

Organisation d'un séminaire de promotion des technologies de
valorisation énergétique
des sous-produits de la filière et des industries du bois
au Brésil et en Guyane française.

Rapport final



François PINTA - CIRAD – BP 701 – 97 387 KOUROU Cedex

Avec le soutien du FOND DE COOPERATION REGIONALE (FCR) GUYANE , PROGRAMME REGIONAL DE MAITRISE DE L'ENERGIE (PRME), CENTRE DE COOPERATION INTERNATIONAL EN RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT, du PROJET EUROPEEN « BEPINET », Et de L'IBAMA (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIANTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVAVEIS- BRASIL).



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

F.C.R -Préfecture de Région Guyane



Projet BEPINET

PROGRAMME RÉGIONAL POUR LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE



PARTENAIRES POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE DE LA GUYANE

CIRAD-Dist
UNITÉ BIBLIOTHÈQUE
Baillarguet



000094980

SOMMAIRE

I – INTRODUCTION	2
II – ORGANISATION ET DEROULEMENT DU STUDY TOUR	2
2.1) Organisation du voyage d'étude.....	2
2.2) Programme réalisé au cours de la mission préparatoire.....	3
2.3) Organisation des inscriptions et des voyages internationaux – Liste des participants.....	4
2.4) Programme réalisé au cours du study tour	5
2.5) Les participants au study tour	7
III – ORGANISATION ET DEROULEMENT DU SEMINAIRE	8
3.1) Organisation du séminaire.....	8
3.2) Les participants au séminaire	8
3.3) Compte rendu du déroulement du séminaire.....	9
IV – ENQUETE DE SATISFACTION.....	10
V – SYNTHESE ET PERSPECTIVES.....	11
ANNEXES	13
Annexe 1 : Programme réalisé lors de la mission préparatoire au study tour	14
Annexe 2 : Liste et coordonnées des participants au study tour (1p).....	15
Annexe 3 : Plaquette de présentation du programme réalisé du 26 au 30 juin 2006 (4 p.).....	17
Annexe 4 : Programme réalisé lors du séminaire à Cayenne le 03 07 2006	22
Annexe 5 : Feuille de présence des participants au séminaire à Cayenne (2p).....	23
Annexe 6 : Fiches des technologies de valorisation énergétique du bois (8p).....	26

I – INTRODUCTION

Le projet a permis l'organisation d'un séminaire de promotion des technologies de valorisation énergétique du bois en coopération régionale impliquant le Brésil et la Guyane. Le projet s'est déroulé en deux parties : un voyage d'étude et de visites techniques d'installations au Brésil a été organisé du 26 au 30 juin 2006, et un séminaire de débriefing en Guyane s'est tenu le 03 juillet 2006 à Cayenne.

Ce rapport présente successivement l'organisation et le déroulement du voyage d'étude et du séminaire, puis une synthèse des faits marquants et des perspectives mis en exergue au cours de l'opération.

II – ORGANISATION ET DEROULEMENT DU STUDY TOUR

2.1) Organisation du voyage d'étude

Le voyage d'étude au Brésil a été co-organisé par le Cirad et l'Ibama (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais renovaveis) avec l'appui de la société FOREST RESSOURCE MANAGEMENT à l'intention de participants guyanais, brésiliens et africains. Son objectif était un partage d'expériences Sud-Sud dans des contextes tropicaux ayant des problématiques semblables : comment valoriser au mieux les déchets et sous produits bois et écorces générés par la filière forestière.

Concrètement, les visites techniques ont porté sur des installations innovantes ou exemplaires dans des entreprises du secteur industriel de la transformation du bois en Amazonie brésilienne. Le study tour s'est déroulé dans la région de Bélem et de Manaus où fonctionnent depuis plusieurs années différentes technologies de production d'énergie à partir du bois : production de chaleur pour le process industriel, production d'électricité, cogénération électricité et chaleur.

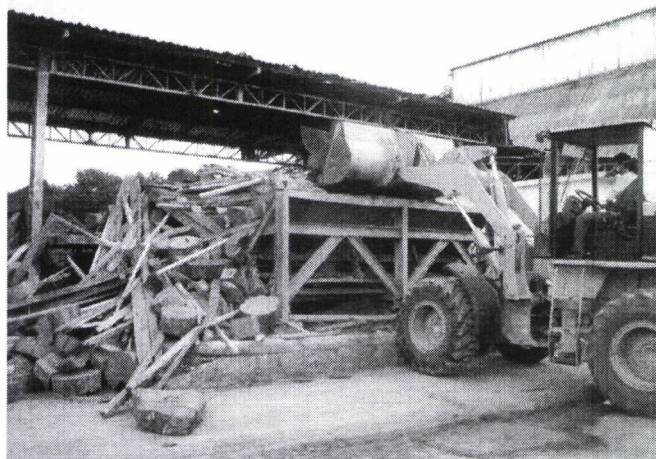
Le programme réalisé est conforme à ce qui était prévu. Il est présenté ci dessous. Il a été organisé lors de la mission de préparation des visites effectuée par des agents du CIRAD et de l'IBAMA au début du mois de juin. Le programme a permis de montrer aux participants les atouts et contraintes des technologies existantes dans le domaine du bois énergie.

