 87 usines dont 66 en activité au moment de l'enquête. Des 21 usines arrêtées pendant l'enquête, 6 ont fait l'objet de fiches monographiques aussi bien que celles en activité. La répartition des usines par type de transformation est résumée dans le tableau 3.5.

On distingue dans ce secteur d'activité deux grands groupes d'industries :

- les industries de première transformation, essentiellement composées d'industries de tranchage, de déroulage et de sciage de bois ;
- les industries de seconde et troisième transformation, qui utilisent les bois déjà usinés.

Cette catégorie de résidus est à priori d'un intérêt particulier du fait de leur concentration sur le site et de leur disponibilité liée au régime permanent de production de ces industries, ce qui facilite leur manutention et leur transport et leur adéquation éventuelle aux besoins d'énergie et peut favoriser aussi une activité permanente de valorisation.

La capacité de transformation est passée de 1,2 millions de m³ en 1993/1994 à 2,68 millions de m³ pour l'exercice 1999/2000. Pendant la même période, le volume transformé est passé de 1 à 2,32 millions de m³ alors que le nombre d'usines actives passait de 38 à 66. L'industrie

de transformation du bois au Cameroun devient ainsi, en terme de volume de grumes transformées, la première d'Afrique centrale et de l'ouest devant la Côte d'Ivoire dont l'industrie de transformation n'a guère consommé plus de 2 millions de m³ par an ces dernières années. Cette période a été aussi marquée par des changements dans la localisation et le mode d'approvisionnement des usines et une amorce de changement dans le type de transformation, impliquant une augmentation du rendement matière, du contenu du travail et de l'intensité en capital de la transformation. L'arrêt des exportations de grumes suite à la loi n° 94-01 du 20/01/1994 entrée en vigueur le 01/7/99 permet, à moyen terme, d'augmenter les capacités de transformation de manière à absorber les grumes auparavant exportées. Le nombre et la capacité de transformation des scieries avec séchoirs, des scieries intégrées à un atelier de menuiserie industrielle et d'usines de déroulage est en augmentation sensible et devrait s'amplifier dans les années à venir en raison de l'existence de nombreux projets à l'étude.

En conclusion, les 5 années de préparation à la mesure d'interdiction d'exportation des grumes n'ont pas seulement été marquées par l'augmentation spectaculaire des capacités de transformation, mais aussi par des changements dans la localisation et le mode d'approvisionnement des usines. Ainsi, 46% de la capacité nationale de transformation est située en milieu urbain, raccordée au réseau électrique contre 37% (1,2 millions de m³) avant 1994 alors que 30% des grumes consommées par les 66 usines en activité (50% pour les 39 usines situées en milieu urbain) proviennent du marché local et non de permis forestiers appartenant aux usines contre 25% (resp. 43%) pour les usines construites avant 1994. La valorisation des résidus pour la production d'électricité contribuerait à soutenir la pointe du réseau en milieu urbain et diminuerait la fréquence des délestages.

Résidus de l'industrie de la première transformation

Il n'est pas aisé de déterminer les résidus issus des industries de transformation du bois étant donné la rétention de l'information pratiquée par celles-ci, sans doute parce que l'activité n'est pas toujours saine dans ce secteur. Certaines évaluations se font à partir du rendement matière comme dans le tableau 3.5 et de la quantité de bois transformé. Le rendement matière d'une usine est défini comme le rapport entre la quantité de produit fini et la consommation en grumes de l'usine. On constate qu'il est plus bas dans les scieries simples que dans les usines de tranchage.

Type de transformation	Nombre d'usines	Capacité de transformation [m ³]	Rendement matière en 1997/1998
Scieries simples	37	1187000	32%
Scieries avec séchoirs	8	288000	33%
Usines de déroulage, contreplaqué	7	370000	50%
Usines de tranchage	1	42000	55%
Scieries avec atelier de menuiserie intégrée	13	792000	36%
Ensemble des usines	66	2679000	36%

Tableau 3.5 : Répartition des usines de transformation de bois au Cameroun (1997/1998).

Le volume roulé désigne le volume abattu moins le volume de grumes abandonné en forêt, qui peut selon le type de bois atteindre 25 à 50% du volume abattu. Le taux de transformation désigne le rapport entre le volume de grumes transformées dans un pays et le volume des

grumes récoltées (volume roulé). Il est souvent utilisé par les pays africains producteurs comme critère d'appréciation du niveau d'industrialisation du secteur de bois d'un pays.

En 1998, l'activité a généré 1.710.900 m³ de résidus, soit environ 855.500 tonnes, en supposant une masse volumique moyenne de 500 kg/m³. Carre et al (1992) proposent des ratios en fonction du type de résidus pour l'évaluation des résidus de première transformation (tableau 3.6).

Industrie de 1 ^{ère} transformation	Type de résidus	% du volume initial
Sciage	Ecorces	7 à 15
	Dosses et délignures	25 à 40
	Sciure	7 à 12
Déroulage	Mise à dimension des grumes	4 à 12
Tranchage	Ecorce	10 à 11
Contreplaqué	Noyaux de déroulage	4 à 5
	Résidus de placage humide	24
	Résidus de placage sec	8 à 9
	Poussières de ponçage, sciure	4 à 5
Pieux tuteurs	Ecorce, Pointes, mise à dimension	15 à 20

Tableau 3.6 : Quantité de résidus générés par l'industrie de première transformation
(Carre et al ; 1992)

Le tableau 3.7 donne la répartition des résidus des industries de première transformation.

Type de résidus	Résidus en m3		Résidus en tonnes	
Ecorces	142730	301890	64229	135851
Dosses et délignures	494750	791600	296850	474960
Noyau de déroulage	29600	62900	14800	31450
résidus de placage	118400	122100	59200	61050
poussière de ponçage, sciure	153330	255980	61332	102392
TOTAL	938810	1534470	496411	805703

Tableau 3.7 : Répartition des résidus des industries de première transformation du bois au Cameroun

Certaines entreprises récupèrent les chutes pour la fabrication des parquets et des aboutés. Une partie des déchets alimente les petites scieries et les menuiseries locales. Bien que la quantité restante soit encore très importante, il est difficile de l'estimer avec précision. Le tableau 3.8 résume l'utilisation des déchets par les entreprises. Les chiffres ont été corrigés et adaptés de ESMAP/MINMEE (1991).

On en déduit la quantité des résidus jetés ou brûlés et ceux distribués qui pourraient être disponibles à un coût nul pour une valorisation énergétique (tableau 3.9).

	jetés ou brûlés	convertis à des fins énergétiques	Vendus	distribués gratuitement
chutes, dosses, délignures	20%	15%	38 %	27 %
Sciures	40 %	11 %	20 %	29 %

Tableau 3.8 : Utilisations actuelles des résidus de bois au Cameroun

Type de résidus	Volume en m3	Masse en tonnes
Ecorces	67 083 – 141 888	30 187 – 63 850
Dosses et délignures	232 533 – 372 052	139 520 – 223 231
Noyau de déroulage	13 912 – 29 563	6 956 – 14 782
Résidus de placage	55 648 – 57 387	27 824 – 28 694
Sciure, poussière de ponçage	72 065 - 120311	28 826 – 48 124
Total	441 241 - 721201	233 313 – 378 670

Tableau 3.9 : Evaluation des résidus potentiels de la première transformation par catégorie.

Le potentiel brut disponible varie donc de **233.313** à **378.670** tonnes. Dans les résidus de placage, une grande partie provient des processus humides et ne sont pas convertibles en énergie sans un séchage préliminaire. Les sciures et poussières de ponçage ne sont pas indiquées pour la gazéification, à moins d'être pelletisées auparavant, mais peuvent bien convenir à une combustion dans les chaudières. Il vient un potentiel net de biomasse gazéifiable avec un coût énergétique acceptable, compris entre **176.663** et **301.862 tonnes**, soit en équivalent énergie primaire **3180** à **5434 TJ**.

Résidus de l'industrie de la seconde transformation

Les industries de seconde transformation sont principalement les menuiseries, les paletteries et parquetteries. Les rendements habituellement rencontrés sont donnés dans le tableau 3.10 mais du fait de leur emplacement dans ou aux abords des centres urbains, les résidus sont tous valorisés par les ménages pour la cuisson des repas au point qu'en terme de production d'électricité, ils ne pourraient être comptabilisés.

Type de transformation	Rendement (%)	Type de résidus (%)	
		Gros	Fin
Meubles massifs	50-60	73	27
Sièges	50-55	54	46
Menuiseries industrielles	80	38	62
Menuiseries	60	68	32
Palettes	80		
Parquets	40		

Tableau 3.10 : Résidus par type d'industrie de seconde transformation (Amié , 2001).

3.2.4. Les résidus agricoles

La majorité de la population camerounaise se nourrit des produits de l'agriculture et les cultures à finalité alimentaire ou industrielle laissent généralement un résidu sur les champs,

le plus souvent valorisé par l'agriculteur, soit par enfouissement pour améliorer ou maintenir la productivité du sol, soit à d'autres usages comme l'alimentation du bétail ou encore comme combustible. Dans le tableau 3.11, la FAO et Lequeux donnent les informations permettant l'évaluation des résidus générés par les cultures agricoles, leur pouvoir calorifique et leur densité.

Culture	Type de rendement	Rendement (t/ha)	Rapport produit noble/ résidu	Matière minérale (%)	PCI (MJ/kgMS)	Masse volumique (kg/m ³)
Arachide	Faible Moyen Élevé	0,2 1,0 1,9	Paille : 2,3 Coque : 0,5	9,3 à 13,0 1,9 à 4,0	17,8	80
Coton	Moyen	1,0	Tiges : 3,5 à 5,0	4 à 17	17,2	180
Maïs	Faible Moyen Élevé	0,8 1,9 4,6	Tiges : 2 à 2,5 Rafles : 0,2 à 0,25	3,8 2 à 7	17,4 17,3	130 à 230
Millet	Faible Moyen Élevé	0,4 0,7 1,7	Paille : 2,0			
Riz	Faible Moyen Élevé	0,9 3,0 5,1	Paille : 1,75 - 4	17 à 19,2	10,2	150
Sorgho	Faible Moyen Élevé	0,3 1,2 3,4	Tiges : 2,0 – 2,5			
Noix de coco			Bourre : 1,6 à 4,5 Coque : 0,7 à 1,1	7,0 15,0	14,8 15,0	65 640

Tableau 3.11 : Résidus agricoles de quelques cultures en fonction du niveau de production
(FAO, 1983 ; Lequeux et al, 1990).

Toutefois, certains résidus comme les tiges de cotonniers n'ont pas d'utilisation ou et sont tout simplement brûlés sur les champs. Dans ces cas, leur valorisation énergétique peut être envisagée. Les résidus agricoles constituent ainsi un sous-produit de l'agriculture, éventuellement disponible à des fins énergétiques, et la production de biomasse se réduit à la collecte et au conditionnement selon les exigences de l'utilisateur. Les principales cultures pratiquées au Cameroun sont : l'hévéa, le coton, le riz, l'arachide, le maïs, le café, le cacao, le mil, le palmier à huile. Les déchets et résidus du secteur agricole paysan sont caractérisés par une extrême dispersion et leur valorisation énergétique dans un contexte industriel semble problématique pour cette raison. Néanmoins, une organisation adéquate pourrait dans certains cas, rendre possible leur exploitation. Les coûts de la collecte tiennent compte de la main d'œuvre pour l'entassement et le fagotage.

Le tableau 3.12 reprend les statistiques du Ministère de l'agriculture de la production agricole et agro-industrielle pour la campagne 1998/1999 auxquelles les ratios des tableau 3.11 et 3.13 ont été appliqués afin de déterminer les quantités de résidus agricoles générés au Cameroun pendant ladite campagne. La répartition détaillée par province et les rendements associés sont repris dans l'annexe 3.

Des résidus répertoriés dans le tableau précédent, seules les tiges de manioc et les coques de noix de palmiste sont susceptibles d'être directement valorisées par la technologie de gazéification pour la production d'énergie, soit environ **315 000 tonnes**. Les autres sont soit inutilisables du fait de leur haute teneur en cendres (paille de riz, paille d'arachides, de mil ou

de sorgho) ou doivent subir un conditionnement avant d'être gazéifiables (briquetage des rafles et tiges de maïs, des coques d'arachide). La culture du coton est concentrée dans les 2 provinces du Nord (99%) et de l'Adamaoua (1%). La production nationale de coton graine est passée de 113.300 tonnes pendant l'exercice 1990/91 à 218.400 tonnes pour l'exercice 1996/97 et a atteint 250.000 tonnes en 2001/2002 (Segui, 2002). Lors d'une étude réalisée au Burkina Faso (Tchouate et al., 1999), les relevés sur le terrain ont permis de déterminer un ratio tiges de cotonniers par rapport à la production de coton graine variant de 1,5 à 2,5, soit une moyenne de 2 dans les plantations paysannes et 3 dans les plantations industrielles comme la SODECOTON. Il vient dès lors, pour 2001/2002, un potentiel de tiges exploitable pour la production d'énergie de l'ordre de **500.000 à 750.000** tonnes. Leur valorisation apporterait, outre l'électricité et ses bienfaits, un revenu supplémentaire aux agriculteurs.

Type de résidus	Produit noble (tonnes)	Rapport du produit noble/résidu	Production de résidus (tonnes)
Coques d'arachide	210 502	0,5	421004
Paille d'arachide	210 502	2,3	91522
Rafles de palmier à huile	293 446	24	70427
Fibres de palmier à huile	293 446	18	52820
Coques de noix de palmiste	293 446	0,8	234757
Tiges de maïs	854 577	2,50	341 831
Rafles de maïs	854 577	0,20	4 272 885
Tiges de manioc	218 343	2,70	80868
Paille de Mil/Sorgho	270 251	2,00	135125
Paille de riz	73 288	1,75	41879

Tableau 3.12 : Répartition de la production des résidus de quelques cultures pratiquées au Cameroun : Campagne 98/99 (par province) : calculée à partir des tableaux 3.11 et 3.13 et de la production des cultures vivrières (Source : MINAGRI Cameroun/DPA/AGRO-STAT. 99/2000).

3.2.5. Résidus agro-industriels

Il s'agit principalement des résidus issus de la transformation des produits agricoles dans les industries dont les plus importantes sont la SODECOTON pour le coton, la SEMRIZ pour le riz, la SOSUCAM, CAMSUCO et NOSUCA pour la canne à sucre, UCCAO à l'ouest et d'autres usines de décortilage dans le littoral pour le café, la SOCAPALM et la CDC pour le palmier à huile, HEVECAM et la CDC pour l'hévéa et MAISCAM pour le maïs. Ces agro-industries produisent beaucoup de déchets dont l'estimation peut être faite à partir des valeurs indicatives du tableau 3.13 et présentent la singularité d'avoir des besoins énergétiques importants. C'est pourquoi elles valorisent généralement leurs déchets pour l'auto-alimentation en vapeur comme c'était le cas pour six d'entre elles en 1997. Quatre entreprises produisaient, outre de la vapeur, de l'électricité à partir d'une chaudière et d'un turboalternateur en utilisant les coques et fibres des noix de palme, la bagasse de canne à sucre et les fèves de cacao comme combustibles.

Le tableau 3.14 donne les résultats d'une enquête réalisée dans les cinq plus grandes entreprises agro-industrielles pour les exercices 1995/1996 et 1996/1997. Il confirme l'abondance des résidus, notamment les fibres et les coques issues de la fabrication de l'huile de palme représentant en masse 67% du produit noble, soit 40% du produit frais, alors que la bagasse représente 4 fois la masse de sucre produit. La production d'huile de palme a

considérablement augmenté au Cameroun (100.000 tonnes en 2001, 119.000 en 2002) et de nouvelles sucreries ont vu le jour (75.000 tonnes en 2001)¹.

Culture	Résidus (% poids produits frais)	Matière minérale	Masse volumique vrac (kg / m ³)	PCI (MJ / kg)
Canne à sucre	Bagasse : 30	2 à 4	70 à 95	17,5
	Débris végétaux sur champ 0,2 à 1 tonne/ tonne/ha			(7,5 à 8,0 la fabrication)
Riz	Balles :20	18 à 22	100 à 150	13,5 à 15,5
Palmier à huile	Rafles : 24	4,8	90 à 100 (broyé)	4,4 (humide)
	Fibres : 18	3,9 à 5,4	400	9,6
	Coques :	2,3	240	13,4
Cacao	Coques : 100			
Coton	Coques : 18,9	3,4	130 à 160	16,3
Café	Coques : 140 - 210	5,2 à 7,9	160 à 200	18,3

Tableau 3.13 : Résidus agro-industriels
(Lacrosse, 1991 ; Lahaye, 1986; Herbert, 1988).

Entreprises	Produits	Quantité (t) 1996/1997	Quantité (t) 1995/1996	Déchets	Quantité (t) 1995/1996	Quantité (t) 1996/1997
CDC	huile de palme	11177	10707	fibres et coques	7488,6	7173,6
	caoutchouc	20500	21000			
SOCAPALM	huile de palme	18269	15299	fibres et coques	12240,2	10250,3
SICCACAO	beurre de cacao	3654	3339	tourteaux	39	
CAMSUCO	sucre de canne	9189	40000	bagasse	36756	160000
SOSUCAM	sucre de canne		3430	bagasse		13720

Tableau 3.14 : Résidus d'exploitation agro-industrielle en 1995/96 et 1996/97

3.3. Analyse de la filière de gazéification pour la production d'énergie au Cameroun

La filière de production d'énergie par gazéification de la biomasse peut être structurée en sept étapes plus ou moins distinctes (figure 3.2):

- production
- récolte et/ou collecte
- transport et stockage
- conditionnement de la biomasse
- conversion de la biomasse en gaz
- conditionnement du gaz
- la conversion du gaz en énergie finale.

