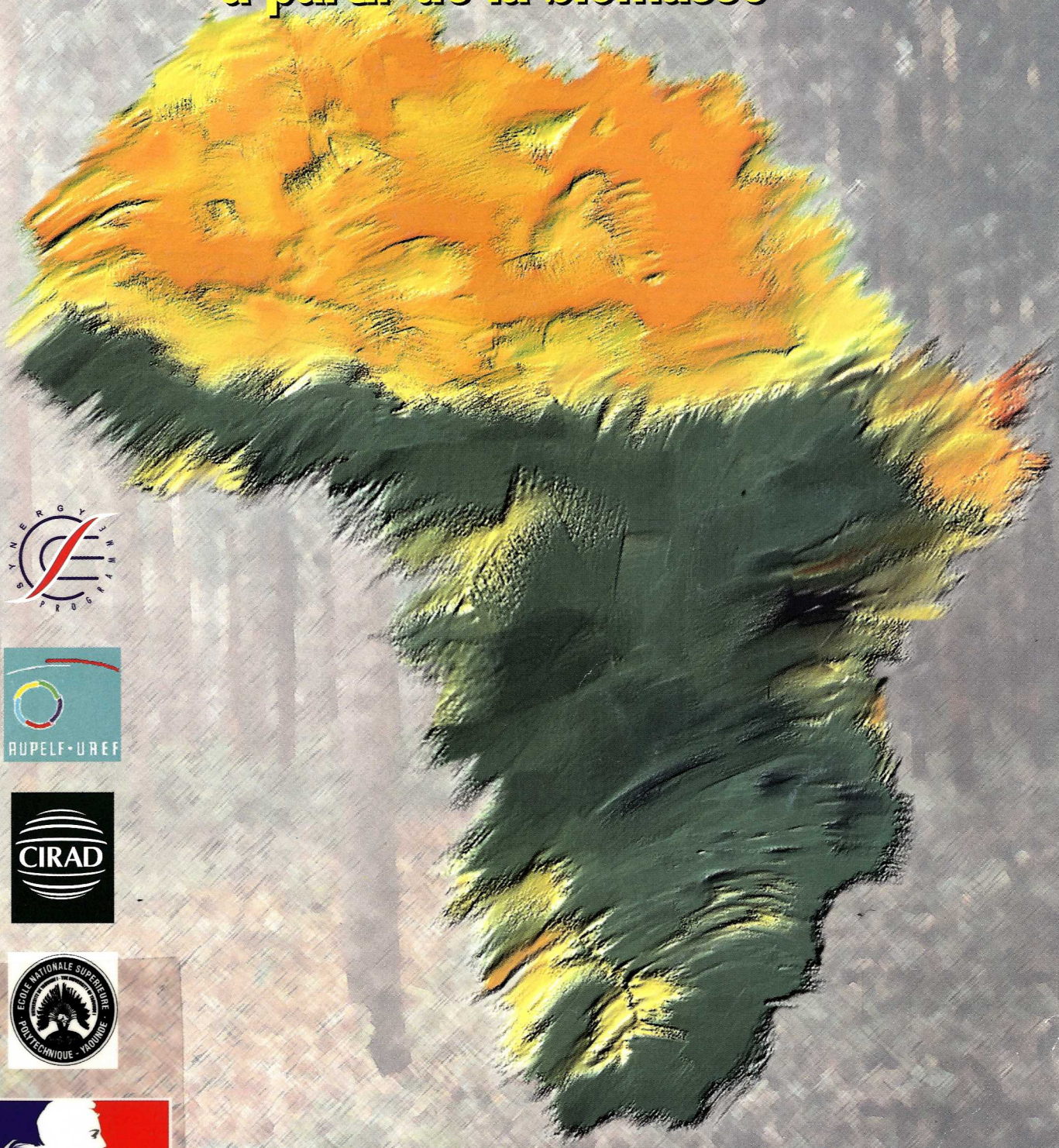
Faisabilité de projets d'électricité rurale décentralisée à partir de la biomasse



SYNERGY PROGRAMME

AUPELF-UREF

CIRAD

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE YAOUNDE

iberté • Égalité • Fraternité

Actes de l'atelier régional du 25 au 30 Septembre 2000
YAOUNDE (CAMEROUN)

ORGANISATION ET SUIVI DE L'ATELIER DE FAISABILITE DE PROJET D'ELECTRICITE RURALE DECENTRALISEE A PARTIR DE LA BIOMASSE

CIRAD-Forêt

Ecole Nationale Supérieure de Polytechnique

CIRAD-Dist
UNITÉ BIBLIOTHÈQUE
BAILLARGUET

CIRAD-Dist
UNITÉ BIBLIOTHÈQUE
Baillarguet

YAOUNDE (CAMEROUN) 25 au 30 Septembre 2000

DK478620

LES TECHNIQUES DE COMBUSTION ET DE GAZEIFICATION POUR LA VALORISATION DE LA BIOMASSE ET DES DECHETS AVEC OU SANS COGENERATION

Philippe GIRARD
CIRAD-FORET - TA 10/16, 73 rue Jean François Breton - 34398 Montpellier - FRANCE
Tél : 04.67.61.44.90 - Fax : 04.67.61.65.15 - philippe.girard@cirad.fr
Oumar SANOGO
IRSAT-SNRST- BP 7047 - Ouagadougou - BURKINA FASO
Tél : 226.30.08.65 - Fax : 226.35.70.29 - sanogo.oumar@bf.refer.org

INTRODUCTION

L'énergie électrique est la forme d'énergie la plus recherchée dans le monde et malheureusement la moins bien répartie. Ainsi, de nombreux pays tropicaux souffrent d'un déficit important en terme de capacité de génération mais aussi et surtout de distribution. Le milieu rural est de fait le plus mal desservi et des millions de personnes n'ont pas accès à l'électricité.