2.2) Programme réalisé au cours de la mission préparatoire

La mission préparatoire a été facilitée par la contribution efficace de partenaires Brésiliens : l'IBAMA, l'UFPA (université fédérale du Para), la société énergétique Koblitz, le SEBRAE (institut d'appui aux petites entreprises de la filière bois).

Le programme réalisé lors de cette mission préparatoire est indiqué ci-après. Il a permis à la fois de rencontrer directement les responsables d'entreprises à visiter et d'organiser toute la logistique : réservation des bus, avions et hôtels... L'ordre des visites du programme du study tour a été inversé : les visites des entreprises dans la région de Manaus ont été placées en début de parcours tandis que celles à Belem ont été programmées à la fin du study tour. Cela a notamment permis d'optimiser les déplacements en avion sans aucun préjudice au contenu du voyage d'étude : les visites prévues ont été réalisées.

Le programme réalisé lors de la mission préparatoire par Waldir QUIRINO (IBAMA – à Brasilia), Patrick ROUSSET (Cirad / Ibama basé à Brasilia) et François PINTA (Cirad, basé à Kourou) est présenté en annexe 1.



Légende photo : déchets de bois alimentant le broyeur d'une centrale électrique dans la région de Manaus au Brésil.

2.3) Organisation des inscriptions et des voyages internationaux – Liste des participants au study tour

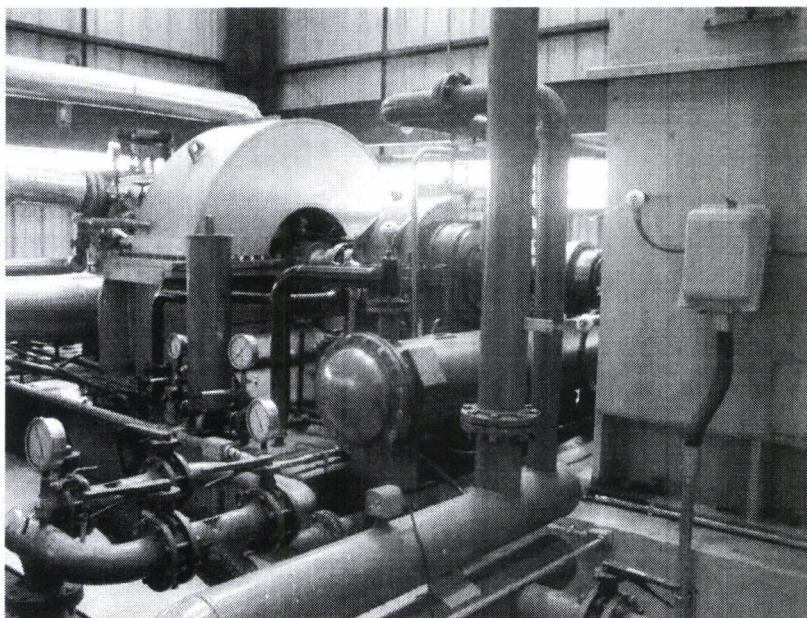
De nombreux partenaires techniques en Guyane et au Brésil étaient associés à la réalisation de ce projet.

Pour la partie Guyane, l'équipe d'organisation avait invité des responsables des collectivités locales ayant en charge une compétence économique et énergétique au Conseil Régional ainsi que leurs services techniques, des professionnels de la filière bois et travaux forestiers, des experts du secteur public ou du privé, chercheurs et techniciens dans le domaine des énergies renouvelables.

Des participants industriels et des bureaux d'études travaillant dans le bassin du Congo (Forêt d'Afrique centrale) étaient associés à l'opération dans le cadre du cofinancement du projet européen BEPINET. Cette partie de l'organisation a été réalisée par le Cirad et son partenaire privé (la société d'aménagement forestier FRM) à Montpellier.

Tous les billets d'avions des participants venant de Guyane, du Brésil, du Gabon, de Centrafrique de France et du Congo ont été achetés afin de permettre une arrivée à Manaus au plus tard le dimanche 25 juin afin de démarrer le voyage d'étude le 26. Les disponibilités dans les avions, les correspondances et la fréquence des vols ont contraint à des départs le vendredi 23 juin comme ce fut le cas pour les Guyanais.

La liste, les fonctions occupées et les coordonnées des participants au study tour sont présentés en annexe 2.