A chaque étape peuvent être associés des modes d'organisation, des coûts, des contraintes et incertitudes liées aux intervenants et à son intégration dans l'ensemble de la filière et par conséquent la filière elle-même dans le système énergétique.

Il apparaît que la faisabilité technique et économique de la filière biomasse-électricité par gazéification au Cameroun et ses performances environnementales et sociales font intervenir la pluridisciplinarité que l'on peut regrouper en quatre volets présentés à la figure 3.3.

¹ <http://www.iccnet.cm>

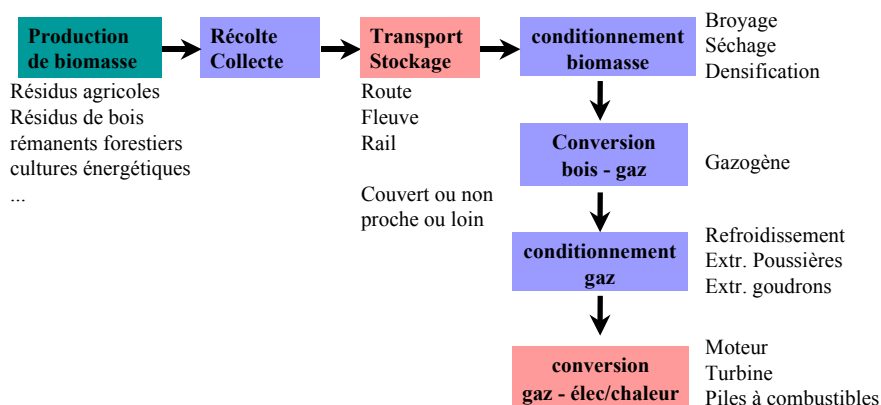


Figure 3.2. Représentation schématique de la filière gazéification de la biomasse.

L'objectif de ce paragraphe est d'analyser les différentes étapes en les intégrant dans le volet correspondant de manière à évaluer le coût de production du kWh (§ 3.5) et son évolution en fonction des facteurs d'incertitude. Ensuite, la méthodologie générale développée au chapitre 2 (§ 2.4.2) pour l'évaluation des performances environnementales des filières énergétiques sera appliquée à la filière gazéification (§ 3.4).

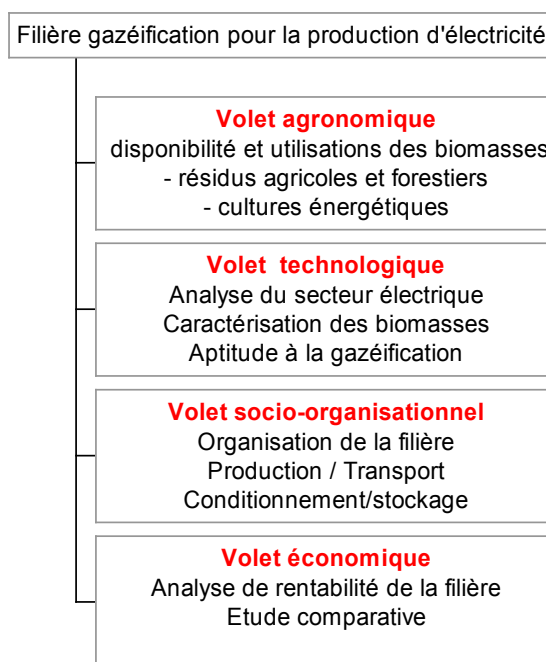


Figure 3.3. Interdisciplinarité de la filière de production d'électricité par gazéification.

3.3.1. La production de la biomasse

La production de bois de chauffage est principalement assurée par un certain nombre de catégories de producteurs que nous pouvons classer suivant les modes et les outils de production, et leur implication dans la vente aux consommateurs finals. La filière bois-énergie, malgré l'importance de son chiffre d'affaires, repose pour l'essentiel sur des circuits informels des modes d'exploitations forestières. On distingue :

- les producteurs du village pour qui le bois procure un revenu supplémentaire. Ils vendent leur bois sur place en les disposant en bordure des routes dans l'attente des grossistes. Les coûts de production s'évaluent en fonction du temps imparti pour la coupe et le fagotage, et l'outillage (hache, machette, lime). Pour évaluer son prix de vente, dans l'optique de la filière de gazéification, nous allons considérer les prix moyens du marché pour les équipements et affecter un bénéfice de 1000 FCFA par jour, ce qui est un bon revenu, surtout en milieu rural. Son équipement doit être renouvelée tous les deux mois en cas d'utilisation soutenue. Sa capacité de production est de deux stères par jour. Cette catégorie de producteurs présente une incertitude quant à leur fiabilité surtout en période de récolte et de grand travaux champêtres.
- les propriétaires de plantations dont la production principale est destinée à la construction et à la fabrication des poteaux-bois. Le bois sous-produit est alors vendu aux commerçants en gros qui vont les revendre en ville. Le prix de vente est orienté par les prix en vigueur sur le marché. Il est particulièrement difficile dans cette catégorie de déterminer le coût de revient du bois qui serait vendu à une centrale de gazéification parce que c'est un sous-produit. En principe, les coûts que l'on pourrait y affecter sont les coûts de ramassage et de conditionnement. Ils seraient si faibles que le producteur ne les accepterait pas. Mais il n'est pas exclu que les employés de ce type de plantations s'adonnent au ramassage de ces sous-produits dont la vente leur procurerait un revenu supplémentaire.
- les petits producteurs qui coupent eux-mêmes leur bois à la hache ou ramassent le bois morts. Ils sont soit propriétaires, soit locataires de bicyclette ou de pousse-pousse et vendent eux-mêmes leur production en ville en en assurant le transport. Quant au piéton, il se limite généralement à sélectionner du bois mort et de petit calibre, facile à façonner. Il a une hache qu'il utilisera en moyenne 6 mois, et ses frais d'exploitation sont quasi nuls. Il transporte un fagot d'environ 16 kg qu'il va vendre par petits tas à environ 500 FCFA. Le prix de revient est alors d'environ 31 FCFA/kg. Pour le pousseur et le cycliste, le coût de revient à la production peut être évalué en supposant les coûts analogues à ceux des petits producteurs puisque leurs équipements sont semblables.
- les grands producteurs et producteurs moyens qui sont le plus souvent des gros commerçants basés en ville. Ils achètent du bois aux villageois ou engagent des coupeurs auxquels ils mettent à disposition de l'outillage (tronçonneuse, hache, machettes, carburant, etc.). Ils sont propriétaires ou locataires de camions ou de pick-up. Quelques-uns s'impliquent dans la distribution en ville en tant que grossiste. Malgré l'utilisation des gros moyens qui n'influencent que le coût de revient du transport, le coût de production comprend l'investissement pour l'outillage, le salaire des coupeurs, le carburant et en principe l'investissement pour la plantation.

Avec la nouvelle réglementation sur l'exploitation forestière au Cameroun visant un aménagement durable des forêts, la notion de forêt communautaire prend de plus en plus d'ampleur. Elle permet aux populations de s'intéresser à cette exploitation et de profiter directement des ressources qu'elle peut procurer. Ceci va conduire à un nouveau type d'acteur qui va exploiter directement les rémanents forestiers.

3.3.2. Le transport

Le transport ne concerne que la filière GAZEL dans le cadre de l'électrification rurale et de la motorisation villageoise. En effet, cette étape de la filière n'est pas significative dans un système d'électrification de processus, par exemple pour l'alimentation des usines de

transformation de bois où la production de la biomasse et la production d'électricité ont lieu sur le même site.

- **Acteurs du transport**

L'activité du transport du bois est bien connue au Cameroun. Elle est même bien structurée en ce qui concerne l'approvisionnement des grandes villes en bois de chauffe pour la cuisine. L'étude ESMAP/MINMEE (1991) a estimé les quantités moyennes de bois annuellement importées à 200 kg/hab/an dans les villes de Maroua, Garoua, Bamenda et Bafoussam. Cette quantité moyenne est inférieure (100 kg/hab/an) dans les grandes villes du fait de la forte pénétration en énergies de substitution (butane, propane, électricité). Par contre, les importations en valeur absolue à Douala et Yaoundé sont plus importantes en raison de leur poids démographique.

Les distances moyennes de transport vont de 10 à 25 km (Maroua et Garoua nécessitant des transports respectivement de 42 et 35 km). Le bois consommé dans les ménages urbains provient des forêts naturelles, de l'agro-foresterie, ou encore des usines de transformation de bois.

Les acteurs se répartissent en six catégories suivant le moyen de transport utilisé :

- les **piétons et les cyclistes**, transporteurs moins nantis, vont chercher du bois lorsqu'ils ont un besoin d'argent. Leur démarche est ponctuelle. Ils gaspillent les bois morts, les restes de jachère ou même les jeunes plants. La distance moyenne de transport est de 5,7 km pour les piétons et 9,2 km pour les cyclistes, alors que leur part dans l'approvisionnement des 6 grandes villes est de 2,4 à 2,5%. L'investissement est faible et les quantités transportées par voyage sont limitées (piétons : 12-22 kg; cyclistes : 15-50 kg). Si l'activité devenait lucrative, les cyclistes en particulier pourraient constituer une structure d'acteurs fiables, susceptibles d'être professionnalisés.
- les « **pousseurs** » (nom couramment utilisé pour les conducteurs de pousse-pousse, sorte de charrette) assurent 50% du bois consommé dans la ville de Douala. Ils sont eux-mêmes producteurs et achètent parfois aux producteurs occasionnels comme les jeunes cultivateurs et les étudiants en période de vacances scolaires. La distance moyenne est de 9,4 km avec les extrema à Maroua (18,9 km) et Garoua (15,8 km) et participe pour 17,1% dans l'approvisionnement des villes. L'investissement est moyen et la quantité transportée est estimée à 100 kg par voyage.
- les **cars** sont normalement destinés au transport de personnes. Mais, occasionnellement lorsque les passagers n'ont pas beaucoup de bagages, les conducteurs valorisent l'espace disponible en transportant du bois, ce qui leur procure un bénéfice supplémentaire. De ce fait, il est particulièrement difficile d'évaluer le coût réel du transport de bois et la filière GAZEL ne peut s'appuyer sur cette catégorie de transporteurs pour fiabiliser son approvisionnement en combustibles. Elle participe pour 1,6% dans l'approvisionnement et la distance moyenne parcourue est de 20,5 km avec une prépondérance à l'ouest (23,3 km), Garoua (29,8 km) et Maroua (45,3 km).
- les **pick-up** constituent le deuxième moyen de transport en capacité. Ils sont utilisés par des producteurs moyens qui achètent du bois aux villageois ou engagent des coupeurs de bois dans leur plantation. Les distances de transport varient de 12,3 km à Bamenda (Nord-Ouest) à 42,4 km à Maroua avec une moyenne de 26,2 km. Sa contribution dans l'approvisionnement en bois des 6 grandes villes a été de 34,6%. Une camionnette transporte en moyenne 7 stères de bois par voyage et réalise un voyage par jour. Le poids

d'une stère de bois varie avec l'espèce et le conditionnement. La moyenne calculée à partir des données recensées dans l'étude ESMAP est de 261 kg et sera retenue comme poids moyen d'une stère dans cette évaluation.

- le **camion** constitue le moyen de transport le plus performant avec une distance moyenne de 42,1 km (rayon de 56,9 km autour de Maroua). Bien que ce soient des camions d'occasion, l'investissement est lourd et réservé aux grands transporteurs qui sont aussi parfois des grands producteurs. Leur contribution à l'approvisionnement des villes est de 41,8% et la quantité moyenne transportée est de 20 stères par voyage.

En ce qui concerne l'étape transport dans la filière GAZEL, seules cinq des six catégories présentes sur le terrain sont envisageables à ce stade, les cars ayant été exclus pour leur non fiabilité. Les camions et les pick-up offrent l'avantage de la distance parcourue et de la plus grande quantité transportée, mais cela implique aussi une consommation importante de diesel - combustible fossile - désavantageuse pour la préservation de l'environnement. Ceci nous amène, en plus du coût du kg de bois transporté, à évaluer la quantité de CO₂ émise par unité de bois transporté. Ce nouveau critère permettra d'apprécier l'impact sur l'environnement de l'étape transport en fonction du type de moyen utilisé.

3.3.3. Le stockage de la biomasse

Le stockage est une étape importante qui permet de garantir une certaine autonomie de production à la centrale de gazéification. Aussi pour certains résidus agricoles (tiges de cotonniers par exemple) qui ne sont disponibles que pendant une période de l'année, le stockage permet de protéger la biomasse contre les intempéries.

Plusieurs options de stockage sont possibles :

- stockage centralisé à proximité de l'unité de conversion,
- stockages intermédiaires dans les villages,
- stockages au champ sur le lieu de production.

Le stockage centralisé a pour avantages de garantir une meilleure disponibilité de la biomasse, et de ne nécessiter ni transport ni stockage intermédiaires. Par contre, il nécessite une très grande surface dont l'utilisation n'est pas égale tout au long de l'année. De plus, il y a le risque de perte totale en cas d'incendie.

Un stockage principal et des stockages intermédiaires dans les villages favorisent l'intégration des groupements de producteurs, une bonne disponibilité du combustible et nécessite une moindre surface autour de la centrale. En outre, le risque de perte du combustible en cas d'incendie est limité.

Le stockage chez le producteur diminue la charge d'organisation qu'induit la collecte de la biomasse car l'approvisionnement se fait à la demande. Cette option peut devenir moins coûteuse mais les incertitudes sur la disponibilité du combustible et sur leur qualité (taux d'humidité et conditions de stockage) sont ses deux inconvénients majeurs.

Le choix d'une option dépend d'une part du système d'électrification (processus, collectif, ou mixte) et d'autre part conditionne le coût de revient de stockage. Elle influence aussi sur le type d'acteur du transport à privilégier. Un approvisionnement quotidien limite le volume du hangar de stockage. Quelle que soit l'option de stockage retenue, il faut prévoir à l'usine le

stockage d'une quantité de biomasse sèche pour garantir la sécurité d'approvisionnement. Pour cela, un stock de sécurité qui assurerait la production de deux mois nous semble un bon choix.

Quels que soient les modes de stockage (sur sol nu, en hauteur, sur les toits des maisons, sur dalle de béton, sous auvent, dans un hangar, ...), ils doivent satisfaire différents critères dont :

- limitation des risques de perte par incendie,
- destruction de la biomasse par les termites et/ou autres insectes xylophages,
- en saison des pluies, protéger la biomasse contre la reprise de l'humidité.

3.3.4. Le conditionnement de la biomasse

Le conditionnement consiste, lorsque c'est nécessaire, à la mise en forme (broyage, densification) et au séchage de la biomasse de manière à s'assurer un bon écoulement dans le gazogène d'une part et une meilleure qualité du gaz d'autre part. L'objectif est de disposer à l'entrée du gazogène un combustible d'humidité inférieure à 20% et une granulométrie proche de 5cm *10cm*0,1cm. Nous analysons ci-dessous deux filières basées sur le coton et le bois comme combustible.

Dans la filière coton, le séchage naturel suffit tant sur les champs que pendant le stockage. Le reste d'humidité va s'évaporer pendant le dernier mois dans le hangar principal où il fera plus de 40°C sous le toit de tôle et où la ventilation sera assurée naturellement via les ouvertures et la charpente. Les mesures d'humidité effectuées sur des tiges ayant séjourné quelques semaines dans ces conditions ont donné un taux d'humidité de 6% sur matière sèche. Les tiges de coton présentent un diamètre de 1 à 2 cm et des longueurs inférieures à 2 m. Elles sont récoltées et conditionnées en fagots avant d'être livrées à la centrale. Le broyage peut être manuel ou à l'aide d'un broyeur de type hache-paille. Le broyage à la main au moyen de machettes réduit au minimum les investissements nécessaires mais demande une main d'œuvre importante. Cela pourrait se justifier dans le cadre d'une économie à très fort taux de chômage. En milieu rural cependant, la période de cultures laisse peu de temps aux autres activités. Un broyeur de type hache-paille est donc retenu, fonctionnant manuellement ou équipé d'un moteur pour en augmenter la productivité.

Dans la filière bois, le bois aura subi un séchage à l'air libre avant l'arrivée à la centrale de production mais il n'est pas certain qu'il respecte les conditions d'humidité du gazogène. Pour la finition du séchage des chips de bois, une dernière préparation par récupération de la chaleur résiduelle des gaz d'échappement du moteur et autres liquides de refroidissement peut être envisagée pour garantir les conditions requises par le gazogène. Pour cela, il faut aménager dans la salle de machine un endroit capable de contenir 670 kg de chips de bois (besoins quotidiens) dans lequel on fera traverser un conduit de fluides chauds avant leur renvoi dans l'atmosphère. En cas d'utilisation d'un convoyeur, on devra prévoir un mécanisme d'échange de chaleur sous la bande transporteuse. Le bois provenant des forêts naturelles ou de plantations villageoises est constitué de branches et de troncs de 5 à 20 cm de diamètre et de 1 à 4 m de longueur. Si un système d'agro-foresterie est mis en place, il permettra de produire des tiges de 1 à 4 cm de diamètre et de 1 à 4 m de longueur qui peuvent être aisément broyées dans un broyeur de type hache paille. Pour les bois de plus gros diamètre, plusieurs solutions sont possibles :

1. fente manuelle : actuellement, le bois exploité dans les formations naturelles est vendu en ville en gros. Pour la vente aux particuliers, il est débité en morceaux de quelques cm

d'épaisseur et de moins d'un mètre de longueur. Cette opération est généralement effectuée par des « fendeurs », équipés de haches, coins et masses. Rares sont ceux qui sont équipés de tronçonneuses.