L'essentiel de l'électricité produite, à l'exception du nucléaire et de l'hydroélectricité pour certains pays (France,....), est produite à partir de technologies de combustion de produits pétroliers ou de charbon.

Le terme de combustion s'applique à l'ensemble des phénomènes qui se manifestent quand un corps combustible se combine partiellement ou en totalité avec un autre corps appelé comburant en dégageant de la chaleur. D'une manière générale, un combustible conventionnel de type industriel ou domestique est un mélange complexe de composés organiques qui pourrait être représenté par la formule chimique globale : $C_m H_n O_p N_q S_t$. qui lors de la combustion va se transformer en CO_2, H_2O et chaleur. En dehors des combustibles conventionnels : produits pétroliers, charbon, gaz,..., les combustibles peuvent être des résidus agro-industriel et forestiers, déchets et sous-produits divers.

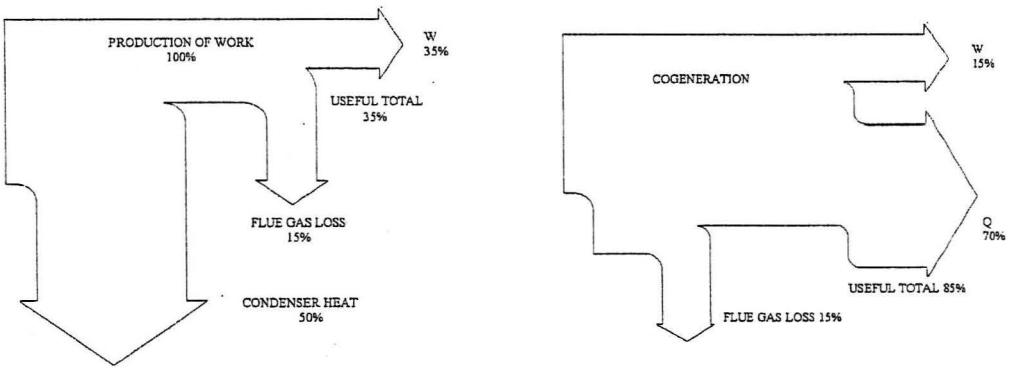
Afin de satisfaire la demande croissante en énergie, les pays tropicaux cherchent à développer des solutions leur permettant d'une part une meilleure utilisation de leurs ressources énergétiques et d'autre part de développer des alternatives susceptibles de leur garantir une certaine indépendance énergétique. L'utilisation de la biomasse comme source primaire d'énergie par la cogénération fait partie de ces solutions.

Qu'est ce que la cogénération ?

La cogénération consiste à valoriser simultanément de deux manières différentes une même quantité d'énergie primaire en deux sources d'énergie utiles :

- Une énergie mécanique qui peut être utilisée pour l'entraînement de compresseurs, ventilateurs, ... mais plus généralement pour la production d'électricité via un alternateur ;
- Une énergie thermique disponible sous la forme d'un fluide caloporteur facilement utilisable : vapeur, eau chaude, huile, air chaud,...

Ainsi, la chaleur générée lors de la combustion est mieux utilisée dans la mesure où une partie est transformée en énergie mécanique et la chaleur résiduelle récupérée par le fluide thermique.



Comparaison des rendements énergétiques de la combustion avec ou sans cogénération
(P.GIRARD 1995)

La technologie la plus utilisée pour la production combinée de chaleur et d'électricité à partir de la biomasse est la combustion des sous-produits et résidus dans une chaudière. Cette production combinée de chaleur et d'électricité permet une efficacité énergétique plus grande que les centrales électriques classiques grâce à la valorisation de la chaleur. Avec un rendement électrique maximal de l'ordre de 40%, 60% de l'énergie est disponible sous forme de chaleur. Dans le cas général, cette chaleur est dissipée dans l'atmosphère, donc perdue. La technique de cogénération consiste en la récupération de cette chaleur perdue, en vue d'une valorisation pour des usages thermiques. L'efficacité globale de la conversion de l'énergie primaire est donc accrue avec des rendements énergétiques compris entre 75 et 95% selon les filières (Lemoult, 1993).

Intérêt de la cogénération

Les pays en développement d'une manière générale ont une économie fortement dépendante de leur agriculture, des agro-industries et des industries du bois. Ces industries sont génératrices de volumes très importants de déchets mal valorisés voire le plus souvent détruits en pure perte (figure 1).

Les besoins énergétiques et notamment électriques de ces industries sont souvent satisfaits en ayant recours aux énergies conventionnelles (groupe diesel) alors que l'utilisation rationnelle de ces déchets à des fins énergétiques par l'intermédiaire de technologies performantes (combustion, cogénération) devrait leur permettre une indépendance énergétique compétitive et de qualité.

L'intérêt de la cogénération à partir de la biomasse

L'intérêt de la cogénération repose sur plusieurs éléments qui sont largement reconnus. Les principaux avantages sont rappelés ci-après :

Avantages au niveau industriel

- Réduction des coûts énergétiques suite à l'amélioration des rendements énergétiques de la conversion du fait de l'utilisation pour les besoins process de la chaleur récupérée après production d'électricité, mais aussi réduction de la facture énergétique d 'entreprise en cas de substitution de groupe diesel par une centrale fonctionnant sur les déchets,
- Amélioration de la fiabilité de la fourniture énergétique des industries utilisant la cogénération en limitant ou en éliminant le recours au réseau, souvent défaillant dans les pays tropicaux,