Légende photo : turbine à vapeur – Sté Precious Wood

2.4) Programme réalisé au cours du study tour

La plaquette de présentation du programme réalisé du 26 au 30 juin 2006 est en annexe 3. Le programme réalisé est décrit ci-après :

MANAUS :

Arrivée des participants les 24 et 25 juin

Transfert Aéroport Hotel par la navette du Novotel

Hotel : Av. Mandii, 04-Distrito Industrial Manaus-AM BRASIL

Tel (92)2123 1211/1200 – Fax (92) 2123 1294/1295

Contact : Rosinei Moraes : rmoraes @accorhotels.com.br

Lundi 26 juin: Visite Itacoatiara

06h30 sortie de l hotel pour Itacoatiara

10h00 : Visite de Mil Madeiras – Precious Wood

Présentation du groupe et des systèmes de management forestier et extraction des bois

11h30 : Visite de la centrale thermique BKEnergia

12h30 : Déjeuner offert par la société KOBLITZ au bord de l amazone

14h30 : visite de la centrale thermique du groupe Maggi

16h00 : retour sur Manaus

19h30: arrivée à l'hôtel

Mardi 27 juin :

Transfert pour l aéroport, navette de l'hôtel à 4h40.

Départ pour Santarem vol TAM JJ 3893, 05h40.

SANTAREM :

Mardi 27 juin

Arrivée à 6h45, transfert pour l'hôtel et visites par le bus de la société Alter do Chao.

Hotel : Barao Center Hotel Ltda, Av. Barao do rio Branco, 352/A centro

Tel : (93) 3064 9950/3064 9968 Contact Kesia Freitas

8h00: Visite de la société Estancia Alecrim

10h00 : retour Hôtel

12h00 : déjeuner Hôtel

Après midi libre : Jeu de la sélection Brésilienne

20h00 : dîner restaurant dans la ville de Santarem

Mercredi 28 juin

8h00 : visite de la société Rancho da Cabocla

11h00 : Retour a l hotel

12h30 : Dejeuner à l hotel

14h00 : Visite de la société Madesa

16h00 : Visite de la Cemex

Présentation du groupe et des systèmes de management forestier et extraction des bois

19h00 : retour à l'hôtel
20h00 : Dîner organisé dans la ville de Santarem

Jeudi 29 juin
Transfert pour l'aéroport, Bus Alter départ à 6h05.
Départ pour Belem vol TAM JJ 3893, 07h05.

BELEM:

Jeudi 29 juin
Arrivée à 9h20, départ pour les visites
10h20 : Visite de la Pampa
12h00 : déjeuner Churascaria
14h00 : Visite Tramontina
16h00: Visite Eldorado
18h00 : Visite DHL (ou reporter au 30 juin)
19h00 retour Hotel
20h30 : Clôture du « Study Tour » avec tous les participants et les invités d'honneurs:
Représentants des ambassades africaines et françaises, représentants politiques brésiliens,
représentants des universités, industriels, ...

Hotel HILTON: AV PRESIDENTE VARGAS 882 BELEM
Tel : (91) 4006 7597/7537/7539 – fax (91) 3223 4354
Contact Maristela Neves : maristela.neves@hilton.com

Vendredi 30 juin
7h30: départ pour la visite de la société Cikel
11h00 : visite de la société DHL
12h00 : déjeuner
13h30 : retour hôtel
14h00 : départ pour l'aéroport
15h30 : départ pour Cayenne par le vol TX 202, 15h30

Dimanche 02 juillet
Départ pour Cayenne (2eme groupe)

CAYENNE:

Lundi 03 juillet : Séminaire à l'hotel Novotel à Cayenne (cf. Chapitre III).

Mardi 04 et mardi 05 juillet : départ des participants visiteurs vers Paris ou vers Belém.

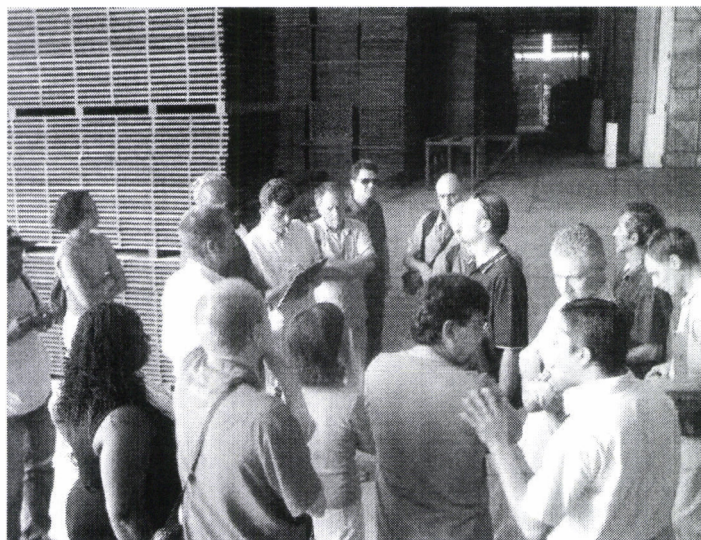
2.5) Les participants au study tour

La liste, les fonctions occupées et les coordonnées des participants au study tour sont présentées en annexe 4.

De nombreux partenaires techniques en Guyane et au Brésil étaient associés à la réalisation de ce projet.

L'équipe d'organisation avait invité des responsables des collectivités locales ayant en charge une compétence économique et énergétique au Conseil Régional ainsi que leurs services techniques, des professionnels filière bois et travaux forestiers, des experts du secteur public ou du privé, chercheurs et technicien dans le domaine des énergies renouvelables.