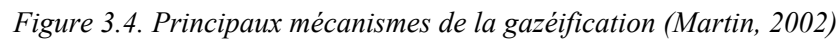
2. fente mécanisée : il existe des machines mobiles pour fendre le bois. Celles-ci ont été introduites au Cameroun lors de la création des forêts communautaires et pourraient être utilisées dans le cadre d'une activité intensive de préparation du bois-combustible.
3. broyeur : dans les pays industrialisés, la réduction du bois en plaquettes s'effectue au moyen de broyeurs forestiers ou industriels. Ils sont caractérisés par des puissances et productivités élevées ainsi qu'un investissement élevé.

3.3.5. La conversion énergétique de la biomasse

Au sens strict du terme, la gazéification est une transformation thermochimique destinée à la conversion intégrale d'un combustible solide en combustible gazeux. Cette transformation vise ici à l'autothermisme, c'est-à-dire à l'absence de recours à toute source d'énergie extérieure à celle disponible dans le combustible d'origine. Le principe fondamental en est l'oxydation partielle du carbone constitutif du combustible. Pour fournir les réactifs appropriés à la gazéification définie au sens strict, une décomposition préalable est indispensable, comme c'est d'ailleurs le cas dans l'étape préliminaire à la combustion de tout combustible complexe. On peut ainsi se référer à la figure 3.4 pour situer les principaux mécanismes qui peuvent conduire à la gazéification de la biomasse, considérée comme une combustion partielle judicieusement orientée et maîtrisée.

Sous l'effet de la température régnant dans les zones d'oxydo-réduction, la biomasse qui s'approche de la zone de réaction subit la pyrolyse et se décompose d'une part en matières volatiles complexes comportant des produits oxydés (CO_2 , H_2O) et des produits oxydables (CO , H_2 , C_nH_m , ...) et d'autre part en un résidu solide de coke végétal (CH_s) assimilable à du carbone. Au contact de l'oxygène, les produits de pyrolyse brûlent, formant exothermiquement des produits d'oxydation complète (CO_2 , H_2O). Ceux-ci peuvent alors réagir avec le carbone du coke résiduel pour donner lieu aux gaz combustibles CO et H_2 . A ce stade interviennent les équilibres du gaz à l'air et du gaz à l'eau, qui conditionnent le degré de conversion en CO et H_2 , de sorte qu'il peut subsister des quantités appréciables de CO_2 et H_2O .

Les produits gazeux de la pyrolyse brûlent normalement en formant des flammes et comme leur flux émane du squelette carboné que produit la pyrolyse, le coke ainsi formé ne peut réagir significativement avec l'oxygène que lorsque le degré de pyrolyse est assez avancé. Il peut alors brûler en braise incandescente si de l'oxygène est encore disponible. Si tout l'oxygène a été consommé par les gaz de pyrolyse, le coke résiduel est alors oxydé par les produits de combustion et réduit ceux-ci en gaz combustible. La conception du réacteur de gazéification ou gazogène doit concourir dans toute la mesure du possible à la réalisation de ce dernier scénario. Elle doit en particulier favoriser la combustion des produits de pyrolyse en phase gazeuse, car ceux-ci comportent encore des molécules hydrocarbonées complexes qui ne peuvent en aucun cas intervenir dans les mécanismes d'oxydo-réduction avec le coke.



Si le gaz produit est destiné à un moteur à combustion interne, il doit être froid et propre : le gazogène proprement dit doit donc être suivi d'une unité de conditionnement du gaz qui assure la double fonction d'épuration et de refroidissement dont la complexité et les coûts de maintenance croissent avec la teneur originelle du gaz à traiter. Il est donc indispensable de concevoir le gazogène non seulement dans le but d'en obtenir une bonne efficacité énergétique, mais aussi dans celui d'obtenir un gaz aussi peu chargé que possible en goudrons et fines. A cet égard, la distinction la plus marquante entre les diverses technologies disponibles en gazéification réside dans l'organisation des flux de matière qu'on y réalise.

On en distingue plusieurs types, selon que la matière repose sur une grille (gazogène à lit fixe) ou est maintenue en suspension par l'agent gazéifiant (gazogène à lit fluidisé). On effectue encore une distinction selon les directions prises par l'agent de gazéification et la biomasse :

- Conformément au schéma d'organisation du procédé (figure 3.5), l'air y rencontre ainsi tout d'abord les braises de charbon végétal qu'il oxyde en laissant subsister les cendres qui tamisent au travers d'une grille adéquate sur laquelle repose le lit. Les gaz de combustion ainsi formés (essentiellement du CO_2) rencontrent alors un coke

éventuellement suffisamment dévolatilisé pour servir de réducteur et former du CO à haute température. En montant dans la charge qui descend à mesure qu'est consommé le coke, ces gaz chauds provoquent la pyrolyse de la biomasse dont la fraction gazeuse est ainsi mélangée au gaz d'oxydo-réduction. Le gaz sortant au sommet du gazogène est ainsi un gaz extrêmement riche en produits lourds condensables. Il est souhaitable de le brûler tel quel (sans le refroidir) pour éviter le rapide encrassement des équipements. Ce gazogène ne convient pas a priori pour l'alimentation des moteurs à combustion interne à partir de biomasse naturelle. Il peut avoir un certain intérêt dans la gazéification du charbon de bois fortement dévolatilisé.

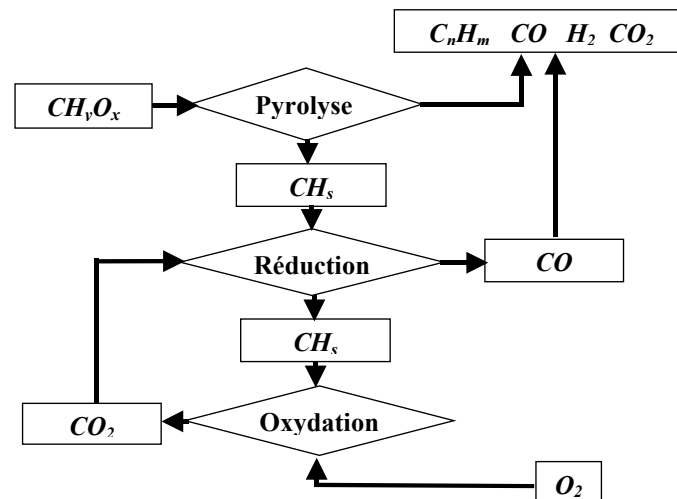


Figure 3.5. Principes réactionnels dans un gazogène à contre-courants

- les gazogènes à co-courants, dans lesquels l'air et les gaz produits circulent dans le même sens que la charge de combustible. Le gazogène-type de cette famille est le gazogène vertical à tirage inversé ou courant descendant. Dans ce type de gazogène, l'air est introduit dans la partie haute du cœur du gazogène, que surmonte la trémie d'alimentation.

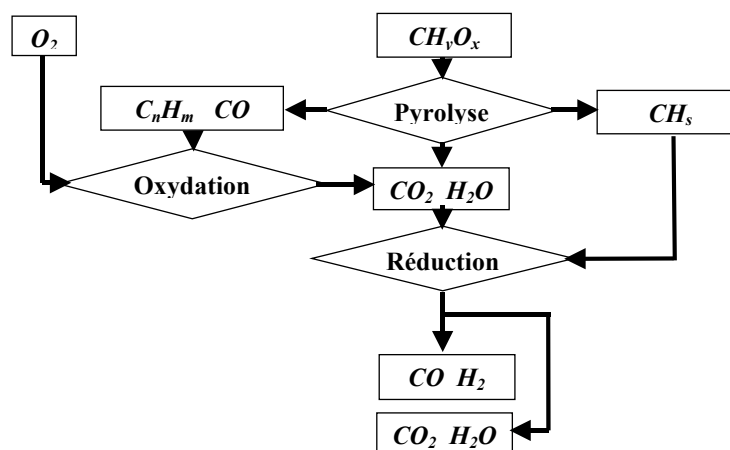


Figure 3.6. Principes réactionnels dans un gazogène à co-courants.

Comme l'illustre le schéma du procédé (figure 3.6), l'air entre ici en contact avec les produits gazeux de pyrolyse et les brûle en formant une zone de flamme dont la haute température (elle peut atteindre 1200°C) entretient la pyrolyse de la biomasse fraîche qui descend à mesure qu'est consommée la phase solide du lit et fournit la chaleur aux réactions endothermiques ultérieures. La zone de pyrolyse est en partie confondue

avec la zone de combustion des produits gazeux qu'elle forme et l'on parle à ce sujet d'une pyrolyse avec flamme. Sous cette zone, les gaz de combustion entrent en contact avec le carbone du coke formé par la pyrolyse et sont réduits en gaz combustibles. La consommation du coke par les réactions d'oxydo-réduction assure la descente du combustible. La température de cette zone encore appelée zone de réduction varie entre 500°C et 800°C.

Il est à noter que, dans ce type de gazogène, s'il n'y a en principe que peu de goudrons, le gaz est souvent assez chargé en fines de coke et le décendrage indispensable au maintien d'une bonne réactivité peut entraîner une perte appréciable en carbone. Ce type de gazogène n'est donc pas bien adapté à la gazéification de combustibles très cendreaux.

Par contre, le gaz produit ici est apte à l'utilisation dans un moteur moyennant un dépoussiérage efficace et un dégoudronnage toujours nécessaire à cause des imperfections de combustion dans la zone de flamme pyrolytique. Ces imperfections sont entre autres liées à la difficulté de répartition de l'air de gazéification et à la composante stochastique de la descente du combustible vers la zone de pyrolyse et combustion.

Pour l'application et le niveau de puissance considéré, seule la technologie de gazéification à lit fixe et co-courant est à considérer. Les gazogènes à lit fluidisé sont mieux adaptés aux puissances de plusieurs MWe et produisent un gaz à haute teneur en goudrons (quelques g/m³N de gaz) qui convient mieux aux turbines à gaz qu'aux moteurs à combustion interne.

Parmi les gazogènes à lit fixe, on peut encore distinguer « l'open core » et le gazogène à tuyères périphériques. Ce dernier a des exigences plus importantes quant à l'humidité et la granulométrie du combustible mais il est auto-régulant : la phase de combustion reste située au niveau des tuyères. De plus, il est d'emploi aisé et bénéficie d'une longue expérience.

Options technologiques

Quel que soit le type de gazogène, deux options technologiques sont envisageables, définies par le mode d'alimentation en combustible qui peut être continue ou discontinue.

L'alimentation discontinue ou de type « batch » consiste à remplir le gazogène de biomasse et de le faire fonctionner jusqu'à épuisement du stock. L'autonomie du gazogène est déterminée par le volume de la trémie. Certains exploitants indiens et chinois évoquent la possibilité, moyennant certaines précautions, de remplir le gazogène en cours de fonctionnement, tout en limitant les perturbations de fonctionnement du moteur. Cette option n'est applicable que pour les systèmes de petite puissance.

L'alimentation continue ou semi-continue consiste à introduire la biomasse dans le gazogène à intervalles réguliers. Pour éviter les émanations des gaz, l'introduction de la biomasse est effectuée par l'intermédiaire d'un sas qui permet d'isoler le volume du gazogène de l'atmosphère. Ce système de remplissage garantit un fonctionnement continu sans perturbation du moteur. Cependant, le sas étant de dimensions limitées, tout au plus quelques centaines de litres, la fréquence de remplissage est élevée (plusieurs par heure). Une alimentation « manuelle » gérée par un opérateur devient quasi impossible à réaliser car elle nécessiterait une présence continue. De plus, le procédé n'autorise aucun retard dans l'alimentation. Une alimentation continue impose donc une automatisation du procédé et une chaîne complète d'alimentation du gazogène comportant silo de stockage et convoyeur. Les investissements liés à l'automatisation du procédé peuvent aller jusqu'à doubler le coût de

l'installation. Ceci ne se justifie pas dans le contexte d'électrification des centres secondaires tels qu'envisagés.

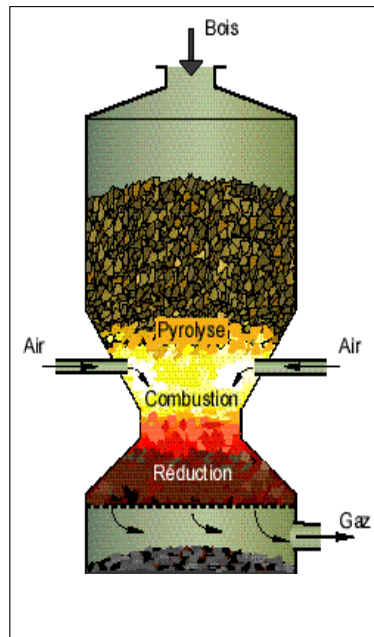


Figure 3.7. Schéma de principe du gazogène à co-courant.

3.3.7. Épuration du gaz dans un laveur

A la sortie du gazogène, la température du gaz produit est de l'ordre de 400 à 500°C et il contient des poussières de charbon de bois et des cendres, ainsi que des « goudrons ». En cas de combustion dans un moteur, il convient de refroidir le gaz jusqu'à +/- 50°C et d'en éliminer poussières et goudrons. Ces derniers sont particulièrement gênants car ils se déposent sur les différentes parties du moteur (tiges et sièges de soupape, segments des pistons...). À terme, ils peuvent provoquer la destruction du moteur. Une attention particulière doit être apportée à leur épuration. Les spécifications imposées sur la qualité du gaz par les constructeurs de moteurs sont :

- teneur en poussières : $< 100 \text{ mg/m}^3\text{N}$
- teneur en goudrons : $< 10 \text{ mg/m}^3\text{N}$.

Un épurateur est généralement constitué de plusieurs éléments. Après un nombre important de tests, il ressort que l'épuration donnant la plus grande satisfaction comporte les étapes suivantes :

- une **épuration sèche** à haute température pour éliminer les particules solides (cyclone, chambre de sédimentation, ...) (cendres et fines de charbon)
- une **épuration humide** dont la fonction est de refroidir le gaz par contact avec de l'eau et d'extraire les fines particules et les goudrons. De nombreux principes peuvent être mis en œuvre (barbotage, pulvérisation, ...). Tous n'ont pas la même efficacité.
- un **filtre final** de finition de l'épuration et de protection du moteur. Ce filtre final peut être un filtre de surface (cartouche, manche filtrante) ou un filtre de masse (sciure de bois, charbon, sable, ...).

3.3.8. Combustion du gaz dans un groupe électrogène

Le PCI du gaz de gazogène est faible ($4,5 - 6 \text{ MJ/Nm}^3$) comparé aux combustibles classiques mais ses caractéristiques en font un excellent combustible pour les moteurs à combustion interne. Deux types de moteur peuvent fonctionner avec ce gaz de synthèse : le moteur à allumage commandé ou moteur à étincelle et le moteur à allumage spontané (diesel).

Pour le **moteur à allumage commandé**, il s'agit d'alimenter le moteur avec un mélange carburé air-gaz de gazogène. L'ignition du mélange est effectuée par une étincelle. Les modifications à apporter à un moteur classique pour qu'il puisse brûler ce gaz est l'adaptation d'un carburateur approprié, la modification de l'avance à l'allumage et une réduction éventuelle du taux de compression. Cependant les moteurs à essence sont limités aux faibles puissances. Pour des puissances plus élevées, il faut recourir aux moteurs à gaz, développés en petites séries pour le gaz naturel.

Dans le cas du **moteur diesel**, l'allumage du mélange air-gaz introduit dans le cylindre est effectué par l'injection d'une faible quantité de diesel (5 à 20 % de l'énergie contenue dans le cylindre). On parle de technologie « **dual-fuel** ». Les modifications à apporter à un moteur diesel classique sont l'adjonction d'un mélangeur air-gaz et la réduction éventuelle du taux de compression. Si la technologie « dual-fuel » présente l'inconvénient de consommer continuellement du combustible fossile, elle a l'avantage d'utiliser un moteur diesel standard produit en grandes séries et donc relativement bon marché. De plus, en cas de défaut d'alimentation en gaz, le moteur dual-fuel passe automatiquement en fonctionnement 100 % diesel, ce qui garantit la production continue d'électricité.

Les recherches pour l'utilisation du gaz de gazogène dans les moteurs à combustion externe sont fort avancées car ceux-ci éviteraient l'étape de l'épuration.

3. 4. Analyse environnementale de la filière biomasse

La valorisation énergétique de la biomasse est l'une des meilleures utilisations de la biomasse. Elle consiste à utiliser la biomasse à des fins énergétiques, soit de manière brute dans le cas du bois de feu, soit en utilisant les techniques de conversion plus évoluées, en fonction des formes d'énergie utile envisagées. Les préoccupations environnementales de la dernière décennie ont accru l'intérêt pour l'exploitation rationnelle des ressources énergétiques dans le but ultime de diminuer la pollution due aux émissions de gaz à effet de serre en général, et au CO_2 en particulier. Les filières de valorisation énergétique de la biomasse sont nombreuses et offrent une alternative à la production classique d'électricité et de chaleur. Elles présentent l'avantage d'avoir des cycles de vie plus courts en comparaison des filières classiques.

Ce paragraphe présente une approche méthodologique d'évaluation du bilan CO_2 des filières biomasse-énergie dans le contexte africain en général, et au Cameroun en particulier. L'intérêt du bilan CO_2 des filières de conversion énergétique de la biomasse est d'évaluer le gain en émission par rapport à l'utilisation des énergies fossiles dans les centrales classiques.

En général, toute filière biomasse-énergie peut être structurée en plusieurs étapes plus ou moins distinctes (figure 3.1). Les filières se distinguent par les technologies de conversion de la biomasse en énergie finale qui impliquent à leur tour des exigences sur la biomasse en tant que combustible. Si l'un des objectifs de la politique énergétique envisagée est la réduction

des émissions de CO₂, le bilan CO₂ est un outil d'aide au choix de la filière et des options technologiques.