Avantages au niveau national

- Augmentation de la capacité de production décentralisée d'électricité notamment en milieu rural où sont implantées les agro-industries si toutes les opportunités de cogénération économiques étaient mises en œuvre dans les pays concernés,
- Réduire les insuffisances de réseaux par une limitation de la demande industrielle ou commerciale, voire par un renforcement des réseaux en bout de ligne en cas de revente des surplus,
- Permettre une économie d'énergie primaire, limiter la dépendance énergétique des pays et donc réduire le coût de la facture énergétique,
- Soulager l'économie en réduisant les besoins d'investissements par la construction de nouvelles centrales électriques, ce qui a pour conséquence de réduire le recours aux emprunts internationaux,
- Améliorer l'efficacité du service public si la mise en œuvre d'unités de cogénération dans l'industriel permet une meilleure dispersion des capacités de génération, près de sites de consommation en réduisant les coûts liés à la distribution et aux pertes en ligne,
- Offrir une plus grande flexibilité pour répondre aux évolutions de la demande du fait de la plus grande facilité et rapidité de mise en œuvre, comparée aux investissements à réaliser pour les grandes centrales électriques,

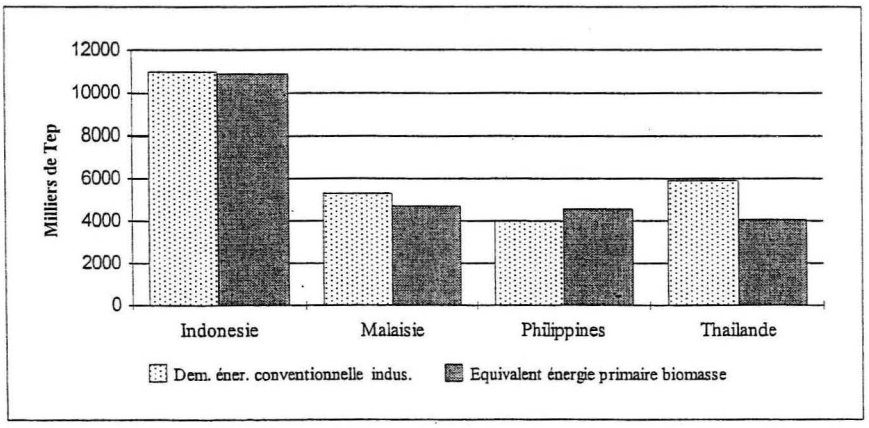


Figure 1 : Demande énergétique du secteur industriel des principaux pays de l'ASEAN vis à vis du potentiel énergétique contenu dans les déchets des principales agro-industries (P.Girard et al, 1992)

- Répondre favorablement aux préoccupations environnementales du fait d'une meilleure efficacité énergétique mais aussi en terme de substitution en cas d'utilisation de la biomasse.

Quelles sont les possibilités d'utilisation de la cogénération et quelles technologies

La production de chaleur est la principale forme actuelle de valorisation énergétique de la biomasse. Le terme générique chaudière est utilisé pour désigner un générateur de chaleur (figure 2). C'est pour simplifier un échangeur conçu pour changer l'eau en vapeur en utilisant une source de chaleur. La production de chaleur est recherchée pour des processus industriels (cuisson, séchage,...) et la production d'énergie mécanique puis d'électricité. Outre la vapeur qui est le plus communément recherchée, d'autres fluides peuvent être utilisés, (eau chaude, eau surchauffée, huiles thermiques) avec pour fonction le stockage, le transport ou le transfert d'énergie.

Les rendements instantanés des chaudières à biomasse sont généralement compris entre 70 et 85%. La production conventionnelle qui sépare la génération d'électricité avec des groupes électrogènes de la production de chaleur avec des chaudières traditionnelles est anti-économique. En effet environ 75% de l'énergie thermique introduite est perdue. Etudier la possibilité de mettre en place une production combinée de plusieurs types d'énergie apparaît alors nécessaire. Les besoins en énergie thermique et électrique pour les différents secteurs d'activités sont très variables dans le temps. Il faudra nécessairement rechercher le dimensionnement optimum du groupe de cogénération (chaudière + turbine), des puissances électriques et thermiques d'appoint, des volumes tampon de stockage d'énergie thermiques, etc...

La cogénération à partir de la biomasse représente une des voies les plus prometteuses pour la production de chaleur et d'électricité en sites ou sur le réseau. Le récent intérêt de la cogénération pour les pays en développement est motivé par un choix économique, car l'utilisation de cette technique permet de réduire considérablement les coûts de l'électricité pour le consommateur. Ainsi si toutes les opportunités d'utilisation de la biomasse comme source d'énergie primaire sont exploitées par un pays, une large part de la production d'électricité peut être décentralisée réduisant les lourds investissements dans le réseau national. Aujourd'hui les difficultés financières, techniques et institutionnelles freinent l'expansion du réseau ; la cogénération apparaît donc comme une opportunité attractive si les solutions des secteurs électriques en Afrique prennent bien en compte le potentiel existant dans les agro-industries.

Les fabricants de chaudières et de turbines ont cherché à promouvoir la cogénération dans les sites et secteurs les plus adaptés. Dans les pays développés, la source d'énergie primaire sera le plus souvent le gaz. Dans les pays en développement, les déchets agro-industriels, forestiers ou de l'industrie du bois constituent la principale source d'énergie. Par exemple, les déchets de sucrerie et d'huilerie de palme sont intégralement utilisés dans les complexes industriels pour la satisfaction des besoins thermiques et électriques. Cette utilisation concerne également une partie des déchets de bois destinés à la génération d'électricité et de vapeur dans l'industrie du contre-plaqué. On peut résumer les besoins énergétiques pour une agro-industrie de la façon suivante :

- des besoins en vapeur basse pression pour le processus de transformation
- des besoins électriques pour le fonctionnement des machines

Les tableaux 1 et 2 rendent compte de la situation énergétique de certaines activités du secteur industriel des pays de l'Asean (Girard, 1995).