Des participants industriels et bureaux d'études travaillant dans le bassin du Congo (Forêt d'Afrique centrale) étaient associés à l'opération dans le cadre du cofinancement du projet européen BEPINET. Cette participation d'industriels du bois travaillant en Afrique a permis d'étendre le partage d'expérience sur la valorisation des bois de forêts naturelle tropicale.



Légende photo : Les participants du study tour lors de la visite d'une scierie.

III – ORGANISATION ET DEROULEMENT DU SEMINAIRE

3.1) Organisation du séminaire

Le séminaire de débriefing sur les technologies biomasse énergie appropriées au contexte guyanais s'est déroulé le 03 juillet au Novotel de Guyane. Initialement prévu sur 2 jours, il a été concentré en une journée afin de limiter les contraintes sur les emplois du temps et permettre à davantage de participant de s'inscrire.

Une large diffusion des invitations a été réalisée par télécopie et messagerie électronique auprès d'une soixantaine d'acteurs en Guyane début juin 2006. Trente participants ont suivi les exposés et participé aux débats (cf. 312 ci après).

Le séminaire s'est déroulé dans une salle de l'hôtel Novotel de Cayenne et le déjeuner sur place a permis de poursuivre les échanges et discussions, tout en réduisant la durée de l'interruption de mi journée.

L'événement a aussi été suivi par la presse avec notamment un reportage télévisé qui a été diffusé par Radio France Outremer dans le journal d'information du soir. Le Cdrom présentant les exposés des experts devrait aussi contenir le reportage et les interviews de MM. Gaillou, 2^{ème} vice président du Conseil Régional, Marc Girard, directeur d'EDF Guyane, et François PINTA, chercheur Cirad et représentant le comité d'organisation.

3.2) Les participants au séminaire

La feuille de présence des participants au séminaire organisé à Cayenne en Guyane le 03 juillet 2006 est jointe en annexe 5.

Ils représentaient à la fois le secteur privé et le secteur public dont les responsables d'entreprises privées et publiques dans les domaines du bois et de l'électricité, sans oublier la participation de Monsieur le 2^{ème} vice président du Conseil régional chargé du développement durable.

Les participants guyanais au séminaire étaient des membres des partenaires techniques associés au projet : Région Guyane, Ademe, exploitants forestiers et scieurs, bureau étude dans le domaine des énergies renouvelables ou en maîtrise de l'énergie. Les acteurs et experts qui ont exposé appartiennent à des organismes ou sociétés brésiliennes et françaises : Monsieur le 2^{ème} vice président de la Région Guyane, IBAMA et Koblitz (Brésil), Ademe et Cirad Guyane, et FRM basés à Montpellier.

3.3) Compte rendu du déroulement du séminaire

L'objectif du séminaire est de mettre à profit les visites techniques pour partager les idées et proposer une ou plusieurs opérations de démonstration en Guyane. La participation d'experts et d'industriels brésiliens et africains a permis d'élargir la réflexion avec des éclairages nouveaux.

Plusieurs exposés ont permis d'informer les participants sur les enjeux, les technologies disponibles, les technologies visitées lors du study tour et les méthodes d'analyse économique et financière de projets bois énergie dont la durée de fonctionnement peut couramment dépasser 20 ans.

Les débats ont porté sur les technologies de conversion de la biomasse en énergie dans la filière bois et certaines filières agroindustrielles telle que la filière canne. La problématique de l'approvisionnement apparaît critique compte tenu des quantités importantes de biomasse à collecter, transporter, et préparer pour les centrales électriques (par exemple le Plan énergétique régional fait état de 100 000 tonnes de bois par an pour approvisionner une centrale de 10 MW électrique).

La discussion a porté sur les possibilités de mise en œuvre de plantations d'espèces forestières à croissance rapide en Guyane comme par exemple l'acacia mangium. Le directeur de l'environnement a indiqué craindre la colonisation non maîtrisée d'espaces protégés par des espèces qui peuvent se révéler trop colonisatrice.

Les contraintes liées aux performances économiques ont été discutées en mettant en exergue la comparaison aujourd'hui plus aisée avec un prix du baril de pétrole à plus de 65 dollars et une perspective de maintien des cours pétroliers à un prix élevé... qui favorisera naturellement les énergies alternatives à l'avenir. Les perspectives de prise en compte du marché commercial du carbone est également favorable, mais il faut rappeler que ce marché n'est économiquement accessible que pour un volume important d'émission annuelle par une seule et même unité, ce qui exclut de fait les petites et moyennes centrales.

Enfin, signalons que des fiches portant sur des technologies fiables de valorisation énergétique du bois ont été proposées aux participants. Ces fiches sont présentées en annexe 6.

Les technologies décrites peuvent être mises en œuvre pour répondre à des besoins de valorisation des déchets d'industrie du bois, valorisation de bois lors de défriche, approvisionnement en électricité de village isolé. Ces technologies pourraient être mises en œuvre via des opérations pilotes ou de démonstrations en Guyane.

Un Cdrom présentant les exposés des experts, le résumé des débats, et les fiches technologiques est en préparation avant sa diffusion auprès des participants.