Certaines sources de financement telles le Global Environmental Fund (GEF), le Mécanisme de Développement Propre (MDP), le Joint Implementation (JI) ont vu le jour dans la foulée des préoccupations environnementales. Elles conditionnent leur financement à la capacité du programme ou projet à procurer une réduction des émissions des gaz à effet de serre. Ainsi, le bilan CO₂ de différentes filières énergétiques peut permettre aux Etats et gouvernements africains en général, et camerounais en particulier, de sélectionner les projets ou programmes énergétiques éligibles à ces types de financement. Il peut permettre aussi de déterminer de manière objective le seuil d'une taxe CO₂ sur les combustibles fossiles ou des subventions à apporter aux filières biomasse-énergie pour faciliter leur décollage. Par exemple, la taxe CO₂ fut introduite en Suède (1991) et dans une moindre mesure en Finlande, aux Pays-Bas et en Norvège dans le but de réduire les émissions de CO₂ dans les systèmes de production d'énergie, en substituant les biocombustibles aux combustibles fossiles. Cette taxe est fixée en fonction de la teneur en carbone du combustible de manière à refléter le coût des mesures d'atténuation des GES ; elle résulte des analyses ou évaluations des impacts potentiels et a permis une réduction annuelle des émissions entre 1991 et 1995 située entre 0,5 et 1,5 millions de tonnes de CO₂ (Bohlin, 2000). Nous étudierons au chapitre 6 l'impact d'une telle taxe sur l'évolution du secteur électrique camerounais.

En outre, la taxe CO₂ peut représenter une source de revenus supplémentaires pour l'Etat : en effet, la faible élasticité du prix des combustibles fossiles (c'est-à-dire la substitution des combustibles fossiles est lente et les revenus resteront plus ou moins intacts sur une longue période) engendre des revenus supplémentaires. Mais, pour être sensibles, il faut que ces revenus soient largement supérieurs aux coûts administratifs qu'engendre leur recouvrement.

Analyse environnementale de la filière gazéification de la biomasse

La méthodologie utilisée ici est inspirée de celles de Fock et Jungmeier. Basée sur le Life Cycle Assessment (LCA), elle consiste en une analyse complète de la filière, prenant en compte tous les procédés contribuant à la fourniture d'électricité et de chaleur, de l'extraction des matières premières dans la nature à la mise à disposition de l'énergie et des matières (résidus ou sous-produits) dans l'environnement. Chaque étape est considérée comme un système entier ayant un ou plusieurs inputs et produisant de la biomasse ou de l'énergie comme outputs. A chaque étape, on peut distinguer les inputs directs et les inputs indirects. Après avoir estimé la valeur spécifique de fuel, matériaux et machines constituant les inputs d'un système, ces quantités sont converties en émissions directes et indirectes en les multipliant par les besoins spécifiques nécessaires.

Dans ce qui suit, est présenté pour chaque étape, un inventaire non exhaustif des points à considérer :

a) Production

- Matériels : en cas d'utilisation de fertilisants, par exemple, si la biomasse provient de cultures énergétiques, il faut savoir que la consommation spécifique d'énergie pour la fabrication des engrais minéraux varie selon le type : engrais azoté (36-104 MJ/kg), engrais phosphaté (8-16 MJ/kg) ou engrais au potassium (5-10 MJ/kg) (Sintzoff, 1998).

- Comment s'effectue le transport des fertilisants de l'usine jusqu'à la plantation ? Quelle est la consommation spécifique du moyen de transport utilisé ?
- Herbicides ou désherbage manuel ?
- Engins de mécanisation ?

La consommation spécifique de chaque matériel et engins de mécanisation utilisés, leur quantité et le type de fuel en présence conduit au calcul des émissions équivalentes de l'étape. Le CO₂ équivalent ainsi calculé est rapporté à l'unité de l'output du système qui constitue l'input du système correspondant à l'étape suivante.

b) Récolte : suivant que la coupe de biomasse sera manuelle ou mécanique, il y aura lieu d'évaluer sa consommation spécifique et en déduire les émissions équivalentes.

c) Collecte : la biomasse peut provenir du ramassage de bois mort en forêt, des résidus de transformation des scieries ou menuiseries ou encore des résidus agricoles. Dans ce cas, il faut identifier les consommations énergétiques correspondant à cette étape et les ramener à la quantité de biomasse obtenue.

d) Transport : le transport de combustible peut constituer une étape très consommatrice d'énergie en fonction des moyens de transport utilisés (cfr §.3.3.2.). La consommation en carburant du véhicule ramenée à la quantité de biomasse transportée permet de calculer le CO₂ équivalent. Il convient de ne pas tenir compte des émissions liées à la fabrication du véhicule.

e) Séchage : certaines filières de conversion énergétique de la biomasse imposent l'utilisation d'un combustible suffisamment sec. C'est le cas par exemple de la gazéification à lit fixe à tirage descendant exigeant un degré d'humidité de la biomasse inférieur à 20% sur matière sèche. Ceci implique un séchage qui peut être naturel c'est-à-dire à l'air libre ou artificiel. Le séchage artificiel consiste à soumettre la biomasse humide dans un séchoir à l'action forcée d'un courant d'air chaud, ce qui implique des besoins importants en électricité et en chaleur. Dans ce cas, des ratios de consommation énergétique dépendant du type de séchoir permettent d'évaluer la consommation énergétique par unité de matière sèche (MS) et d'en déduire le CO₂ équivalent.

f) Broyage : de même, certaines technologies ont des exigences sur la granulométrie et nécessite un broyage du combustible-biomasse qui peut alors s'effectuer par fente manuelle ou à l'aide d'un broyeur industriel, auquel cas il convient de calculer la consommation énergétique par unité de MS et de déduire le CO₂ équivalent.

g) Stockage : le calendrier de disponibilité de certaines biomasses implique la nécessité d'un ou plusieurs lieux de stockage d'autant plus que la fiabilité de la production d'énergie en dépend. L'organisation du stockage suppose la construction d'un bâtiment dont le type implique l'utilisation d'une certaine quantité de ciment, de métaux ou d'autres équipements requérant une consommation d'énergie. En fonction de la taille de l'installation, le ratio énergie consommée sur la quantité de biomasse stockée peut être négligeable et par conséquent les émissions de CO₂. Il faut bien garder à l'idée que le local de stockage a une durée de vie supérieure à 20 ans et qu'il faudra calculer l'émission spécifique de CO₂ en tenant compte de la quantité de biomasse à stocker pendant ces 20 ans.

h) Conversion énergétique de la biomasse : l'évaluation du bilan CO₂ de l'unité de conversion va dépendre du type de technologie, du rendement énergétique de production, des matériels et des consommations annexes. Tous ces éléments permettent d'évaluer la consommation d'énergie et par conséquent les émissions par unité d'énergie produite et de conclure le bilan CO₂ de toute la filière. Généralement, on considère que l'étape de conversion de la biomasse conditionnée en énergie présente un bilan nul en CO₂ puisque le CO₂ émis pendant cette conversion correspond à celui que la plante a capturé lors de sa croissance. En effet, le cycle de la plante à la conversion du bois est très court par rapport à celui des énergies fossiles, quelques années par comparaison à des millions d'années pour le cycle de carbone issus des énergies fossiles. On considère aussi que le bois, même si on le laisse pourrir en forêt, va relâcher la même quantité de CO₂ que lors de sa combustion, peut-être à un rythme plus lent. Ainsi, l'étape de conversion de biomasse ligneuse en énergie ne contribue pas au réchauffement climatique, à condition que des mesures de substitution soient mises en place, ce qui est le cas pour les cultures de plantes énergétiques à courte rotation ainsi que lors du reboisement systématique des forêts. Par contre, si l'unité de conversion du gaz produit en électricité est bicom bustible (diesel-gaz), il faut tenir compte des émissions dues à la fraction de diesel utilisée (tableau 3.15).

Nature et traitement des effluents liquides : Pour les technologies nécessitant une épuration du gaz, les effluents du laveur contiennent notamment des phénols qui ont une action bactéricide importante. Ils ne peuvent absolument pas être rejetés tels quels dans la nature. Ce serait une charge environnementale inacceptable et donc, un traitement préalable est nécessaire. Les quantités produites dépendent de l'humidité de la biomasse et de la température de refroidissement des gaz bien qu'elles soient relativement faibles (0.1 l/kWh). Ils sont généralement traités soit par absorption de l'eau sur la biomasse ou les cendres, soit par évaporation de l'eau à l'air libre, suivi d'un recyclage du résidu sec dans le gazogène.

	Energie consommée [GJ/tonne MS]	CO ₂ émis [kg/tonne MS]
<i>Production, Récolte, Collecte</i>		
Cultures énergétiques	0.3-0.8	22-60
Résidus agricoles	0	
Rémanents forestiers	0.3-1	22-74
Déchets de transformation de bois	0	
<i>Transport de la biomasse</i>		
Piétons, cyclistes	0	0
Pousse-pousse	0	0
Camionnettes Pick-up	0.44-0.8	32-60
Camions	0.4-0.6	30-50
<i>Stockage</i>		
<i>Conditionnement de la biomasse (séchage et broyage)</i>		
<i>Production d'électricité</i>		
Dual fuel engine	2.8-3.7	243-276
100% wood gas	0	0

Tableau 3.15 : Consommation énergétique et émission de CO₂ de la filière gazéification.

Le tableau 3.15 reprend les mesures de CO₂ en fonction de la méthodologie décrite ci-dessus. Ces résultats montrent qu'en analysant toute la filière de gazéification de la biomasse, sa neutralité du point de vue CO₂ est mise en cause. Même si l'on considère que le CO₂ émis

lors de la combustion de la biomasse ligneuse est celui que la plante a absorbé pendant sa croissance, on a ainsi montré que la production, la récolte, la collecte, le transport et le conditionnement de la biomasse peuvent émettre **52 à 124 kg** de CO₂ par tonne de biomasse. Ces émissions ne sont pas négligeables puisqu'elles représentent 5 à 10% des émissions dues à la combustion du diesel dans un groupe électrogène pour la production de la quantité équivalente en électricité, soit 1,2 MWh.

Pour compléter la comparaison, il faut se poser la question du devenir de la biomasse si elle n'avait pas servi à des fins de production d'électricité. Les émissions associées aux biomasses laissées sur le champ dépendent des usages. Si elles sont brûlées dans les chaudières comme ce serait le cas dans les usines de transformation de bois possédant des cellules de séchage, elles conduisent aux mêmes valeurs, mais le ratio devra tenir compte de la chaleur. Dans le cas des déchets abandonnés sur le terrain, selon le climat et la nature des déchets, une partie est détruite par digestion aérobie qui produit du CO₂ et éventuellement une autre partie par digestion anaérobie si le sol est suffisamment humide. Dans tous les cas, ils finissent par contribuer, dans des proportions diverses d'émission de CO₂ et de CH₄, aux émissions de gaz à effet de serre. S'ils sont mis en décharge, il produisent par fermentation 60 kg de CH₄ par tonne de déchets et 380 kg d'équivalent carbone sur 100 ans (GIEC).

3.5. Analyse économique de la filière gazéification de la biomasse au Cameroun

Dans ce paragraphe, la faisabilité économique de la filière de production d'électricité par gazéification de la biomasse au Cameroun est analysée selon trois objectifs, en utilisant les principes de l'Analyse Coûts-Bénéfices, décrits au paragraphe 2.4.1 :

1. l'intérêt économique de la filière comparée à la filière classique de production d'électricité par des centrales fonctionnant au gazole,
2. une comparaison de l'intérêt économique de différentes alternatives technologiques de la filière biomasse-électricité par « gazéification »,
3. une analyse de sensibilité de différents paramètres de cette filière.

3.5.1. Coûts d'investissement

L'investissement initial comprend :

- le coût du gazogène, de l'épurateur de gaz, et éventuellement celui du convoyeur,
- le coût du groupe électrogène (moteur, générateur, auxiliaires),
- le coût du transport, d'assurance, installation et éventuellement du génie civil.

Le marché des groupes gazo-électrogènes n'est pas encore très développé, ce qui rend très difficile une évaluation précise des coûts d'investissement. Certains fournisseurs allemand, français et irlandais proposent des prix variant entre 1300 et 2.700 €/kW électrique pour des systèmes de puissance électrique installée variant entre 50 et 500 kW².

Les projets de développement des centrales de production décentralisée d'énergie basées sur cette technologie, menés à l'Université catholique de Louvain, montrent que si X donne le coût du groupe électrogène, l'investissement total en est une fonction linéaire (tableau 3.16).

² information recueillie au sein du réseau thématique GASNET

	Production classique	GAZEL moteur dual-fuel	GAZEL moteur "tout gaz"
Groupe électrogène	X	X	X
Gazogène		X	X
Epurateur de gaz		0,5X	0,5X
Adaptation		0,3X	0,7X
Equipements annexes	0,4X	0,42X	0,48X
Total Investissement	1,4X	3,22X	3,68X

Tableau 3.16 : Structure des coûts d'investissement pour différentes filières

Pour les systèmes de petite puissance (inférieure à 50 kW), le coût du gazogène et de l'épurateur sont sensiblement égaux à 2X. Cette estimation provient du détail des investissements dans le cadre de la construction à l'UCL de deux installations (30 et 40 kW).

Pour l'option moteur « **tout gaz** », l'adaptation du groupe électrogène au fonctionnement 100% gaz de gazogène (carburateur approprié, la modification à l'avance de l'allumage et une réduction éventuelle du taux de compression) est plus onéreuse, mais le prix du gazogène ne change pas par rapport à celui utilisé dans l'option dual-fuel. Le coût d'adaptation est supposé valoir 70% du prix du groupe électrogène au lieu de 30% pour un fonctionnement en dual fuel.

Les prix de groupes électrogènes, pratiqués par les fabricants, se situent entre 150 et 450 €/kW installé pour la gamme de puissance 30-500 kVA. Chez IVECO par exemple (figure 3.8),

- P < 50 kW : 380 €/kW
- 50 kW < P < 125 kW : 225 €/kW
- P > 125 kW : 150 €/kW

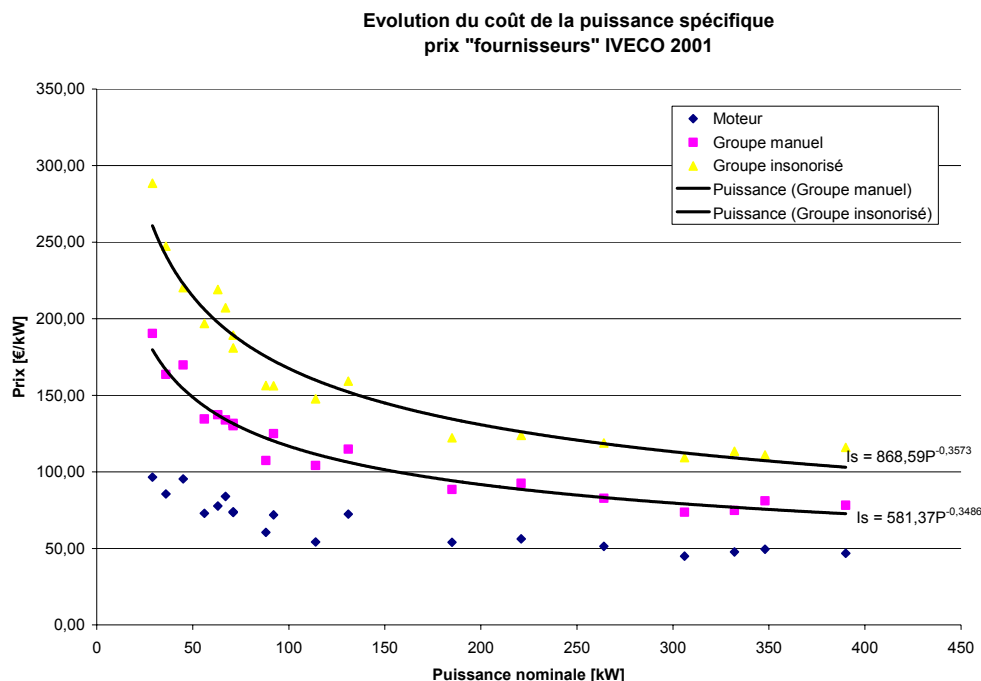


Figure 3.8. Prix des groupes électrogènes chez IVECO.

Le coût d'investissement aussi bien de l'ensemble gazogène-laveur que du groupe électrogène peut être exprimé sous la forme

$$I = A \cdot P^B$$

Les coefficients A et B peuvent être déterminés par la formule de régression à partir des prix pratiqués sur le marché. De la figure 3.8, on peut déduire :

- pour un groupe manuel :

$$I_s = 581,37 \cdot P^{-0,3486} \quad [€/kW] \quad \text{ou} \quad I = 581,37 \cdot P^{0,6514} \quad [€]$$

- pour un groupe insonorisé :

$$I_s = 868,59 \cdot P^{-0,3573} \quad [€/kW] \quad \text{ou} \quad I = 868,59 \cdot P^{0,6427} \quad [€]$$

Pour les centrales basées sur les groupes de cogénération, une enquête réalisée en 2000 auprès des fabricants des groupes diesel de puissance comprise entre 5 et 17 000 kW donne le coût d'investissement spécifique d'une installation complète et prête à fonctionner sur site (Energierferat, 2001). En prenant pour hypothèse que le coût des échangeurs représente la moitié du coût d'un groupe de cogénération, nous en déduisons pour une centrale produisant uniquement de l'électricité l'investissement selon la formule suivante :

$$I_s = 7328,5 \cdot P^{-0,5} \quad [€/kW] \quad \text{ou} \quad I = 7328,5 \cdot P^{0,5} \quad [€]$$

Dans certains scénarios, le coût d'investissement spécifique utilisé est celui obtenu auprès de XYLOWATT SA, l'entreprise belge fournissant les groupes gazo-électrogènes, soit 2500 €/kW pour une centrale gazo-électrogène complète livrée en Belgique et 500 €/kW pour une centrale classique au gazole.