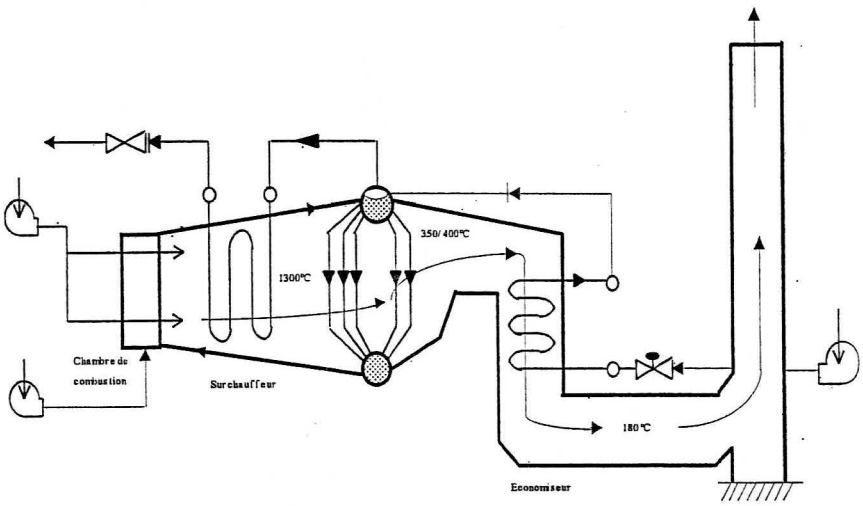


Figure 2 : Schéma de principe d'une chaudière à biomasse (P.GIRARD - 1994)

Tableau 1 : Chiffres caractéristiques de la situation énergétique des agro-industries retenues. (P.GIRARD - 1995)

Type d'industrie	Sucrerie	Rizerie
Nombre d'unités	152	107 000
Nombre d'unités avec installation de cogénération	152	2300/13
Type de système utilisé en cogénération	chaudière turbine à contre-pression	chaudière moteur à vapeur /chaudière turbine à condensation
Type de combustible utilisé	bagasse/bois	balles de riz
Pression caractéristique de chaudière	10-25 bars	8-20 bars
Ratio chaleur/électricité	11	-
Rendement énergétique caractéristique des installations	50% maxi	6 à 20 %
Consommation énergétique spécifique par unité entrant :		
- situation actuelle	660 kg vapeur + 21 Kwh	25-60 Kwh
- avec des mesures d'économie d'énergie	400 kg vapeur + 30 Kwh	50Kwh
Capacité de génération existante (connue)	754	40
Capacité de génération opérationnelle	500	30
Durée de fonctionnement des unités	2500 - 5000 h	4000 - 6000 h
Capacité de génération en secours		
- pendant la période de fonctionnement	254	-
- hors période de production	754	30

Tableau 2 : Chiffres caractéristiques de la situation énergétique des agro-industries retenues. (P.GIRARD - 1995)

Type d'industrie	Huile de palme	Contre-plaqué
Nombre d'unités	376	237
Nombre d'unités avec installation de cogénération	± 350	±40
Type de système utilisé en cogénération	chaudière turbine à contre-pression	chaudière turbine à contre-pression
Type de combustible utilisé	fibres + coques	déchets de bois
Pression caractéristique de chaudière	20 bars	15-20 bars
Ratio chaleur/électricité	8-12	8-10 bars
Rendement énergétique caractéristique des installations	30%	60 %
Consommation énergétique spécifique par unité entrant :		
- situation actuelle	660 kg vapeur 3 bars+ 15-20 Kwh	2 t vapeur + 250 Kwh
- avec des mesures d'économie d'énergie	500 kg vapeur 3 bars + 15 Kwh	1,5 t vapeur + 160 Kwh
Capacité de génération existante (connue)		
Capacité de génération opérationnelle		
Durée de fonctionnement des unités		
Capacité de génération en secours :	-	-
- pendant la période de fonctionnement	-	-
- hors période de production	4000 - 5000 h	8000 h

A l'opposé des avantages présentés plus haut, il convient de signaler que le principe de la cogénération ne peut pas s'appliquer à toutes les industries. Plusieurs facteurs sont à évaluer avec précision avant de s'engager dans un investissement de ce type. Les principaux aspects qui doivent faire l'objet d'une attention particulière afin d'analyser la faisabilité de la cogénération sont les suivants :

- Nature et importance des besoins thermiques vis à vis de la disponibilité en chaleur du procédé du cogénérateur,
- Nature du ratio besoin thermique/besoin électrique
- Disponibilité en sous produits et déchets utilisables à des fins énergétiques
- Disponibilité en place pour la construction d'une installation de cogénération

La solution technique la plus usitée est constituée d'un générateur de vapeur, la chaudière, conçue pour maximiser la production de vapeur surchauffée haute pression (typiquement entre 30 et 60 bars, mais les nouvelles générations de chaudière biomasse vont jusqu'à 100 bars (et au delà) couplée soit à une turbine à contre pression, soit à une turbine à condensation avec sous tirage qui fournit l'énergie mécanique.

Pour ce qui concerne la production d'électricité elle se fait par l'intermédiaire d'une turbine à vapeur couplée à un générateur (figure 3). De nombreuses solutions sont envisageables et les niveaux de rendements escomptables sont résumés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Résumé des solutions envisageables et rendements escomptables (P.GIRARD - 1995)

Type	Puissance MWe	Plage de rendement électrique
Contre-pression		
Monoétage	0,1 - 1	0,4 - 0,5
Multiétage	1 - 5	0,65 - 0,75
Multiétage	1 - 25	0,75 - 0,80
Condensation		
Multiétage	3 -20	0,70 - 0,76
Multiétage	20 - 50	0,76 - 0,80

Elle peut également être envisagée via des moteurs à vapeur. Ces derniers de conception plus robustes (pas de machine tournante), plus facile de maintenance présentent de gros avantages en milieu tropical où le service après vente est souvent déficient. Quelques constructeurs continuent de proposer du matériel dans ce sens en Europe, au Brésil et en Thaïlande notamment (figure 4).