IV – ENQUETE DE SATISFACTION

Concernant l'enquête de satisfaction réalisée à la fin de l'opération, tous les participants du study tour ont apprécié la qualité des visites techniques réalisées ainsi que l'organisation logistique. Une remarque a été relevée concernant les vols à l'intérieur du Brésil qui avaient lieu très tôt le matin dont un qui a obligé le groupe à se lever à 4h00 du matin. Le programme a également été jugé dense pour ce qui est de réaliser tout ce programme en une semaine.

Une autre remarque a été formulée par plusieurs participants : Au delà de l'échange enrichissant entre guyanais et brésiliens, la participation d'industriels du bois travaillant en Afrique a permis d'étendre le partage d'expérience sur la valorisation des bois de forêts naturelles tropicales dans des conditions opérationnelles variées.

V – SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Les objectifs de l'opération ont été atteints : Le projet visait avant tout à développer le partage d'expérience entre responsables, professionnels, techniciens et chercheurs qui travaillent dans le domaine de la valorisation énergétique du bois. Les échanges nourris entre les participants au cours du study tour comme lors du séminaire à Cayenne ont permis à chacun de progresser dans sa vision des possibilités existantes pour la valorisation énergétique de la biomasse.

Un autre objectif consistait à nouer des contacts durables afin de continuer après le présent projet à échanger et coopérer sur les problématiques de production durable d'énergie renouvelable à partir de biomasse (et plus particulièrement le bois qui nous intéressent ici). Les contacts sont noués et le dynamisme des participants permet d'escompter la poursuite des relations établies. Des échanges sur l'aménagement forestier et la valorisation des bois ont également eu lieu entre les professionnels de Guyane et d'Afrique, ainsi qu'avec le représentant de la société française « Forest Ressource Management », membre du comité d'organisation, dont le directeur a participé au study tour et au séminaire à Cayenne.

Enfin, l'action visait à favoriser l'émergence de projets de démonstration d'unités de valorisation énergétique du bois performantes pour répondre aux besoins d'ERD (électrification rurale décentralisée) ou pour une production sur le réseau électrique guyanais. Des voies alternatives à la production d'électricité par groupe diesel devraient logiquement se développer en Guyane à partir du moment où les effets induits sur le développement économique local et sur le bilan environnemental des activités sont pris en compte.

Concernant les besoins de plus petite capacité (quelques dizaines à quelques centaines de kW) pour les besoins de sites isolés (usine non raccordée, village), la technologie chaudière+moteur à vapeur qui a été visitée à Belém correspond bien au type de besoin. Des usines et villages isolés en Guyane pourraient techniquement être alimentés de cette manière. Pour les sites à proximité d'un fleuve ou d'une rivière, la filière micro hydraulique peut être une alternative à étudier. Dans tous les cas, une filière de production de biocarburant (huiles végétales) est à étudier parallèlement afin de retenir la solution la plus performante (fiable, durable, et économique) parmi les énergies renouvelables disponibles. La rentabilité économique est à analyser par comparaison avec une production par groupe diesel qui est habituellement la solution de référence et qui souffre d'un prix élevé du diesel rendu sur site (coût de transport élevé du carburant depuis le littoral).

Des pistes existent aujourd'hui pour mettre en place des projets de démonstration d'électrification décentralisée pour des villages isolés : Saül, Trois sauts,... A ce stade, les projets doivent être formalisés sur papier pour permettre la recherche de soutien financier courant 2007. Plusieurs bailleurs de fond sont intéressés à appuyer ces initiatives qui devraient contribuer au développement durable de l'intérieur de la Guyane.

Concernant la production sur le réseau électrique guyanais, les technologies mises en œuvre au Brésil pour des unités de 8 ou 9 Mégawatt électrique correspondent bien au besoin existant en Guyane pour répondre à la volonté de développer la production d'électricité renouvelable sur le réseau EDF. La mise en place de telles unités se heurte principalement aux coûts de mobilisation de la ressource qui doivent être optimisés dans le contexte guyanais. De plus, le prix de rachat par EDF de l'électricité produite par biomasse (le décret du 10 avril 2004 fixe le tarif à 55 €/MWh seulement) est beaucoup trop bas compte tenu des coûts de production locaux, quelque soit le moyen de production utilisé. Heureusement, une possibilité de négociation d'un prix de vente plus raisonnable existe pour les porteurs de projets d'énergie renouvelable.

Ainsi, des perspectives de mise en œuvre de technologies mûres existent en Guyane et de grands espoirs sont portés sur l'unité qui doit démarrer à côté de la scierie de Kourou fin 2007-début 2008. Il est fondamental que la première opération industrielle fasse démonstration de la performance et du potentiel de la filière bios énergie.

Par la suite, l'installation d'autres centrales sera conditionnée par le bilan économique attendu sur les projets qui n'utiliseront plus des déchets industriels de bois, mais de la biomasse qui devra être mobilisée en forêt ou bien en plantations. A ce titre, l'étude lancée par l'Ademe fin 2006 permettra d'apporter un éclairage sur le potentiel de la filière en Guyane en fonction de scénarii de prix du pétrole.