Pour le génie civil (fondation, etc.), on peut appliquer un pourcentage du coût d'investissement total du système en fonction de la puissance nominale de l'installation : 15% si la puissance est inférieure à 20 kW, 10% si elle est comprise entre 20 et 100 kW et 8% si elle est supérieure à 100 kW.

La prise en compte dans le calcul du coût de revient du kWh de l'investissement revient à

calculer l'annuité du gazogène
$$A_g = \frac{a(1+a)^{t_g}}{(1+a)^{t_g} - 1} I_g$$

et celle du groupe électrogène
$$A_{GE} = \frac{a(1+a)^{t_{GE}}}{(1+a)^{t_{GE}} - 1} I_{GE}$$

a étant le taux d'actualisation, t_g la durée de vie de l'ensemble gazogène-laveur et t_{GE} celle du groupe électrogène.

Un forfait est appliqué pour les frais d'installation des équipements. Les frais de transport résultent d'une enquête auprès des transitaires belges et camerounais et s'élèvent en moyenne à 5000€ pour le transport de l'Europe vers le lieu d'implantation de la centrale au Cameroun.

3.5.2. Coûts d'exploitation

Les coûts d'exploitation d'une installation de gazéification sont exprimés annuellement et généralement constitués des frais de personnel, de maintenance et de réparation ainsi que des frais de combustibles et de lubrifiants.

a) Personnel d'exploitation

L'organisation de l'exploitation tient compte du contexte de libéralisation du secteur de l'électricité qui pourrait entraîner l'émergence de petites entreprises locales assurant la gestion

autonomes des centrales électriques. Même si elles faisaient partie d'un groupe, notre hypothèse considère que chaque centrale est une unité à part entière. L'organisation est dès lors envisagée comme suit : un ouvrier qualifié en mécanique assure les tâches techniques et assiste deux manœuvres dans la préparation et la manutention du combustible. Ils sont supervisés par un chef mécanicien ou un chef électricien. Ce chef assure en outre les tâches administratives, la gestion et la comptabilité de la production.

Si les salaires du chef mécanicien, de l'ouvrier et des deux manœuvres sont respectivement fixés à 250 €/mois, 150 €/mois et 75 €/mois chacun, on arrive à un coût salarial annuel de **6 600 €/an**. En y ajoutant 25% pour les charges sociales, il vient pour le personnel d'exploitation un coût total de **8.250 €/an**

b) Maintenance et réparation

On inclut ici toutes les dépenses courantes d'entretien, qu'elles soient relatives à la maintenance préventive ou exceptionnelle et on inclut également les assurances et taxes directement imputables au projet. Pour les besoins de cette analyse, une simplification a été introduite, considérant les dépenses en entretien-réparation constantes et égales chaque année à un pourcentage de l'investissement initial pour les équipements. L'expérience de divers projets énergétiques au Cameroun indique 3%. Ce taux est aussi appliqué en Europe pour les chaufferies urbaines à gaz ou à fuel (Recknagel et al, 1992). Ces données présentent néanmoins des incertitudes dont il faut tenir compte pour étudier la sensibilité.

Etant donné la particularité des systèmes gazo-électrogènes, nous considérons dans nos calculs comme c'est le cas en Inde (Tripathi et al., 1997) que les frais de maintenance et de réparation sont équivalents à 5% du coût d'investissement pour le gazogène et 10% pour le groupe électrogène.

c) Combustibles et lubrifiants

La consommation d'une centrale en combustible dépend de son rendement de conversion. Nous partons de l'hypothèse selon laquelle il faut 1 kg de biomasse sèche pour produire 1 kWh d'électricité, ce qui équivaut à un rendement moyen de conversion biomasse sèche-électricité de 20%. Ainsi, la quantité de biomasse nécessaire est évaluée à partir des besoins annuels escomptés. Etant donné qu'une installation de gazéification peut fonctionner aussi bien en diesel-gaz qu'au gaz de gazogène uniquement, nous établissons une formule générale pour calculer le coût résultant du combustible qui tienne compte du coût de la biomasse et du prix du diesel correspondant. Si

- td est le taux de diesel utilisé (il est nul dans l'option tout gaz),
- p_diesel , le prix du diesel en €/l,
- E , l'énergie produite sur une période en kWh,
- $p_biomasse$, le prix de la biomasse en €/kg,

le coût combustible sur la période considérée se calcule selon l'expression :

$$cc = \frac{ratio\ diesel_électricité}{0,86} \cdot p_diesel \cdot td \cdot E + (1 - td) \cdot E \cdot p_biomasse \quad (\text{en } \text{€})$$

Le coût de la biomasse est largement discuté au paragraphe 3.5.3. Nous effectuerons nos calculs avec un prix de revient du diesel égal à **200 FCFA, soit 0,305 € le litre**. On suppose pour toutes les options que les dépenses courantes en lubrifiants correspondent à 5% du coût du combustible.

3.5.3. Evaluation du coût de la biomasse

Le coût de revient de la biomasse à l'entrée du gazogène va être détaillé dans cette partie d'autant plus qu'il est fonction des coûts générés à chacune des étapes de la filière en amont de la phase de gazéification proprement dite. Dans ce qui suit, nous analysons pour chaque étape les différentes variantes lorsqu'elles existent et évaluons les coûts associés.

3.5.3.1. PRODUCTION ET RECOLTE OU COLLECTE

La production et la récolte de la biomasse cultivée spécifiquement à la production d'énergie sont discutées au paragraphe 3.5.4. En ce qui concerne les résidus agricoles, plusieurs auteurs (Tripathi et al, 1998) attirent l'attention sur le fait que le coût n'est négligeable qu'en cas d'auto-utilisation par le producteur. L'analyse des facteurs déterminant le coût global des résidus agricoles (production, récolte, collecte, conditionnement éventuel et transport des plantations jusqu'au lieu d'utilisation) montre que ce coût peut être important. L'approche consiste à intégrer les coûts liés à la production du produit noble.

Production des résidus : lorsque c'est possible, le coût de production des résidus est déterminé comme une fraction F du coût de production du produit noble (C_{pn}). Il s'agit d'allouer une partie des coûts de production du produit noble aux résidus (C_{pr}).

$$C_{pr} = F \cdot C_{pn}$$

Récolte : le coût de la récolte est souvent inclus dans le coût de production du produit noble.

Dans le cas des tiges de maïs et de coton où la récolte a lieu séparément après celle du produit noble, le coût lié à la récolte des tiges doit être pris en considération. Il peut être obtenu en divisant le coût moyen journalier de la main d'œuvre par la quantité de résidus récoltés, exprimée en tonnes par jour :

$$C_{rr} = \frac{C_{MO}}{q}$$

Collecte : les résidus agricoles doivent être rassemblés en un endroit du champ ou de l'industrie agricole avant le transport. Le coût de la collecte dépend de la quantité des résidus collectée par tour, du nombre n de tours par jour et par personne et du coût journalier de la main d'œuvre.

$$C_{rr} = \frac{C_{MO}}{q_v \cdot n}$$

Dans une étude réalisée au Burkina Faso (Tchouate et al, 1999), il ressort des discussions avec les paysans que le prix des tiges de coton par exemple ne peut être négligé, mais évalué de deux manières :

- soit il correspond à la main d'œuvre pour la coupe majorée d'un bénéfice dans ce cas respectivement 5000 FCFA et 2000 FCFA l'hectare,
- soit il est fixé en fonction de la perte de fertilité encourue par l'exportation des tiges. Cette évaluation est subjective puisque certains paysans estiment la perte par hectare à l'équivalent d'un sac de 50 kg d'engrais chimique et les autres à la moitié.

La deuxième éventualité n'est pas très crédible pour deux raisons : d'une part, les cendres issues de la combustion sur les champs des tiges de coton sont récupérées par les paysannes pour la fabrication de la potasse utilisée dans diverses préparations culinaires et pour la fabrication du savon, le reste étant le plus souvent balayé par le vent. D'autre part, les cendres

issues du gazogène peuvent être récupérées et redistribuées aux paysans. Nous partons de l'hypothèse que les paysans viennent chercher ces cendres à la centrale et la redistribution n'engendre aucun coût.

Sur base de la première éventualité et en considérant une production de 1,5 tonnes de tiges de coton par an et par hectare, on obtient un coût d'environ **4,7 FCFA le kg (7,16 € la tonne)** de tiges collectées.

3.5.3.2. TRANSPORT

Les différents acteurs susceptibles d'intervenir dans le transport de la biomasse ont été présentés au paragraphe 3.3.2. Suite à l'analyse, le transport par car a été écarté du fait de leur non fiabilité.

Il nous semble pertinent d'essayer d'évaluer pour chacune des 5 catégories retenues le coût de revient du kilogramme de bois transporté. Ce coût doit intégrer les investissements nécessaires pour cette activité, les frais d'exploitation et de personnel pour chaque catégorie. Tripathi et al (1997) utilisent la formule générale suivante pour le calcul du coût du transport par camions et par camionnettes :

$$C_{tr} = \frac{d(F_c \cdot C_f + S_{chauffeur})}{v \cdot Tare}$$

où d désigne la distance parcourue, $Tare$ la charge utile du véhicule, v la vitesse de transport en km/h, F_c la consommation horaire en fuel, C_f le coût du fuel et $S_{chauffeur}$ le salaire du chauffeur.

Les cyclistes, les piétons et les pousseurs transportent sur de petites distances et en petite quantité mais leur implication dans la filière contribue surtout en zone rurale à la création de nouveaux emplois, ce qui est un facteur social dont il faut tenir compte. Un critère social pourrait être défini par le nombre d'emplois créés pour le transport d'une unité de bois. En plus, ce sont les catégories dans lesquelles l'investissement de départ est abordable pour les populations rurales. Le nombre d'acteurs nécessaires à l'approvisionnement fiable d'une centrale à gazogène de taille moyenne est évidemment important avec ces catégories de transporteurs et entraîne une gestion plus complexe, ce qui peut se révéler une contrainte supplémentaire et, par ricochet, un facteur d'incertitude. Néanmoins, la multiplicité des acteurs aux yeux du gestionnaire pourrait être un avantage dans ce sens qu'elle peut limiter le risque de spéculation du prix de transport à la suite d'une entente entre les acteurs. L'amortissement du matériel de transport est calculé avec un taux annuel de 10%.

Le *cycliste* investit 100 000 FCFA³ pour un vélo que nous supposons qu'il amortira en 5 ans. Ce qui revient à un amortissement de 26.380 FCFA/an, soit 2198 FCFA/mois. Il dépense 2000 FCFA/mois pour les entretiens et réparations. La distance moyenne de 9 km lui permet d'effectuer 2 voyages par jour, soit 44 voyages par mois. Il aura transporté en moyenne 1760 kg de bois. Le cycliste, qu'il soit lui-même producteur ou acheteur, calcule son salaire sous forme de bénéfice sur l'opération, que nous supposons ici égal à 500 FCFA par voyage. On obtient alors un coût de revient de **14,88 FCFA/kg (22,68 € la tonne) de bois transporté**. Le nombre d'emplois créés est 12,5 homme-jours/tonne de bois. Il n'y a pas d'émission de CO₂ due au transport.

L'investissement pour le *pousse-pousse* vaut 200.000 FCFA et une durée d'amortissement de 5 ans peut être considérée comme modeste. Ses dépenses pour entretien et réparations peuvent

³ 1 € équivaut à 655,9 FCFA

être évaluées à 2000 FCFA/mois. Il doit payer un impôt libératoire de 3000 FCFA par an, soit 250 FCFA/mois et s'offre un salaire de 1000 FCFA/jour. Le pousseur effectue un seul voyage par jour en transportant en moyenne 100 kg de bois, donc 2200 kg par mois. Il vient alors un coût de revient de **13,02 FCFA/kg (19,85 €/tonne) de bois transporté** et un potentiel d'emplois de 10 homme-jours par tonne de bois transporté.

Pour les *camionnettes pick-up*, l'investissement de 5.000.000 FCFA est supposé être amorti en 10 ans. Ses frais fixes sont évalués à 150 000 FCFA/mois et les frais variables à 17.000 FCFA/voyage. Une camionnette transporte en moyenne 7 stères à 261 kg par voyage et réalise un voyage par jour. Le reste de temps est consacré au chargement et au déchargement. Il effectue en moyenne 22 voyages par mois, soit environ 40.191 kg de bois. Il vient alors un coût de revient équivalent à **12,23 FCFA/kg (18,64 €/tonne) de bois transporté**.

Les *camions* sont le plus souvent d'occasion. Leur coût d'investissement s'élève à environ 9.000.000 FCFA que nous supposons amorti en 10 ans. Les coûts fixes sont estimés à 413.692 FCFA/mois et les frais variables à 37.500 FCFA/voyage. Les coûts fixes sont diminués de la rubrique "autres frais" pour ceux qui possèdent un seul camion car cette rubrique reprend les frais administratifs divers liés à la gestion de plusieurs véhicules. En considérant une moyenne de 22 voyages par mois et le transport de 20 stères par voyage, il vient un coût de revient de **10,79 FCFA/kg (16,45 €/tonne) de bois transporté**. Par voyage, le camion consomme en moyenne 62,5 litres (55 à 70 litres) de diesel étant donné sa vétusté, ce qui correspond à une émission de 170 kg CO₂/voyage, soit environ 0,1 kg CO₂/kg/voyage.

	Piétons	Cyclistes	Pousseurs	Pick-up	Camions
Investissement	0	100 000 F	200 000 F	5 000 000 F	9 000 000 F
Coûts fixes					
Patente ou impôt libératoire			3000 F/an		60 000 F/an
Assurance					350 000 F/an
Contrôle technique					60 000 F/an
Autorisation					
Sécurité sociale					
Entretien, réparation	0	2000F/mois	2000 F/mois	50000 F/mois	250 000F/mois
Autres frais					500 000 F/an
Total coûts fixes [F/mois]	0	4198	6647	117792	405 833
[FCFA/kg]		2,38	3,02	2,93	3,60
Coûts variables					
Taxe de circulation				1000 F/voyage	1000 F/voyage
Chauffeur				1500 F/voyage	2500 F/voyage
Apprentis				1000 F/voyage	4000 F/voyage
Carburant et lubrifiant				10000 F/voyage	25000 F/voyage
Frais de route divers				3500 F/voyage	5000 F/voyage
Marge bénéficiaire en FCFA/voyage	500	500	1000		
Total des coûts variables				17000 F/voyage	37500 F/voyage
En FCFA/kg	31⁴	12,5	10	9,3	7,18
Prix de revient en FCFA/kg	31	14,88	13,02	12,23	10,79

Tableau 3.17 : Synthèse des coûts de différents acteurs du transport du bois.

⁴ Ce prix désigne le prix du bois à la vente

En résumé, le coût du transport de la biomasse varie de **11 à 15 FCFA le kg (soit 16,45 à 22,69 € la tonne)** en fonction du type d'acteur impliqué et du moyen utilisé.

Ces valeurs sont largement supérieures à celles déterminées dans l'étude ESMAP/MINMEE (1991), dont il ressort que le coût de transport varie de 2-2,5 FCFA/kg dans le Grand Ouest à 5,2-6,2 FCFA/kg dans le Grand-Nord en passant par 3,3-3,5 FCFA/kg à Douala et Yaoundé (tableau 3.18).

		Prix du producteur		Coût de transport		Marge revendeur		Prix de détail
		FCFA	%	FCFA	%	FCFA	%	FCFA
Grand Nord	Garoua	7,1	36,98	5,2	27,08	6,9	35,94	19,2
	Maroua	8,8	38,10	6,2	26,84	8,1	35,06	23,1
Grand Ouest	Bafoussam	12,8	40,20	2,5	9,80	10,2	40,00	25,5
	Bamenda	14,1	66,20	2	9,39	5,2	24,41	21,3
Capitales	Douala	7,8	37,14	3,3	15,71	9,9	47,14	21
	Yaoundé	9,1	34,73	3,5	13,36	13,6	51,91	26,2

Tableau 3.18 : Structure du prix du bois dans quelques localités du Cameroun

[Source : ESMAP/MINMEE, 1991].

3.5.3.3. STOCKAGE

Le coût de revient du stockage de la biomasse dépend de l'organisation de la filière et du type de local utilisé pour le stockage qui peut aller d'un hangar simple en construction traditionnelle (variante 3) à un hangar solide de construction moderne (variante 1). Les trois variantes envisagées sont présentées ci-dessous avec les investissements correspondants. Les coûts d'investissement représentent la moyenne des propositions faites par les entrepreneurs locaux suite à un appel d'offre. Pour chaque variante, le volume considéré est 500 m³.

Variante 1 : hangar avec murs en parpaings, dalle en béton et toiture en tôles
(coût : env. 15700 €),

Variante 2 : hangar avec murs et dalle en parpaings, et toiture en tôles
(coût : env. 12200 €),

Variante 3 : hangar en construction traditionnelle avec murs en matériaux locaux (briques de latérite ou bois) et toiture en tôles (coût : env. 5340 €)

Le stockage sous bâche pourrait coûter moins cher, mais son application sera examinée lors de la réalisation des projets. Il est préférable d'envisager des solutions plus coûteuses lors d'études de filière. En plus du type de construction qui influence directement le niveau d'investissement, l'évaluation du coût du stockage de la biomasse a été faite en tenant compte de la durée de vie économique du projet, de la quantité de biomasse susceptible d'être stockée sur cette période, du taux d'actualisation. Compte tenu du stock de sécurité, il faut construire à côté de la centrale au moins un hangar. La durée d'amortissement est supposée égale à 20ans, ce qui entraîne un facteur d'annuité de 0,0802. Etant donné l'influence du calendrier de disponibilité de la biomasse sur le coût du stockage, nous analysons ci-dessous les filières valorisant les tiges de coton (résidus agricoles) et la filière bois différemment. De même dans chaque filière, nous différencions les cas où le stockage est centralisé aux cas avec des stockages intermédiaires auprès des cultivateurs.