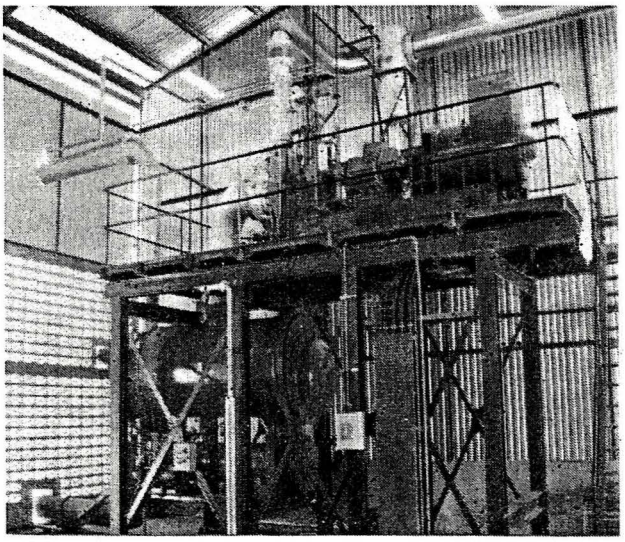


Figure 3 : Turbine à vapeur Nadrowski

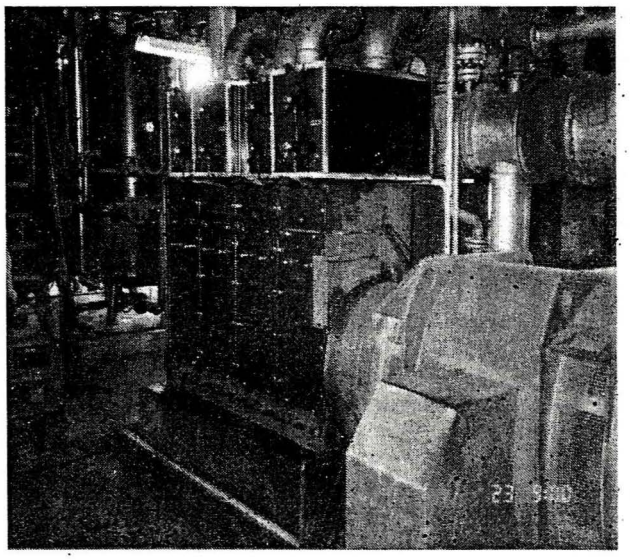


Figure 4 : Moteur à vapeur Spilling

CIRAD-Dist
UNITÉ BIBLIOTHÈQUE
Baillarguet

Ce système constitue le schéma le plus flexible en terme de conception dans la mesure où toutes les configurations de pression d'entrée et de pression de sortie peuvent être envisagées (aux limites économiques et technologiques près). Cette solution présente l'avantage également d'une grande flexibilité vis à vis du combustible. Ainsi des chaudières performantes sont aujourd'hui disponibles industriellement permettant l'utilisation d'une grande variété de combustibles. De très nombreux constructeurs de pays du Nord du Sud proposent une large gamme de matériel.

Aspect économique et financier de la cogénération

La cogénération à partir de la biomasse présente de nombreux avantages économiques dont le premier et le plus important est consécutif à la diminution de la facture d'électricité voire du chiffre d'affaire réalisé en cas de revente de la totalité ou de l'excédent d'électricité généré sur le réseau. L'autonomie énergétique peut constituer un gain considérable pour certaines entreprises contraintes à des arrêts fréquents et intempestifs résultant des carences du réseau national.
La possibilité aujourd'hui démontrée d'utiliser de manière industrielle des déchets agro-industriels ou forestiers pour la cogénération constitue un gain considérable en substituant de manière efficace les solutions d'autoproduction par l'intermédiaire de groupe diesel par des options vapeur. Des temps de retour sur investissement sur le seul poste carburant de 2 à 4 ans selon les situations ne sont pas rares dans les industries du bois par exemple.

Les facteurs qui déterminent la faisabilité économique et financière d'un investissement de cogénération pour une entreprise sont le prix de l'électricité réseau et de carburants conventionnels (diesel), les coûts d'investissement (généralement élevés pour les solutions biomasse) et les caractéristiques techniques de la demande en terme de demande électrique et thermique.

Malgré un avantage économique certain de la cogénération, force est de constater que les critères de discussion d'investissement en milieu tropical ne sont souvent pas prioritaires.

La gazéification une alternative crédible à la combustion

La gazéification est apparue en 1798 en France et en Angleterre et a connu un développement technologique important en Europe dès 1850 notamment pour la production de gaz de ville à partir du charbon. A l'inverse de la combustion qui convertit totalement l'énergie du solide en chaleur en produisant du CO_2 et H_2O, la gazéification est une oxydation partielle permettant une conversion de l'énergie contenue dans le solide en énergie d'un gaz combustible à forte proportion de CO et H_2, voire CH_4. Cette conversion présente deux avantages par rapport à une oxydation totale du solide :

- la combustion d'un gaz est plus facile. Elle nécessite un plus faible excès d'air (pour une bonne combustion), permet une simplification et une réduction de la taille des installations, minimise les émissions polluantes (pas de particules) et les encrassements des échangeurs,
- un gaz peut être utilisé dans des moteurs ou des turbines pour la production de force motrice puis d'électricité avec de meilleurs rendements de conversion que la turbine vapeur classique (Tableau 4), ou dans la synthèse de produits chimiques (ammoniac, méthanol).

Plusieurs oxydants peuvent être utilisés pour assurer cette transformation thermochimique du solide en gaz. Le plus commun étant l'oxygène de l'air, mais la présence importante d'azote conduit à la production d'un gaz pauvre (3.5 à 7 MJ/Nm^3) comparé à un combustible gazeux classique tel que le gaz naturel (36 MJ/Nm^3). Ainsi, d'autres oxydants tels que l'eau, l'oxygène pur ou le CO_2 peuvent être employés pour la gazéification. Il en résulte la production d'un combustible à moyen ou haut pouvoir calorifique (respectivement 9-15 MJ/Nm^3 et 20-30 MJ/Nm^3) en fonction de l'agent oxydant et du procédé retenu. Le Tableau 4 présente la composition moyenne des gaz en fonction de leur pouvoir calorifique.