La période actuelle est propice car l'extension de la surface agricole décidée dans le cadre du SDA (schéma de développement agricole) nécessite de déboiser plusieurs milliers d'hectares qui constituent un gisement de biomasse de plusieurs centaines de milliers de tonnes à valoriser dans les 10 à 15 ans à venir. Les conditions de rentabilité peuvent être atteintes via la maîtrise des coûts de production (et notamment l'approvisionnement en bois combustible) et la définition (négociation) d'un prix d'achat de l'électricité à partir de bois permettant aux entreprises privées de s'engager durablement dans cette filière.

ANNEXES

Annexe 1 : Programme réalisé lors de la mission préparatoire au study tour

Le programme réalisé lors de cette mission préparatoire a permis à la fois de rencontrer directement les responsables d'entreprises à visiter et d'organiser toute la logistique : réservation des bus, avions et hôtels... Elle a été réalisée du 04 au 09 juin 2006 selon le programme décrit ci après :

Dimanche 4 juin : déplacement Kourou – Belém via Aéroport Rochambeau.

Lundi 5 et mardi 6 juin :

- Rencontre avec les représentants de l'Ibama , Embrapa et UFPA à Belém
- Rencontre des responsables des sites industriels pour l'organisation du planning journalier du study tour.
- Rencontre avec les représentants de l'AIMEX (groupement des exportateurs de bois d'Amazonie)

Mercredi 7 juin:

- Déplacement en avion et arrivée Santarem
- Rencontre des responsables des sites industriels pour l'organisation du planning journalier du study tour.

Jeudi 8 juin :

- Rencontre des responsables des sites industriels pour l'organisation du planning journalier du study tour (suite).
- Contact avec Sté Koblitz pour planification des visites de Manaus.

Vendredi 9 juin:

- Rencontre des responsables des sites industriels pour l'organisation du planning journalier du study tour (suite et fin).
- Déplacement en avion – Santarem – Belém – Kourou via Rochambeau.

**Annexe 2 : Liste et coordonnées des participants au study tour
(1p)**

STUDY TOUR

Nom	Prénom	Fonction	Société	Adresse	Tel/Fax	email
ONOUVIET	Carole	Responsable Dév. Qualité	IFK	B.P. 613 Libreville	Tel 241 76 88 44 Fx 241 76 88 43	carole.onouviet@sogafric.ga
BOUDAUD	Bertrand	Direction Internationale	ETDE	1, Avenue E. Freyssinet 78062 ST QUENTIN en YVELINES	Tél 01 30 60 25 07 Fax: 01 30 60 35 33	b.boudaud@etde.fr
CASSAGNE	Bernard		FORET RESSOURCE MANAGEMENT	Espace Fr�jorgues Ouest 60 rue Henri Fabre 34130 MAUGUIO	Tel 04 67 20 08 09 Fax 04 67 20 08 12	fm@frm-France.com
BANOS	Alexandre		SCAF			
SOUFFLOT	André		SCAF			
GIRARD	Philippe	Chef UPR Biomasse Energie	CIRAD	73, rue J.F. Breton 34398 MONTPELLIER CEDEX 5	Tel 04 67 61 44 90 Fax 04 67 61 65 15	philippe.girard@cirad.fr
REINAUX	Marcilio	Gérant commercial	KOBLITZ	Rua Vitorio Laerte Furlani, 890 Vila Rezende Piracicaba/SP CEP 13405-430	Tel 19 3421.0223 FX 19 3421.3602	koblitz@koblitz.com.br
QUIRINIO	Waldir	responsable biomasse �nergie	IBAMA	scen trecho 2 - ed sede do ibama brasilia df cep 70818-900 brasil	T : (55) 61 3316 1524 F: (55) 61 3316 1515	waldir.quirino@ibama.gov.br
ROUSSET	Patrick	Chercheur	CIRAD	scen trecho 2 - ed sede do ibama brasilia df cep 70818-900 brasil	T : (55) 61 3316 1524 F: (55) 61 3316 1515	patrick.rousset@cirad.fr
ERNEST	Guillaume	Consultant environnement et coop. internationale		SQS 305 Bloco B Apto 106, 70352-050 Brasilia DF, Brazil	Cellular + 55 61 99 61 09 97	guillaume.ernst@yahoo.fr
MONTEMONT	Claude	Gérant	Sté S.E.N.PATOZ	ZI. Degrad des Cannes 97354 Remire	T : 0594 35 40 78 F : 0594 35 40 57	claudemontemont@wanadoo.fr
CHIN TENG FUNG	Johan	Gérant	Sté des Bois Tropicaux	4 Rte des chutes voltaires 97393 St Laurent du Maroni	T : 0594 34 25 75 F : 0594 34 18 42	sbretf@wanadoo.fr
CHING TEN FUNG	I Ling	Ass. De direction	Sté SBT	4 Rte des chutes voltaires 97393 St Laurent du Maroni	T : 0594 34 25 75 F : 0594 34 18 42	sbretf@wanadoo.fr
KEROUANTON	Lionel	Directeur technique	Sté KLR EARL & KLR TP	PK 8 - RN2 - 97351 MATOURY	T : 05 94 25 11 80 F: 05 94 25 11 81	k.l.r@wanadoo.fr
LECURIEUX	Louise	Service environnement recherche	Région Guyane	BP 7025 - 97307 Cayenne cedex	T : 05 94 27 12 07 F: 05 94 27 12 88	louise.lecurieux@cr-guyane.fr
TASSIUS	Joseph	Attaché de direction	EDF Guyane	48 Bd Jubelin 97300 Cayenne	T : 05 94 39 64 00	joseph.tassius@edf.fr
JULES	Jean-Paul	Gérant bureau étude	SUBSTITUT	510 ZI Collery 5 - 97300 Cayenne	T : 05 94 25 52 71 F: 05 94 25 52 72	jeanpaul.jules@wanadoo.fr
COURTIAD�	Pierre	ingénieur biomasse énergie	ADEME	28 Ave Leopold Heder - 97300 Cayenne	T : 05 94 29 73 60 F: 05 94 30 76 69	pierre.courtiade@ademe.fr
OTHILY	Arthur	Président du conseil scientifique	Parc Naturel Régional de Guyane	31 Rue F. Arago - 97 300 CAYENNE	T : 05 94 28 21 45	othily.arthur@wanadoo.fr
PINTA	François	Chercheur	Cirad	Campus agronomique - BP 701 97 387 Kourou cedex	T : 05 94 32 73 56 F: 05 94 352 73 51	francois.pinta@cirad.fr