La filière coton

Le combustible disponible dans la partie septentrionale du Cameroun et favorable à la gazéification est la tige de coton. Sa disponibilité est saisonnière et son utilisation est controversée. Ainsi, nous supposons une consommation annuelle de la ville s'élevant à 260MWh. En considérant un rendement de 20%, la quantité annuelle de tiges de coton nécessaire est de 260 tonnes. Cette masse représente un volume impressionnant qui en plus est disponible sur quelques mois de l'année seulement. Pour garantir l'approvisionnement de la centrale pendant toute l'année, le stockage des tiges de coton devient plus qu'indispensable. Les besoins journaliers et mensuels de la centrale sont simplifiés respectivement à 715 kg et 22 tonnes de biomasse sèche.

Deux possibilités se présentent : soit on centralise le stockage autour de la centrale, soit on fait appel au stockage intermédiaire. Compte tenu du stock de sécurité, il faut dans tous les cas construire au moins un hangar pouvant contenir 44 tonnes de biomasse à côté de la centrale. La masse volumique des tiges de cotons telle que mesurée au laboratoire à l'UCL (Unité TERM) varie entre 134 kg/m³ et 150kg /m³. Cette masse volumique varie en fonction du bottelage. Certaines sources et des mesures effectuées par nous même au Burkina Faso ont donné des masses volumiques variant entre 30 et 200 kg/m³. Pour prendre en compte un bottelage imparfait des tiges, nous convenons d'effectuer nos estimations avec un ratio moyen de 100 kg/m³. Le volume nécessaire pour le stock de sécurité est donc de 440m³ et implique un hangar d'au moins 500 m³ de volume.

Cas 1 : centralisation du stockage : le coût du stockage est de **16 FCFA/kg** (variante 1), **12,3 FCFA/kg** (variante 2) et **5,4 FCFA/kg** (variante 3), soit respectivement **24,21 €/tonne, 18,82 €/tonne et 8,24 €/tonne**.

Cas 2 : stockage intermédiaire : d'après les informations recueillies sur place, il est envisageable de s'appuyer sur les organisations paysannes pour aménager des aires de stockage intermédiaires sur pilotis ou utiliser des cours de particuliers. La rétribution semble être raisonnable. En imputant à cela un surcoût forfaitaire estimé à 500 FCFA par mois et par tonne, le surcoût annuel du stockage intermédiaire s'élèverait à 594.000 FCFA. Ce montant a été obtenu avec l'hypothèse qu'à partir du troisième mois, le hangar principal est approvisionné selon le calendrier décrit par le tableau suivant :

MOIS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
stock central	44	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	0
stock intermédiaire	206	206	184	162	140	118	96	74	52	30	8	8
entrée hangar central	44	0	22	22	22	22	22	22	22	22	22	0
consommation de combustible	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
surcoût dû au stockage			22000	33000	44000	55000	66000	77000	88000	99000	110000	0
Total surcoût		594000										

Avec le hangar de la variante 1, ce surcoût implique un coût de stockage de la biomasse de **5,96 FCFA/kg ou 9 €/tonne**. Ce qui est bien avantageux par rapport au cas 1. Par contre, une combinaison avec le hangar de la variante 3 (resp. variante 2) donne un coût de stockage de **3,83 FCFA/kg ou 6 €/tonne** (resp. **5,22 FCFA/kg ou 8 €/tonne**).

Il est important de bien évaluer le surcoût dû au stockage intermédiaire lors de la fixation des prix. Le coût de transport étant fonction de la distance parcourue, on optimisera le surcoût de transport par un choix opportun des lieux de stockage intermédiaire, de préférence dans un rayon de 5 km, il est même possible que le stockage intermédiaire n'entraîne aucun surcoût de transport. Nous retiendrons pour la filière coton un coût de stockage variant entre **6 et 8 €/tonne**.

La filière bois

Le stockage du bois pose moins de problème parce qu'il est disponible tout au long de l'année. Le problème d'approvisionnement continu ne se pose pas et l'utilisation de stockages intermédiaires peut être limitée aux périodes durant lesquelles les plantations sont difficiles d'accès. Néanmoins, la sécurité d'approvisionnement et le conditionnement de la biomasse imposent un stockage de quantité suffisante pour assurer la production d'électricité pendant deux mois. Si nous supposons devoir satisfaire une consommation annuelle d'électricité de 245 MWh pour une puissance foisonnée de 200 kVA, les besoins annuels en bois seront par conséquent de 245 tonnes, soit 670kg par jour et 21 tonnes par mois. Le volume correspondant au stock de sécurité est de 420m³ et va nécessiter un hangar de 500m³. L'approvisionnement en bois se fera donc une fois par mois de façon anticipée. En tenant compte de l'investissement pour le hangar et de l'annuité permettant de le rembourser, fonction des hypothèses, il vient un coût de stockage de **3,4 FCFA/kg ou 5,14 €/tonne** (variante 1). Par contre, un hangar de la variante 3 (resp. variante 2) donne un coût de stockage de **1,15 FCFA/kg ou 1,75 €/tonne** (resp. 2,62 FCFA/kg ou 4 €/tonne). Nous retiendrons donc un coût moyen de stockage en filière bois de **1,15 à 3,5 FCFA/kg, soit 1,75 à 5,14 €/tonne**. Toutefois, dans certaines régions rurales du pays, ce coût peut être grevé du coût de stockage intermédiaire devenu nécessaire en raison de l'indisponibilité des fournisseurs retenus par d'intenses travaux champêtres durant les périodes de récolte.

3.5.3.4. LE CONDITIONNEMENT DE LA BIOMASSE

La gazéification de la biomasse impose des contraintes d'humidité et de granulométrie afin d'une part d'obtenir un meilleur rendement énergétique et d'autre part pour faciliter l'écoulement dans le gazogène. La granulométrie de la biomasse doit être proche de 5cm *10cm*0,1cm et avoir idéalement un taux d'humidité inférieur à 20%. Ainsi, le broyage et le séchage de la biomasse peuvent s'avérer nécessaires. Il est important de distinguer dans l'approche les résidus agricoles du bois.

Pour le broyage des résidus agricoles tels les tiges de cotonnier, nous considérons le hache-paille vendu pour moins d'un million de FCFA. En supposant un amortissement de 5 ans, les coûts fixes pour le broyeur s'élèveraient à 263.800 FCFA par an. Les coûts variables comprennent la consommation d'électricité et une partie du salaire de l'ouvrier que nous évaluons à 200.000 FCFA par an. Le broyage revient alors à environ **1,9 FCFA/kg (2,88 €/tonne)**.

Pour la filière bois, on suppose l'utilisation d'un broyeur industriel estimé à 8.000.000 FCFA (12000 €) à amortir sur 20 ans dont les coûts annuels d'opération et de maintenance sont évalués à 450 €, il vient un coût unitaire de broyage de **3,84 FCFA/kg (5,8 €/tonne)**. Nous retiendrons donc le coût moyen de broyage du bois à **4 FCFA/kg (6 €/tonne)**.

Le tableau 3.19 reprend en conclusion du paragraphe 3.5.3 les différents postes considérés dans le coût de la biomasse.

	Filière bois €/tonne	Filière coton €/tonne
Production/récolte/achat	15,55	7,17
Transport	16,45 – 22,69	5,5 – 12,65
Conditionnement, chargement	6	1,6 - 4
Stockage	1,75 – 5,14	5,14 – 8,39
Broyage	6	2,88
Total	45,75 – 55,38	23,39 – 37,28

Tableau 3.19 : Structure du coût de la biomasse à l'entrée du gazogène pour la filière la plus longue.

Le tableau 3.20 reprend les valeurs utilisées comme base de notre analyse. Pour une centrale valorisant les déchets de bois d'une scierie sur site, le prix du combustible à l'entrée du gazogène variera de **9 à 11,5 FCFA/kg, soit 13,72 à 17,53 €/tonne**. Quant au prix des tiges de coton, il résulte d'une enquête réalisée au Burkina Faso et nous supposons qu'il serait semblable au Cameroun. Il est clair que dans les zones rurales de la province de l'Est où l'introduction de la filière bois-électricité serait plus indiquée, le prix descendra en dessous de cette moyenne. Une étude de sensibilité sera effectuée sur le coût de la biomasse à l'entrée du gazogène.

	Filière bois €/tonne	Filière coton €/tonne
Production/récolte/achat	15,55	7,17
Transport	5,64	12,65
Conditionnement, chargement	6,1	6,4
Stockage	4,57	7,62
Total	31,86	33,83

Tableau 3.20 : Coût de la biomasse (valeurs utilisées en base dans les scénarios).

3.5.4. Hypothèses de l'analyse économique

- Comme discuté au §2.4.1, le choix du taux d'actualisation dans l'évaluation de la rentabilité d'un projet est déterminant. Dans cette étude, la valeur utilisée dans le scénario de base est 5% car c'est celui pratiqué dans les prêts consentis par la Banque Mondiale et autres bailleurs internationaux aux états africains pour le financement des projets à caractère social. Par contre, une variante est introduite avec un taux de 12%, afin de juger de l'opportunité d'un investisseur ne bénéficiant pas de ces types de financement, ce qui semble très élevé et pénalise les investissements d'infrastructure de base comme l'électrification des zones rurales et semi-urbaines, déjà fortement pénalisées par les contraintes socio-économiques.
- La durée de vie économique est fixée à 20 ans et prend en compte la durée moyenne de vie des équipements.
- En cas d'installation d'un moteur diesel-gaz, le taux de diesel admis est de 20%, c'est-à-dire que pour la production d'une unité énergétique, 20% du combustible consommé est constitué de diesel et le reste de biomasse.
- Ratio moyen diesel-électricité : 300 g/kWh

Trois cas sont analysés :

- une localité type I de 14.000 habitants en début de projet, avec une consommation domestique importante ;
- une localité type II de 3.500 habitants, avec un fort potentiel en petites industries ;
- une petite localité autour d'une entreprise de transformation de bois.

Dans le premier cas, nous supposons un coût d'investissement calculé selon la structure développée à l'unité de thermodynamique de l'Université catholique de Louvain et distinguons deux scénarios en fonction du niveau du taux raccordement de la population en début du projet. Ensuite, une étude de sensibilité est réalisée sur le prix du diesel, le coût de revient de la biomasse à l'entrée du gazogène et du coût d'investissement.

Dans le deuxième cas, le coût d'investissement est calculé selon l'offre obtenue de l'entreprise XYLOWATT SA et une variante du coût d'investissement combine la formule de régression obtenue à partir des résultats de l'enquête citée ci-dessus et la structure des coûts des installations développées à l'unité de thermodynamique. L'impact du prix du diesel sur la rentabilité est analysé par une étude de sensibilité.

Dans le troisième cas, les hypothèses sur l'investissement sont les mêmes que dans le deuxième, mais le taux d'actualisation considéré est plutôt 12%, respectivement 20% afin de prendre en compte les exigences de l'opportunité d'investir de l'entreprise.

3.5.4.1. LA LOCALITE TYPE I

Scénario 1 (de base)

Les besoins électriques sont estimés à 262.800 kWh en l'an 1, ce qui correspond à un taux de raccordement initial de 15%. Il reflète l'objectif visé dans les politiques énergétiques de plusieurs pays africains tels la Zambie, le Zimbabwe, le Bénin, etc. en vue de mieux rentabiliser l'investissement. Le taux de croissance annuel moyen (tcam) est de 7% de l'an 1 à l'an 10 ; et de 5% de l'an 11 à l'an 20.

La puissance installée est de 100 kW, ce qui implique un facteur de charge annuel moyen de 30% en l'an 1, et donc une durée d'utilisation de la puissance de pointe de 2600 heures. A l'an 10, la production sera de 483.150 kWh, ce qui correspond à un facteur de charge de 55%. Cela nécessitera une puissance supplémentaire de 100 kW pour un coût équivalent à celui de l'an 0. Ainsi à l'an 20, fin de la durée de vie économique de l'installation, le facteur d'utilisation serait de 45%.

Le tableau 3.21 présente pour un taux d'actualisation de 5%, les critères de rentabilité retenus en fonction de la filière.

	Production classique	Biomasse utilisée : coton		Biomasse utilisée : bois	
		Option « dual fuel »	Option « tout gaz »	Option « dual fuel »	Option « tout gaz »
Coût du combustible dans le kWh [FCFA]	62,8	30,3	22,2	29,3	20,9
Investissement actualisé [kFCFA]	43576	86167	96932	86167	96932
Coût du kWh produit [FCFA]	81,7	61,4	56,3	60,3	55
Indice de profitabilité	3,3	3,5	3,6	3,6	3,7
Temps de retour du surcoût d'investissement [ans]		3,4	3,4	3,4	3,4

Tableau 3.21 : Actualisation du capital à 5%.

En comparaison, les calculs ont été réalisés avec les mêmes hypothèses mais en pratiquant un taux d'actualisation de 12% (tableau 3.22).

	Production Classique	Biomasse utilisée : Coton		Biomasse utilisée : bois	
		Option « dual fuel »	Option « tout gaz »	Option « dual fuel »	Option « tout gaz »
Coût du combustible dans le kWh [FCFA]	62,8	30,3	22,2	29,3	20,9
Investissement actualisé [kFCFA]	35693	70380	79398	70380	79398
Coût du kWh produit [FCFA]	81,9	66,9	63,2	65,9	62
Indice de profitabilité	2,0	2,2	2,2	2,3	2,3
Temps de retour [ans]		3,5	3,5	3,3	3,3

Tableau 3.22 : Actualisation du capital à 12%.

Il ressort que la filière biomasse-électricité est la plus rentable. Elle permet une économie variant de 15 à 25 FCFA par kWh produit. Le surinvestissement de la filière est récupéré dans un délai de l'ordre de 3 ans. La filière bois est en général plus intéressante que la filière coton, ceci est fortement lié au coût du combustible à l'entrée du gazogène. L'option « tout gaz » présente un coût de revient moins élevé mais l'indice de profitabilité est sensiblement le même. Malgré l'investissement plus élevé, l'option « tout gaz » présente un coût de revient d'environ 4 FCFA/kWh moins élevé que l'option dual fuel. Les tableaux 3.21 et 3.22 expriment bien l'influence du taux d'actualisation sur la filière. On constate que même avec un taux d'actualisation élevé, le coût du kWh produit par la filière biomasse-électricité reste inférieur à celui produit par la filière classique.

Scénario 2

Ce scénario se distingue du précédent par le taux de raccordement initial de 7% au lieu de 15% et du taux de croissance moyen des raccordements, facteurs influençant la demande à satisfaire. Le taux de croissance annuel moyen des raccordements est de 10% pendant les 5 premières années, 7% pendant les 5 années suivantes et 5% le reste du temps. La puissance installée à l'an 0 est de 100kW et 136.000 kWh sont produits à l'an 1 à partir des tiges de coton. Les résultats, présentés dans le tableau 3.23, confirment que le niveau de rentabilité d'une installation est étroitement lié à la quantité d'énergie produite, c'est-à-dire au facteur d'utilisation de l'installation. On en conclut que le taux de raccordement initial est un indicateur crucial en faveur de la rentabilité de l'électrification rurale décentralisée, qu'elle soit basée sur la production classique ou sur la filière biomasse-électricité. Ainsi, les efforts

		Investissement actualisé [kFCFA]	Coût du kWh produit [FCFA]	Indice de profitabilité	Temps de retour [ans]
Taux d'actualisation 12%	Production classique	35693	100	0,3	
	Option « dual fuel »	70380	97	0,6	7,7
	Option « tout gaz »	79398	96	0,9	7,6
Taux d'actualisation 5%	Production classique	43576	96,6	1,1	
	Option « dual fuel »	86167	85,1	1,5	7,7
	Option « tout gaz »	96932	82,2	1,6	7,7

Tableau 3.23 : Résultats selon l'hypothèse du scénario 2.

devraient être alloués avant l'électrification d'une zone donnée pour atteindre un minimum d'abonnés, soit par le biais d'une intense campagne d'animation et de sensibilisation des consommateurs, soit par une diminution conséquente et adéquate des frais de raccordement,

ou encore par d'autres formes de financement adapté. Le taux de raccordement initial permet en outre de mesurer l'adhésion de la population au projet et leur disponibilité à payer le service électrique. On en déduit que le groupe gazo-électrogène installé dans une centrale hybride devra servir d'unité de base, quelle que soit l'option appliquée. Une centrale hybride désigne dans ce contexte une centrale dans laquelle sont installés des groupes électrogènes classiques et des groupes gazo-électrogènes.

Analyse de sensibilité

Les résultats obtenus ci-dessus dépendent des hypothèses considérées, notamment sur le taux de diesel dans l'option « dual fuel », le taux d'actualisation, le coût du diesel, le coût de la biomasse et l'investissement initial pour le groupe électrogène classique (X). L'analyse de sensibilité qui suit est réalisée avec les hypothèses du scénario1 et permet de mesurer la variation des critères de rentabilité en fonction de ces paramètres.

Dans nos graphiques, nous avons opté pour la représentation en fonction de la variable X. Le lecteur devra y être attentif pour ne pas fausser le montant réel de l'investissement. Par exemple, un investissement de 100 kFCFA/kW (152 €/kW) pour le gazogène correspond à un investissement de 322 kFCFA/kW (491 €/kW) d'équipements pour l'option « dual fuel » et 368 kFCFA/kW (560 €/kW) pour l'option « tout gaz ». Une installation avec option dual fuel dont l'investissement vaut 982 €/kW installé (équivalent à $X = 305$ €/kW) produit un kilowattheure à 0,11€. Par contre, la même installation mais avec option tout gaz coûterait 1122 €/kW installé et produirait un kilowattheure à 0,1 €/kWh.