Délaissé depuis quelques décennies pour des combustibles fossiles beaucoup moins chers, la gazéification retrouve de nos jours un regain d'intérêt en tant que procédé de valorisation de la biomasse comme source d'énergie durable et renouvelable. Les enjeux d'ordre international sont directement liés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et aux accords de Kyoto qui en découlent.

Les technologies développées à ce jour ont principalement été axées sur :

- l'adaptation des technologies existantes de gazéification de charbon au nouveau combustible solide qu'est la biomasse,
- le développement de nouvelles technologies.

Si l'on admet que la pyrolyse de la biomasse, première étape de la gazéification, donne du gaz, du charbon et des goudrons, tout l'art de la gazéification réside dans l'orientation de la réaction vers la minimalisation de la production des goudrons et la maximalisation de la production de gaz. Le recensement des équipements de gazéification avec leur niveau de développement fait apparaître deux grandes techniques que sont les lits fixes et les lits fluidisés. La figure 5 présente les différentes étapes de la gazéification dans le cas d'un gazogène à tirage directe.

Tableau 4 : Comparaison des rendements de conversion pour la production d'électricité à partir de la gazéification de biomasse.

Procédé	Rendement électrique (%)
Gazogène / Chaudière / Turbine à vapeur	15 – 20 %
Gazogène / Moteur à combustion interne	15 – 25 %
Gazogène / Turbine à gaz	25 – 35 %

Tableau 5 : Composition moyenne de gaz sec [d'après 1]

(% volumique)	H2	CO	CO2	CH4	CnHn	N2	pouvoir calorifique (MJ/Nm^3)
gaz pauvre	20	24	13	3	1	40	3.5 - 7
gaz à moyen pouvoir calorifique	26	51	6	13	3	-	9 - 15
gaz à haut pouvoir calorifique	-	-	1	81	4	14	20 - 30

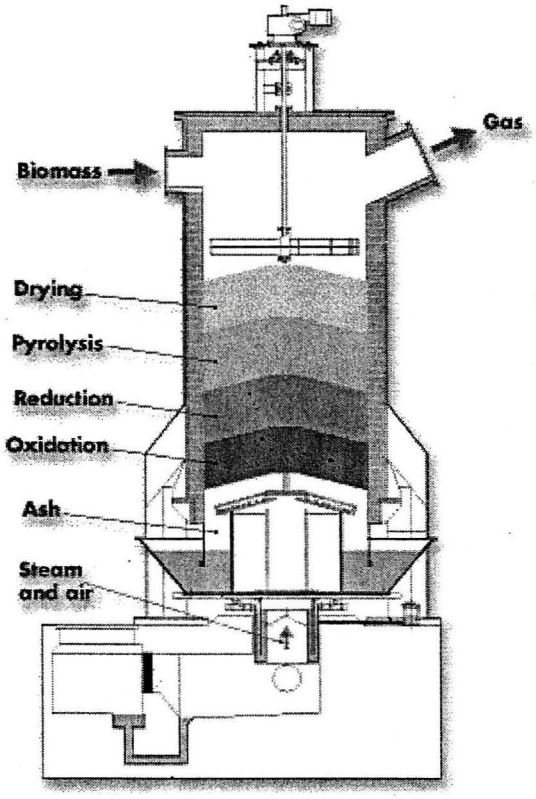


Figure 5 : Les différentes étapes de la gazéification dans un gazogène à lit fixe [d'après 2]

Les procédés à lit fixe

Ce sont les procédés longtemps employés pour la gazéification du charbon. En fonction du sens d'écoulement de l'air par rapport à la biomasse on distingue trois différents types de gazogènes : à tirage direct, inversé ou croisé.

Les gazogènes à tirage inversé se caractérisent par le fait que la biomasse et l'air s'écoulent dans le même sens. Il en résulte une température de gazéification élevée de l'ordre de 900-1000°C avec le passage des gaz de pyrolyse vers la zone chaude. Cette conception assure donc un craquage plus ou moins important des produits gazeux lourds et au final des teneurs de goudrons relativement faibles. Cette conception conduit à la production de gaz relativement propres mais avec des pouvoirs calorifiques faibles et des teneurs en particules importantes.

De la même façon, les gazogènes à tirage croisé se caractérisent par une introduction de l'air et une sortie des gaz sur les cotés du gazogène par

rapport au sens d'écoulement de la biomasse. La température de sortie des gaz est légèrement plus faible (800-900°C) et la qualité des gaz s'en trouve affectée.

De part leur conception, ces deux types de gazogènes permettent d'obtenir des gaz relativement propres vis a vis des teneurs en goudron et une production simultanée de chaleur et d'électricité via un moteur à combustion interne peut être envisagée. Cependant, leur faible pouvoir calorifique lié à des problèmes de limitation de taille de part la conception des foyers ne permettent que difficilement d'obtenir des capacités supérieures à 300 kWe.

Les gazogènes à tirage direct constituent la troisième voie de développement pour les gazogènes à lit fixe. L'air et la biomasse sont introduits à contre courant et la température de gazéification est voisine de 1000°C. Cette configuration conduit au refroidissement des gaz combustibles au travers de la zone de séchage/pyrolyse de la biomasse. La température des gaz en sortie est comprise entre 200 et 300°C. Le principal avantage de ce système est l'absence de limite de taille. Un inconvénient majeur des lits à tirage direct est la forte teneur en goudrons due à une étape de craquage restreinte (40 g/Nm^3). Il en résulte une application obligatoirement axée vers la production de chaleur via une combustion classique. De plus, une contrainte concerne l'emplacement de l'installation qui doit être proche de la chambre de combustion pour éviter tout problème de condensation des goudrons dans les tuyauteries. Une unité de démonstration d'une capacité de 4-6 MWth a été réalisée par Volund au Danemark avec du bois et de la paille comme matière première, et plusieurs autres installations sont en activité en Finlande pour le chauffage urbain.