**Annexe 3 : Plaquette de présentation du programme réalisé
du 26 au 30 juin 2006 (4 p.)**



STUDY-TOUR AMAZONIE BRESILIENNE

**Gestion forestière durable et transformation maximale du bois :
les opportunités offertes par la COGENERATION en liaison avec le
concept nouveau d'AMENAGEMENT DES FORETS AU BRESIL**

**BELEM – SANTAREM – MANAUS
26-30 Juin 2006**



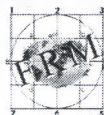
OBJECTIF :

Développer le partage d'expériences entre responsables, professionnels, techniciens et chercheurs qui travaillent dans le domaine de l'aménagement forestier, de l'exploitation à impact réduit, de la transformation du bois et de l'utilisation des résidus pour une valorisation énergétique.

CONTENU :

Les visites techniques porteront sur des installations innovantes ou exemplaires dans des entreprises du secteur forestier et industriel de la transformation du bois en Amazonie brésilienne. Le Study Tour est prévu dans la région de Belém, Santarém et Manaus où sont recensées les principales exploitations forestières sous aménagement durable et les technologies de production d'énergie à partir du bois : le programme comprendra la visite de concessions forestières aménagées avec des productions forestières certifiées, des outils de première et seconde transformation industrielle du bois, des unités de production de chaleur pour le process industriel, de production d'électricité, et de cogénération électricité et chaleur.

CONTACTS ORGANISATION :



Ce Study Tour est organisé avec l'appui financier des fonds de coopération régionale de Guyane, de l'Union Européenne et l'assistance de l'équipe d'organisation CIRAD/FRM/IBAMA.

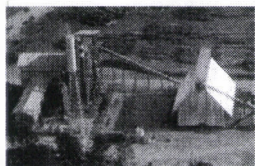
Renseignements et réservation par courrier électronique auprès du CIRAD :
philippe.girard@cirad.fr - patrick.rousset@cirad.fr - francois.pinta@cirad.fr

Informations techniques : CIRAD : (adresses mël ci dessus) et FRM frm@frm-france.com

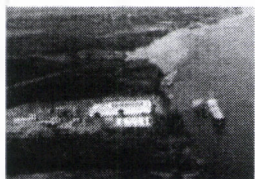
PROGRAMME DEFINITIF

Jour 1 : lundi 26 juin 2006

Visites techniques à Itacoatiaria (Amazonas)



- **Centrale biomasse BK Energie** : La centrale appartient à la société Precious Wood depuis l'année dernière (2005). Cette centrale thermique gérée par la société spécialisée KOBLITZ a une puissance nominale de 9 MWe. Elle alimente la scierie Precious Wood et la ville d' Itacoatiara qui compte quelque 70 000 habitants. L'industrie apparaît ici comme un acteur majeur du développement local par cette activité de production d'électricité pour alimenter le réseau local.



- **Groupe Maggi** : production de soja. Entreprise produisant son énergie à partir d'un ensemble chaudière turbine de 700 kw installée par la société Koblitz



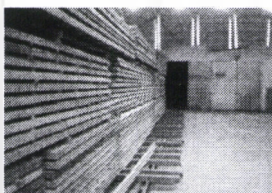
- **Precious Wood** : La société produit des sciages, menuiseries et placages - principalement pour l'exportation vers l'Europe, les USA et l'Asie. Plus de 110 000 m³ de grumes ont été exploités en 2004. Depuis 1996, elle pratique la gestion forestière durable sur 311 000 ha à Itacoatiara (250 kilomètres à l'est de Manaus). PWA commercialise plus de 70 espèces différentes de bois, et joue de ce fait un rôle actif dans le développement de marchés pour des espèces moins connues. En 1997, les opérations de PWA ont été certifiées selon les critères du FSC (Forest Stewardship Council). L'entreprise est la première compagnie certifiée FSC en Amazonie brésilienne.