Variation du coût d'investissement

Pour prendre en compte l'incertitude sur les coûts d'investissement, les scénarios suivant se réfèrent au scénario de base et l'on fait varier X de 100 à 300kFCFA/kW (152 à 457 €/kW).

L'investissement total intègre les coûts d'installation liés à la présence d'experts. Aussi, la puissance additionnelle prévue en l'an 10 est supposée égale à celle de l'an 1. Tout ceci alourdit volontairement l'investissement. Aussi, la valeur résiduelle des équipements est considérée nulle à la fin de la durée de vie économique. Dans le long terme, un transfert de technologie favorisera la construction locale de certains équipements (gazogène et autres relevant de la chaudronnerie) entraînant ainsi une réduction importante des investissements et l'on peut ainsi espérer une réduction du coût de revient du kilowattheure d'électricité produite.

Les graphiques de la figure 3.9 montrent que le coût de revient de l'électricité produite croît avec l'investissement spécifique de l'installation et cela pour toutes les filières envisagées. Néanmoins, il croît plus vite pour la filière biomasse que pour la filière classique et le break-even point est largement au dessus de 300 000 FCFA, soit 457 € le kilowatt installé pour le groupe électrogène. On constate aussi que malgré le surcoût de l'option tout gaz par rapport au dual fuel, le temps de retour n'est sensiblement influencé que pour les investissements équivalant aux valeurs de X supérieures à 305 €/kW. En outre, pour ces mêmes valeurs, les indices de profitabilité coïncident.

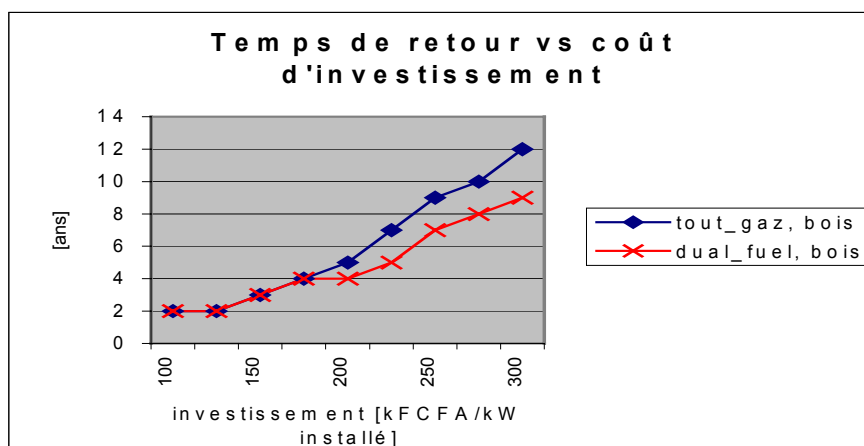
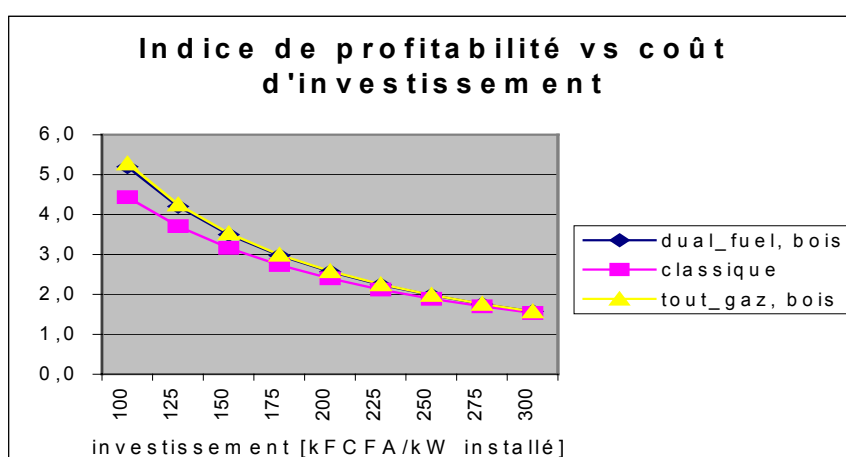
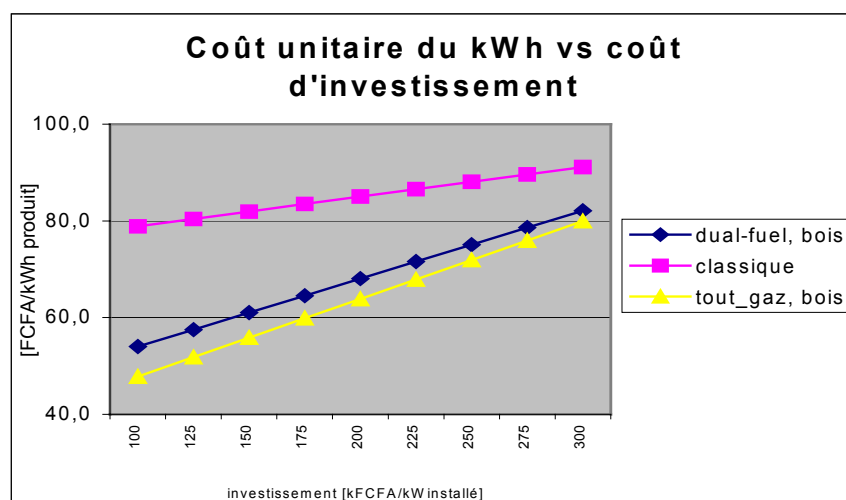


Figure 3.9. Evolution des paramètres économiques en fonction de l'investissement.

Influence du coût de la biomasse

Le coût de la biomasse est le facteur prépondérant de la viabilité de la filière de production d'électricité par gazéification de la biomasse. Les coûts tels que détaillés au début de l'analyse sont d'une relative incertitude et peuvent varier dans le temps en fonction d'un des postes le constituant : transport, stockage, séchage, production, broyage ... Certes, la disponibilité est

telle qu'elle ne serait pas le vecteur d'une éventuelle variation, mais il reste intéressant de connaître la tendance qu'auraient les critères retenus. La figure 3.10 illustre cette variation pour la filière coton. Pour rappel, le point 0 correspond à 22,2 FCFA le kilogramme de tiges de coton et les inputs correspondent au scénario de base. Le coût du kWh produit à partir de la filière classique vaut 81,7 FCFA/kWh (0,125 €/kWh).

Une augmentation de 45% du coût des tiges de coton à l'entrée du gazogène entraîne une croissance du coût de revient de 17% et une baisse de l'indice de profitabilité de 17% en option « tout gaz » et respectivement 13% et 15% en option « dual fuel ».

Le temps de retour a varié de plus ou moins quelques mois dans la marge considérée du coût des tiges de coton.

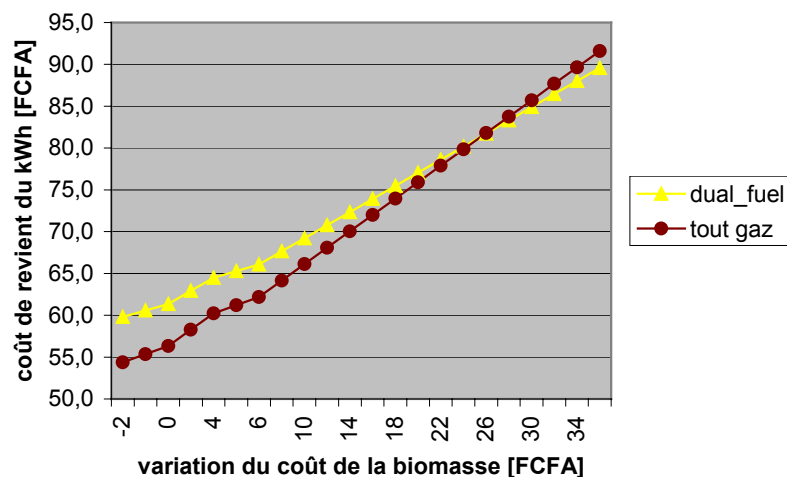


Figure 3.10. Evolution du coût de revient du kWh en fonction du coût des tiges de coton.

Notons que si le taux d'actualisation est 12%, une augmentation de plus de 22% du coût de revient du kWh égale le coût de revient de la filière classique. Ceci correspond à un coût de tiges de coton de 42 FCFA/kg (64 €/tonne). Le temps de retour correspondant est de 9,5 ans.

Pour un taux d'actualisation de 5%, le prix maximum admissible des tiges de coton est d'environ **48 FCFA/kg** (73,17 €/tonne) car au delà de ce prix, le coût de revient du kilowattheure pour les deux options est supérieur à celui de la filière de production classique. Le temps de retour du surcoût d'investissement est supérieur à 16 ans.

Influence du prix du diesel

Le prix du diesel considéré dans les calculs précédents est de 200FCFA, soit 0,30 € le litre. Depuis, le prix international du pétrole fluctue sans avoir une incidence directe sur les prix des produits pétroliers à l'intérieur du pays. Si les tentatives actuelles de libéralisation du secteur sur le continent africain devenaient une réalité au Cameroun, comment se comporterait la filière biomasse-électricité? C'est en voulant répondre à cette question que nous avons fait varier le prix du diesel de 95FCFA/l à 300FCFA/l (0,14 à 0,46 €/l). Les résultats sont illustrés dans la figure 3.11. On constate que par rapport au coût de revient, la filière biomasse n'est intéressante dans les conditions du scénario de base que pour un prix de diesel supérieur à 108 FCFA (0,165 €) le litre. Si, par contre, le temps de retour du surcoût d'investissement est le critère primordial et si en plus il doit être inférieur à 4 ans par exemple, la filière biomasse n'est intéressante que pour un prix de diesel supérieur ou égal à 140 FCFA/litre (0,213 €/litre). On peut remarquer aussi, sur la figure 3.11, que la pente de variation du coût de revient est moins élevée qu'avec le taux d'ignition du diesel.

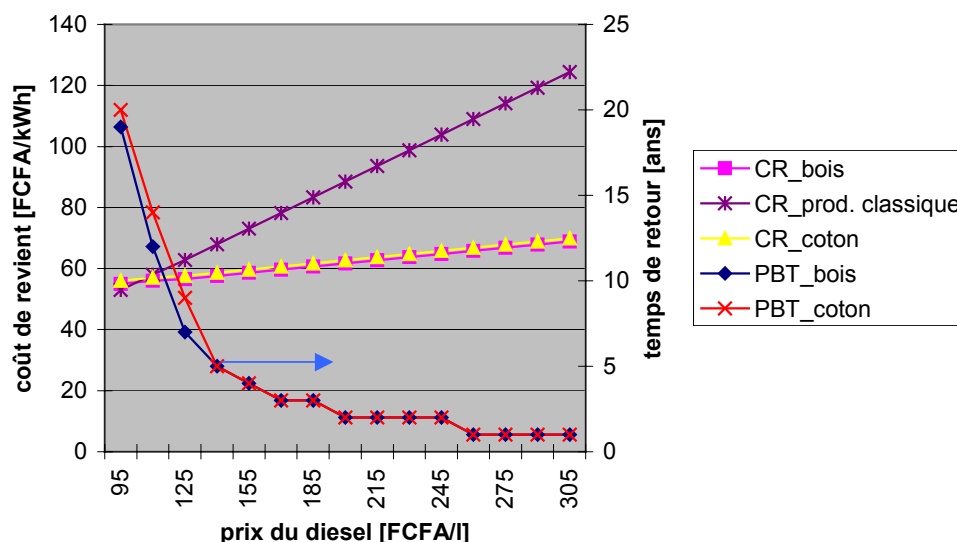


Figure 3.11. Influence du prix du diesel sur le coût de revient et le temps de retour

3.5.4.2. LA LOCALITE TYPE II

Pour la localité de ce type, les besoins en électricité ont été simulés selon les principes de l'électrification rurale décentralisée en tenant compte des différents types de consommateurs :

- les ménages moyens et gros consommateurs (secteur résidentiel) : le nombre de ménages de la localité s'obtient en divisant sa population par la taille moyenne d'un ménage considérée ici égale à 6,2⁵.
- les services collectifs (administration, écoles, poste de santé, salle communautaire, etc.),
- l'éclairage public,
- les commerçants et ateliers de couture,
- les petites industries (ateliers mécaniques, moulins, etc.).

Pour chaque catégorie, les puissances unitaires, les consommations unitaires, le taux de croissance et un coefficient de simultanéité ont été appliqués, résultant en la puissance appelée du réseau et en la consommation annuelle.

L'évolution du taux de raccordement pour chaque catégorie permet de prédire l'évolution des besoins de la localité (puissance et énergie) sur la durée économique du projet et par ricochet la programmation des investissements. Dans ce cas précis, la puissance appelée au réseau est inférieure à 100 kW en année 1, mais va atteindre 209 kW à la fin du projet. L'énergie demandée est respectivement 300 MWh et 649 MWh. Pour couvrir ces besoins et tenir compte des pertes éventuelles de distribution, une unité de 150 kW sera installée au début du projet et une augmentation de la puissance installée sera nécessaire en année 10, à hauteur de 80 kW. Par contre, il est supposé que tous les frais d'investissement de génie civil et les équipements électriques n'interviennent qu'en début de projet.

Pour un coût d'investissement de 2500 €/kW d'une centrale biomasse et 500 €/kW installé pour une centrale classique, on obtient les résultats suivant repris dans le tableau 3.24.

⁵ valeur usuelle recommandée dans « le guide technique de l'Electrification Rurale Décentralisée » Christophe de Couvello

		Investissement actualisé [€]	Coût du kWh produit [€]
Taux d'actualisation 12%	Production classique	107209	0,174
	Option « dual fuel »	465009	0,251
	Option « tout gaz »	465009	0,236
Taux d'actualisation 5%	Production classique	119821	0,161
	Option « dual fuel »	502582	0,196
	Option « tout gaz »	502582	0,181

Tableau 3.24.

On remarque que la filière classique est plus favorable dans ce cas. La filière GAZEL en dual-fuel ne devient intéressante que pour un coût de gazole supérieur à 0,572 € le litre (soit 375 FCFA/litre) pour un taux d'actualisation de 12%, et 0,419 €/litre (soit 275 FCFA/litre) si le taux d'actualisation est de 5%. Pour une centrale GAZEL en option tout gaz, le coût de revient du kWh est respectivement de 0,174 € et 0,161 €. Cette option est la plus intéressante si le coût du gazole est respectivement supérieur à 0,457 €/litre (300 FCFA/litre) et 0,343 €/litre (225 FCFA/litre).

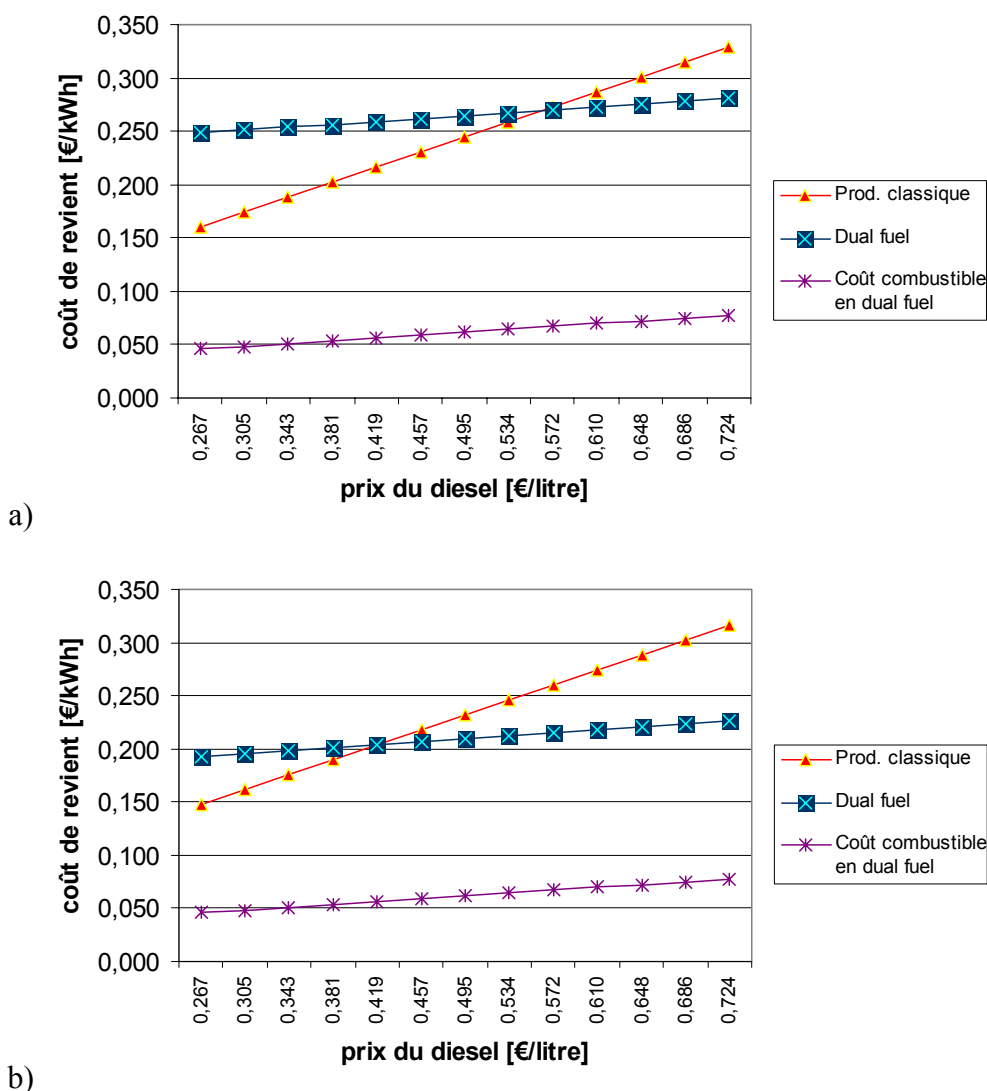


Figure 3.12. Evolution du coût de revient du kWh en fonction du prix du diesel (a : actualisation à 12% ; b : actualisation à 5%).