De façon générale, les procédés à lit fixe présentent l'avantage d'une conception simple mais l'inconvénient de produire des gaz à faible pouvoir calorifique et des teneurs en goudrons élevées (jusqu'à 40 g/Nm^3), ce qui limite leur utilisation avec des turbines à gaz pour la production d'électricité. De plus, la quantité importante d'azote (40 à 50% en volume) conduit à augmenter les coûts de traitement des gaz. D'autre part, afin d'obtenir un pouvoir calorifique élevé, l'humidité de la matière première ne doit pas excéder 15-20% et un pré-séchage est en général nécessaire. Afin de réduire la présence de goudrons issus de l'étape de pyrolyse, certains procédés utilisaient du charbon de bois comme matière première mais les rendements énergétiques obtenus alors sont par nature réduits de moitié avec des coûts de production inchangés.

Les niveaux de maturité industrielle sont assez variables. Les besoins de maintenance conjugués à la nécessité de disposer d'une matière première assez bien calibrée et sèche ont limité le nombre d'application au niveau international notamment dans le contexte de pétrole peu cher. Le renchérissement des coûts du pétrole devrait permettre à certaines technologies d'émerger et de satisfaire notamment une partie de la demande pour l'électrification rurale. Des études très poussées devront cependant être réalisées pour évaluer la pertinence de cette filière vis à vis de solutions plus conventionnelles de type vapeur. Sa relative complexité nécessite une mise en œuvre dans un cadre garantissant une maintenance adaptée.

Les procédés à lit fluidisé

Le principal avantage des lits fluidisés comparés aux lits fixes est d'avoir une température uniforme de gazéification et d'assurer ainsi des teneurs en goudrons faibles inférieures à 1-3 g/Nm^3. D'autre part, le principe de fonctionnement des lits fluidisés permettent une variation du débit de la matière première et de son humidité (jusqu'à 60%) sans affecter la composition et la qualité des gaz produits. Il est de plus aisé de les dimensionner pour des puissances importantes. Deux différents types de lit fluidisés sont actuellement disponibles : les lits circulants et les lits denses (bubbling bed). Pour des puissances moyennes de quelques MW, le schéma technologique dominant des projets actuellement, est la gazéification en lit fluidisé en cycle intégré : gazogène – turbine à gaz – récupérateur – turbine à vapeur...Les entreprises leaders dans ce domaine sont finlandaises (Ahlstrom maintenant repris par Foster Wheeler et Tampella / Enviropower repris par Carbona) ou suédoises (Tps). Les deux premières ont réalisé des pilotes (~10 t/h) qui ont permis de mener des campagnes d'essais de longue durée sur différents combustibles : bois, tourbe, lignite, charbon...et Ahlstrom a conduit la première unité de démonstration à Varnamo en Suède pour la Compagnie d'Electricité Sydkraft. La taille de l'installation est limitée (6 MWe) et celle-ci conserve un caractère expérimental. Cette unité est actuellement la seule au monde à fonctionner sur ce principe. Plusieurs années après sa construction, elle vient de produire récemment, les premiers kW électriques après couplage du gazogène à la turbine à gaz. Bien que quelques centaines d'heures de fonctionnement aient été cumulées, une longue période de tests est maintenant nécessaire avant d'atteindre un fonctionnement "industriel". D'ores et déjà, quelques verrous technologiques ont été identifiés :

- la préparation / manutention / gestion de la matière première difficile,
- fiabilité des systèmes de filtration des gaz mal établie,
- corrosion ou dépôt sur les moteurs / turbine mal maîtrisé.

Les procédés sous pression

La gazéification de la biomasse peut être réalisée sous pression. Quelques unités de démonstrations ont été construites et mises en fonctionnement en Finlande et en Suède mais le retour d'expérience est encore faible. Les intérêts de cette technologie apparaissent lorsque le gaz produit doit être

comprimé pour la production d'électricité (turbine à gaz) ou pour la synthèse de produits chimiques (méthane, méthanol,...). Cependant, un des principaux problèmes techniques rencontrés réside dans les systèmes d'alimentation. Quelques solutions ont été développées puis validées mais le coût engendré reste encore élevé.

Les voies de développement

Il semble aujourd'hui clair que les procédés de gazéification de biomasse développés ces dernières années représentent une voie intéressante de développement de nouvelles sources d'énergie. L'enjeu majeur est le recours à une source énergie souple d'utilisation et renouvelable, respectueuse des exigences environnementales. Cependant, deux verrous technologiques majeurs doivent encore être levés :

- le faible pouvoir calorifique du gaz produit comparé aux combustibles gazeux fossiles,
- l'épuration efficace des gaz en terme de concentration en particules et en goudrons, mais aussi en alcalins et composés halogénés ou soufrés.

Pour répondre à cela, des activités de recherche et développement doivent être en conséquence menées à la fois sur les procédés de gazéification et sur les dispositifs de traitements. Plusieurs voies de recherche sont en cours. On peut citer :

- les travaux sur la gazéification étagée. Ce procédé consiste à séparer, individualiser les différentes réactions présentes au cours de la gazéification de la biomasse en vue d'optimiser la production d'un gaz à moyen/haut pouvoir calorifique avec des teneurs en goudrons faibles. Un projet européen coordonné par le CIRAD est en cours sur ce thème et devrait déboucher sur la construction d'un pilote de 150 kW.
- Les travaux sur le traitement des gaz. De nombreux développements sont en cours dans ce domaine. Pour les particules, les principales voies de réalisation concernent les filtres à particules haute température (>500°C) pour éviter la condensation des goudrons. Les technologies les plus étudiées sont basées sur les principes du cyclone et du filtre céramique à bougie. Une efficacité supérieure à 99.8% peut être obtenue. En ce qui concerne les goudrons, deux voies respectivement basées sur le craquage thermique à haute température (900-1100°C) et sur le lavage à basse température, sont en développement. Le craquage thermique peut être réalisé avec ou sans catalyseur (dolomite, olivine ou nickel) afin de diminuer la température de traitement (800-900°C). Le lavage à froid est assuré soit par un filtre électrostatique, soit par un échangeur à contact direct gaz-liquide. Dans les deux cas, les gaz sont refroidis à des températures de l'ordre de 60-80°C. Cette voie d'épuration présente donc l'inconvénient de générer un effluent liquide en plus des pertes d'énergie. Enfin, soulignons que le CIRAD en collaboration avec des partenaires danois (TKE et dK-Teknik) travaille sur un nouveau procédé d'épuration à sec dans le cadre d'un projet Européen.
- les travaux sur la gazéification à la vapeur. Il s'agit de supprimer la part d'azote contenue dans le gaz de gazéification en vue d'augmenter le pouvoir calorifique de celui-ci. L'avantage dans ce cas devrait être double puisqu'on augmente le rendement énergétique du procédé tout en diminuant le volume des gaz à traiter. Dans ces conditions, les coûts de production, qui sont directement liés aux flux de gaz produit, devraient être réduits. Quelques installations pilotes sont en cours de développement.

Les aspects économiques

Des études technico économiques sur la gazéification de la biomasse font ressortir que les coûts d'investissement et de la matière première constituent les principales dépenses lors de la production d'électricité en Europe (Tableau 6). Elles correspondent respectivement à 2/3 et 1/3 du coût total de la production d'électricité. Cette situation conduit à favoriser les filières à rendement énergétique élevé (cogénération à lit fluidisé avec ou sans cycle combiné) avec des puissances minimales de l'ordre de 30 MWe. Dans ces conditions, seuls les pays nordiques sont aptes à répondre aux exigences dues à de telles installations (quantité importante et concentrée de biomasse pour l'approvisionnement, besoins de chaleur important favorable à la cogénération).

Tableau 6 : Coûts de production d'électricité à partir de la gazéification de biomasse en Europe [3]

	GICC atmosphérique				GICC pressurisé			
	sans cogénération		avec cogénération		sans cogénération		avec cogénération	
	Ecu/MWh	%	Ecu/MWh	%	Ecu/MWh	%	Ecu/MWh	%
Coût matière première	23.4	32.1	25.2	30.8	19.8	27.8	22.5	28.4
Main d'œuvre	2.7	3.7	2.7	3.3	3.6	5.1	2.7	3.4
Coût d'investissement	46.8	64.2	54.0	65.9	47.7	67.1	54.0	68.2
Coût total de production	72.9		81.9		71.1		79.2	
Gain pour chaleur			18.0				19.8	
Coût de production d'électricité	72.9		63.9		71.1		59.4	

Cependant, dans le contexte des pays en zone tropicale humide, la situation est significativement différente. Le faible coût de la matière première lié à une quantité disponible importante ou à des productivités des plantations élevées par rapport à l'Europe pourrait permettre le développement d'installations de gazéification économiquement viable en forte et faible puissance. Ainsi, les productivités de l'ordre de 20 t MS/ha/an en plantations industrielles (dont la faisabilité est démontrée), comparées aux 5 t MS/ha/an en Europe permettraient de réduire considérablement (au moins par un facteur 4) les surfaces nécessaires à l'approvisionnement de centrales dendroénergétique. A titre d'exemple, pour une installation de cogénération de 30 MWe + 30 MWth, la surface nécessaire à l'approvisionnement en biomasse serait de l'ordre de 2500 ha en zone tropicale (10000 ha en Europe). A partir de cette base, et en considérant que toute chose restant égale par ailleurs, l'économie générée par la simple disponibilité accrue de la matière première serait au minimum de l'ordre de 15 à 20 % pour les pays en zone tropicale humide. Dans ces conditions, les schémas gazogènes/turbines à gaz pour la seule production d'électricité et gazogènes/moteurs à combustion pour la production chaleur/électricité pourraient être envisagées respectivement en système réseau (10 à 30 MWe) ou pour l'électrification rurale (50 à 300 kWe). Les progrès technologiques réalisés ces dernières années devraient permettre d'envisager quelques opérations de démonstration en milieu tropical. Cependant, ces solutions (lit fixe ou fluidisé) nécessitent un environnement technologique qui devrait limiter leur mise en œuvre aux pays les plus avancés dans un premier temps.

REFERENCES

[1] Les Mécanismes fondamentaux de la gazéification. Deglise X et Magne P., Biomasse Actualités, N°5, pp 4-8, 1984.

[2] Wood chip gasifier supplies heat to small community, CADDET IEA/OECD renewable energy, Technical Brochure N°116, mars 2000

[3] Biomass conversion technologies : achievements and prospects for heat and power generation, European Commission, EUR 18029 EN, pp 74-115, 1998

BIBLIOGRAPHIE

P.GIRARD - 1995, Utilisation énergétique par voies thermochimiques des déchets lignocellulosiques - Outils méthodologiques d'aide à la décision - Cas des pays d'Asie du Sud-Est - Thèse de doctorat - Université de technologie de Compiègne - Compiègne - France.

Ph.GIRARD et al. - 1998, Achievement and prospects for heat and power generation - Biomass conversion technologies - European Commission EUR 18029 EN.

J.SIRCHIS - 1990, "Combined production of heat & power" Elsevier applied science - London & New York.

LEMOULT. - 1993, "Développement d'outil d'aide au dimensionnement d'installation de cogénération". Laboratoire d'Énergétique du groupement ARTEMIS, École des Mines de Nantes. France