Si nous calculons l'investissement pour le groupe électrogène à partir de la fonction de régression :

$$I_s = 7328,5 \cdot P^{-0,5} \quad [€/kW] \quad \text{ou} \quad I = 7328,5 \cdot P^{0,5} \quad [€]$$

nous obtenons une meilleure rentabilité pour la filière biomasse (tableau 3.25).

		Investissement actualisé [€]	Coût du kWh produit [€]	Indice de profitabilité	Temps de retour [ans]
Taux d'actualisation 12%	Production classique	175588	0,186	0,1	
	Option « dual fuel »	361610	0,207	0,3	13
	Option « tout gaz »	426558	0,210	0,4	14
Taux d'actualisation 5%	Production classique	198315	0,175	0,1	
	Option « dual fuel »	390078	0,172	0,6	13
	Option « tout gaz »	439792	0,163	0,8	14

Tableau 3.25.

Aucune des variantes n'est à priori rentable, l'indice de profitabilité est plus élevé pour la filière biomasse-électricité par gazéification. Cet exemple met en évidence l'importance de l'intervention de l'Etat ou des bailleurs de fonds publics dans la mise en oeuvre des programme d'électrification rurale du fait qu'ils accordent des financements à taux bonifié. Malgré la relative meilleure rentabilité de la filière biomasse au taux d'actualisation de 12%, le coût de revient du kilowattheure est plus élevé que pour la production classique. Aussi le temps de retour du surcoût de l'investissement approche les 15 ans et par conséquent n'est pas de nature attirer les investisseurs privés.

3.5.4.3. UNE PETITE LOCALITE AUTOUR D'UNE INDUSTRIE DE TRANSFORMATION DE BOIS

Le concept ici est une scierie comme il en existe plusieurs au Cameroun, située en zone hors réseau interconnecté, autour de laquelle est né un village de travailleurs et leur famille. La scierie produit de l'électricité pour ses besoins propres et alimente le village. L'ensemble des équipements de la scierie ont une puissance nominale de 300 kW avec un coefficient de foisonnement de 0,8. On suppose que la puissance appelée par la scierie croît de 1% et la consommation de 2% par an. On suppose que la population de la localité, estimée à 600 habitants en début de projet, croît de 5% par an, que 10% des ménages sont connectés dès la première année d'électrification et que le nombre d'abonnés croît de 5% par an. En tenant compte des catégories de consommateurs (administration, quelques gros consommateurs résidentiels, quelques commerçants et ateliers de couture ou de fabrication), la puissance de pointe appelée varie de 264 kW la première année à 344 kW à l'an 20 du projet. En tenant compte d'une réserve de 10%, la puissance disponible évolue de 292 kW à l'an 1 à 325 kW à l'an 10, puis 379 kW à l'an 20. Les besoins en énergie sont de 1619 MWh en l'an 1 à 2391 MWh en l'an 20. Les investissements sont planifiés comme suit : on démarre avec un groupe électrogène de 330 kW de puissance nominale, mais après 10 ans, il faudra un groupe supplémentaire de 80 kW. Le combustible primaire utilisé est le bois récupéré comme résidu de transformation. Sa production ne coûte rien, mais on suppose que son conditionnement (ramassage, stockage, broyage et éventuellement tamisage) revient à 16,3 € la tonne, soit environ 11 FCFA le kg. Etant donné que l'investissement ici peut être considéré comme purement privé, le taux d'actualisation considéré sera 12% en base avec une variante à 20%.

Hypothèse I : Investissement selon la formule de régression

Le tableau 3.26 montre que les deux options de la filière biomasse sont plus rentables que la filière classique avec un temps de retour du surcoût d'investissement de deux ans et ont un gain de 20% à 38% sur le coût de revient du kWh. Selon ces résultats, la filière biomasse attirerait aisément les investisseurs privés, d'autant plus que l'introduction éventuelle des subsides liés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre améliorerait la rentabilité.

		Investissement actualisé [€]	Coût du kWh produit [€]	Indice de profitabilité	Temps de retour [ans]
Taux d'actualisation 12%	Production classique	237963	0,128	1,8	
	Option « dual fuel »	509463	0,089	2,5	2
	Option « tout gaz »	624830	0,079	2,5	2
Taux d'actualisation 20%	Production classique	227674	0,127	1,2	
	Option « dual fuel »	496709	0,100	1,6	2
	Option « tout gaz »	614995	0,095	1,6	2

Tableau 3.26 : Résultats d'analyse économique : cas d'un groupe GAZEL de 300 kW installé dans une scierie et alimentant une petite localité environnante (hypothèse I).

Hypothèse II : Investissement à raison de 2500 €/kW pour le groupe gazo-électrogène et 500 €/kW installé pour le groupe diesel.

On note (tableau 3.27) que dans l'option dual fuel, le coût de revient du kilowattheure produit est supérieur à celui qu'aurait produit un groupe électrogène au gazole dans le cas d'un taux d'actualisation de 20%. On peut lire sur la figure 3.13 que la situation s'inverse dès que le coût du gazole dépasse 0,343 € le litre (soit 225 FCFA le litre). Néanmoins, pour les deux taux d'actualisation considérés, l'indice de profitabilité et le TRI sont plus élevés pour la filière classique. Il est raisonnable d'envisager qu'un coût moins élevé du bois, combiné à des recettes éventuelles provenant d'une rétribution des réductions d'émissions, donnera l'avantage à la filière biomasse-électricité.

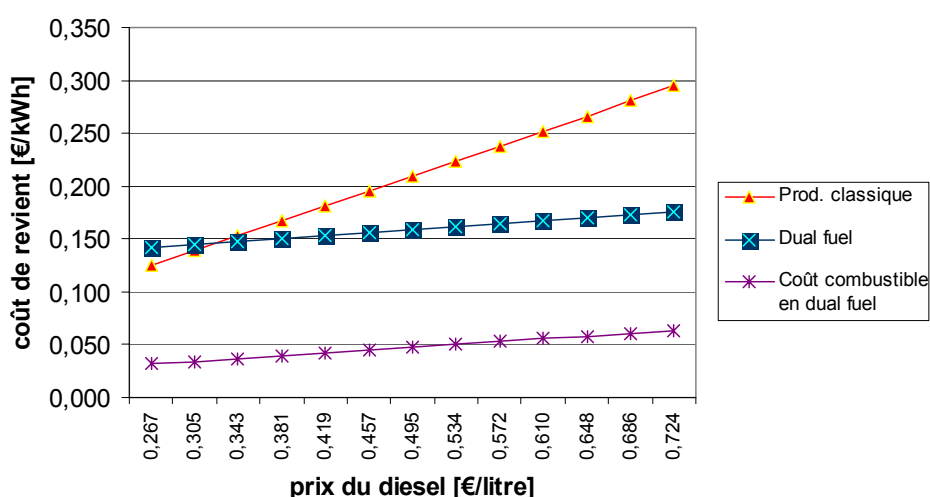


Figure 3.13. Evolution du coût de revient actualisé en fonction du prix du diesel. Cas d'un groupe GAZEL de 300 kW installé dans une scierie et alimentant une petite localité environnante.

		Investissement actualisé [€]	Coût du kWh produit [€]	Indice de profitabilité	TRI
Taux d'actualisation 12%	Production classique	199193	0,133	2,84	31%
	Option « dual fuel »	934781	0,116	1,92	22%
	Option « tout gaz »	934781	0,097	2,23	25%
Taux d'actualisation 20%	Production classique	194860	0,139	1,95	32%
	Option « dual fuel »	920219	0,145	1,32	22%
	Option « tout gaz »	920219	0,126	1,53	22%

Tableau 3.27 : Résultats d'analyse économique : cas d'un groupe GAZEL de 300 kW installé dans une scierie et alimentant une petite localité environnante (hypothèse II).

3.5.5. Analyse de la filière basée sur les cultures énergétiques

Ce paragraphe propose une méthodologie d'étude de faisabilité technique et économique des centrales électriques utilisant la biomasse cultivée comme combustible. Cette méthodologie (inspirée de Maiorano, 2000) tient compte des variables telles que la puissance du groupe, le rendement de conversion et la surface cultivée qui influencent principalement le coût du combustible. Elle a pour objectif de déterminer le rayon optimal de la surface à cultiver. Tous les paramètres de la centrale sont alors exprimés en fonction du rayon r et le rayon optimal est celui qui minimise les coûts de transport du combustible et maximise les revenus de la vente d'énergie électrique.

Après avoir évalué les besoins en électricité d'une localité, cette méthode permet une première approche de la rentabilité en fonction de la disponibilité des terres pouvant être affectées aux cultures énergétiques. Les critères utilisés sont :

- la valeur actualisée nette du projet :
$$VAN(r) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} (R - D) - I_s P$$

- l'indice de profitabilité :
$$IP(r) = \frac{VAN(r)}{I_s P} + 1$$

En supposant que la biomasse est cultivée uniformément sur une surface circulaire de rayon r autour de la centrale et que l'investissement et le coût de production est proportionnel à la puissance nominale de la centrale, on obtient ce qui suit.

Les dépenses annuelles de la centrale peuvent être décomposées en coûts fixes D_f , coût d'approvisionnement du combustible D_c et coût de maintenance et réparation D_{OM} .

$$D = D_c + D_{OM} + D_f$$

Le coût du combustible comprend le coût de production (culture, récolte et stockage) D_{cp} et le coût du transport D_{ct} jusqu'à la centrale.

$$D_c = D_{ct} + D_{cp}$$

Si d_s désigne le coût spécifique de production en Euro/kg et ρ la densité de production en tonne par an au km², on peut écrire :

$$D_{cp} = d_s \cdot \pi r^2 \rho$$

Si d_t désigne le coût du transport au km, on peut écrire :

$$D_{ct} = \iint (d_t \rho r^2) \partial r \partial \vartheta = \frac{2}{3} \pi d_t \rho r^3$$

On suppose les coûts annuels de maintenance, d'exploitation et de réparation égaux à une fraction k de l'investissement initial :

$$D_{OM} = k I_s P$$

Si p est le prix de vente du kWh et E l'énergie produite sur l'année, le revenu annuel de vente d'électricité est :

$$R(r) = p \cdot E = p(PCI \cdot \eta_E \cdot \pi r^2 \rho)$$

où l'on tient compte du pouvoir calorifique inférieur (PCI) de la biomasse et du rendement de conversion de l'installation.

En tenant compte de la durée d'utilisation t de l'unité de production, le développement donne avec $E = P \cdot t$:

$$VAN(r) = -\frac{2}{3} a \pi \rho d_t r^3 + PCI \cdot \pi \rho \eta_E \left(a p - \frac{I_s(1+ak)}{t} \right) r^2 - a D_f$$

avec

$$a = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

$$IP(r) = \frac{VAN(r)}{I_s P} + 1 = 1 + \frac{VAN(r) \cdot t}{I_s \cdot PCI \cdot \pi \rho \eta_E r^2}$$

Le profit est maximal si :

$$\frac{\partial IP(r)}{\partial r} = 0$$

donc pour une valeur :

$$r_0 = \left(\frac{3 D_f}{\pi \rho d_t} \right)^{1/3}$$

Le rayon optimal est ainsi fonction des dépenses fixes du coût du transport et de la densité volumique du combustibles.

3.6. Conclusions

Ce chapitre a montré une grande disponibilité en biomasse ligneuse au Cameroun. Les possibilités de valorisation énergétique vont varier selon les secteurs. Le potentiel brut disponible dans les industries de première transformation varie entre **496.411 et 805.703 tonnes**. En tenant compte des utilisations actuelles, ce potentiel est réduit environ au tiers (entre 176.663 et 301.862 tonnes). Une valorisation par la gazéification correspondrait à un potentiel théorique de production d'électricité compris entre **200 GWh et 360 GWh**. De 20.000 à 33.200 tonnes de sciures et poussières de ponçage sont valorisables dans les chaudières à bois aussi bien pour la production d'électricité que de vapeur pour l'alimentation des séchoirs.

Les rémanents forestiers constituent le plus gros du potentiel, **500 à 700.000 tonnes**, ce qui correspond à **600 à 840 GWh** d'électricité par an. Leur distribution spatiale est une contrainte à leur valorisation, mais il y a lieu d'espérer que l'implication des populations à travers les forêts communautaires se développera grâce à la nouvelle réglementation qui facilitera l'organisation de l'exploitation forestière.

Parmi les résidus agricoles, les tiges de cotonniers (**500 à 700.000 tonnes**) constituent un potentiel important, concentré dans la partie septentrionale du pays. Si la bagasse de canne à sucre, les rafles de palmiers et fibres de palmistes sont largement valorisés énergétiquement, les coques de noix de palme (235.000 tonnes/an) et les parches de café restent disponibles en grande quantité.

Ce chapitre a permis d'analyser trois paramètres de l'analyse économique de la filière biomasse électricité par gazéification. Les études de cas ont indiqué que cette filière peut être plus rentable que la filière classique de production d'électricité à partir des groupes alimentés au gazole, surtout et principalement dans les industries de transformation de bois qui pourraient ainsi valoriser leurs résidus. Cette rentabilité dépend de plusieurs facteurs : l'investissement, le taux d'actualisation, le coût de la biomasse, le coût du diesel. Le tableau 3.28 résume le coût de la biomasse à l'entrée du gazogène en fonction du type.

Etapas			Résidus scieries		Résidus agricoles		Bois mort (1)		Bois mort (2)		Bois cultivé	
	min (€/tMS)	max (€/tMS)	min (€/tMS)	max (€/tMS)	min (€/tMS)	max (€/tMS)	min (€/tMS)	max (€/tMS)	min (€/tMS)	max (€/tMS)	min (€/tMS)	max (€/tMS)
Production, récolte, collecte												
villageois et propriétaires de plantations	2,3	7,6					2,3	7,6	2,3	7,6		
petit producteurs	20	25										
grands producteurs	11	21,5									11	25
Résidus agricoles	7	12			6	8						
Scieries	0	3	0	3								
Transport												
cyclistes	20	25,4					20	25,4				
pousseurs	18	22			18	22						
camionnettes	17	20,3									17	22
camions	14	18,9							14	22		
Stockage	1,8	8	1,8	5,14	6,0	8,0	1,75	5,14	1,75	5,14	1,75	5,14
Conditionnement de la biomasse	2,88	7	5	7	2,88	4	5	7	5	7	5	7
Total			6,8	15,1	32,9	42,0	29,1	45,1	23,1	41,7	34,8	59,1

Tableau 3-28 : Récapitulatif du coût de la biomasse à l'entrée du gazogène selon le type

Le bilan environnemental de la filière de gazéification de la biomasse met en cause sa neutralité du point de vue CO₂. Même si l'on considère que le CO₂ émis lors de la combustion de la biomasse ligneuse est celui que la plante a absorbé pendant sa croissance, on a ainsi montré que la production, la récolte, la collecte, le transport et le conditionnement de la biomasse peuvent émettre **54 à 134 kg de CO₂** par tonne de biomasse. Ces émissions, non négligeables, représentent 5 à 10% des émissions dues à la combustion du diesel dans un groupe électrogène pour la production de la quantité équivalente en électricité, soit 1,2 MWh. Il vient que dans la phase d'approvisionnement d'une centrale GAZEL dans le contexte camerounais, les émissions sont comprises entre **45 et 113 kgCO₂** équivalent par MWh d'électricité produite. Les sous filières les moins polluantes sont celles valorisant les résidus des scieries et les coques de noix de palme qui pour la plupart ne nécessitent ni transport, ni broyage. En outre, une unité de gazéification alimentée en dual fuel (15 à 20% de diesel) contribue aux émissions de GES à hauteur de **200 à 300 kgCO₂** équivalent par MWh d'électricité.

La filière gazéification est également génératrice d'emplois, principalement dans l'agriculture et la foresterie pour l'approvisionnement des centrales en combustibles, ce qui est un facteur important de développement pour les zones rurales camerounaises. Seuls les emplois directs ont pu être estimés dans le cadre de ce travail et les résultats (**8 à 83 homme-jours par tonne de biomasse traitée**) sont détaillés dans l'avant dernière colonne du tableau 3.29 pour chaque étape de la filière. Une évaluation plus complète devrait tenir compte des emplois indirects induits par l'introduction de la filière, notamment pour la réparation et la maintenance des équipements électromécaniques et des effets négatifs liés à la perte d'emplois dans la filière classique de production ainsi substituée, principalement le transport du diesel des dépôts centraux aux centrales.

	<i>Energie consommée[GJ/tMS]</i>	<i>CO2 émis [kg/tMS]</i>	<i>Emplois directs [homme-jours/tMS]</i>
<i>Production, Récolte, Collecte</i>			
Cultures énergétiques	0.3-0.8	22-60	25-50
Résidus agricoles	0		2-4 (short term)
Résidus forestiers	0.3-1	22-74	8-12
Déchets de scieries	0		1-2
<i>Transport de la biomasse</i>			
Cyclistes	-	-	10-15
Pousseurs	-	-	7-13
Pick-up	0.44-0.8	32-60	1-1,3
Camions	0.4-0.6	30-50	0.3-0,5
<i>Stockage</i>			1-3
<i>Conditionnement de la biomasse (séchage et stockage)</i>			1-4
<i>Conversion du gaz en électricité</i>			
Moteur Dual fuel	2.8-3.7	243-276	6-10
100% gaz	-	-	5-7

Tableau 3.29 : Estimation de la consommation énergétique, des émissions et des emplois directs créés de la filière de production d'électricité par gazéification au Cameroun.