Jour 2 : mardi 27 juin 2006

Visites techniques à Santarem (Pará)

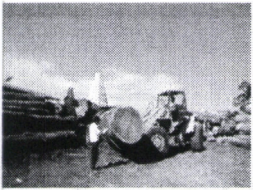


- **Estância Alecrim** a été fondé en 1999. Cette jeune entreprise est en pleine croissance. Les objectifs pour 2006 sont la grandissement du site de production et la construction de séchoirs abois

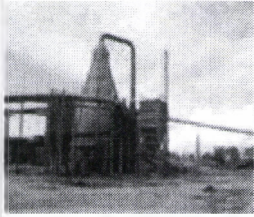


- **Rancho da Cabocla** : Cette entreprise a été fondée en 1981 et a commencé à exporter en 1988 pour devenir une des scieries les plus importantes de la région. Leurs marchés sont l'Europe (hollande, France, Portugal, Espagne, Allemagne), asiatique (Chine, Japon, Thaïlande, Philippines), Amérique du nord et les caraïbes. Les produits sont le S4S, E, Deck, KD, parquet, etc... à partir de Massaranduba, Ipê, Jatobá, Tatajuba, Angeli Vermelho, Garapa, Muiracatiara, Cedro, etc

Jour 3 : mercredi 28 juin 2006

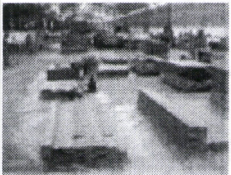


- **Cemex** (Cemex Comercial Mad. Ltda) : Le groupe Forex-CEMEX est une entreprise Créée dans le sud du Brésil en 1952. Aujourd'hui, le CEMEX possède des complexes industriels de transformation du bois dans diverses régions du Brésil et fait référence dans le domaine. Ses usines, installées sur 15,6 ha à Santarém, sèchent mensuellement 3000 m³ de bois dans des séchoirs automatiques

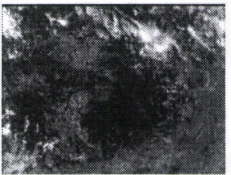


- **Madesa** : Il s'agit d'une société importante de la région de Santarém qui compte plus de 250 emplois directs répartis entre les activités forestières et industrielles. Plus de 90% de sa production est commercialisée sur le marché international, principalement les marchés en Europe, Australie, USA, Caraïbes, Japon et Chine. Les segments de marché sont les meubles, parquets, lambris et bois de construction. La société Madesa possède 27 000 ha de forêt aménagée à Santarém. Elle possède des pépinières d'essences natives. Parmi les 17 essences commercialisées par Madesa, cinq représentent 80% de ses volumes de vente : Angelim vermelho, Ipe, Jatobá, Massaranduba et Piquia

Jour 4 : jeudi 29 juin 2006



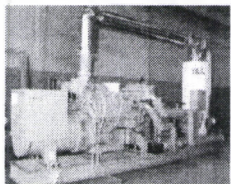
- **Pampa Exportação Ltda** : Cette usine du groupe Pampa est spécialisée dans la production de parquet et deck (8 à 10 conteneurs en produits finis par jour). Elle produit son électricité à partir d'un ensemble chaudière à vapeur + groupe turbo alternateur (Worthington) conventionnel de 550 KVA. Son approvisionnement s'effectue auprès de producteurs de bois certifiés et d'un large panel de professionnels exploitants forestiers.



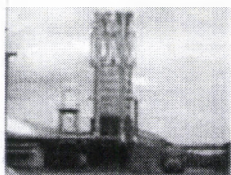
- **Eldorado Exportação Ltda** : La société produit et exporte des sciages de bois d'Amazonie depuis 1985. Propriété du Groupe français Menuiseries Lapeyre SA de 1990 à 1993, la société a été rachetée par Estella Maria Perlin de Rio Grande do Sul, grande firme nationale d'exportation. Avec une production annuelle de 42 000 m³ pour un chiffre d'affaires de 17 milliards de dollars, la société exporte surtout vers la France, l'Espagne, les Etats-Unis, l'Irlande et Haïti



- **Tramontina** : Cette société regroupe une dizaine de sites de production au Brésil (plus de 5500 personnes) et un réseau de distributeurs national et international. Hautement spécialisée dans la fabrication d'ustensiles de cuisine et de mobilier de jardin en bois certifiés FSC, l'entreprise utilise ses déchets pour alimenter un groupe générateur de 1MW qui couvre ainsi une partie de la consommation énergétique de l'entreprise.



- **DLH** : Groupe danois spécialisé dans le négoce international des bois tropicaux, DLH possède une centrale thermique constituée d'un moteur à vapeur de 250 KVA (BENECK) couplé à un alternateur.



- **Cikel** : Une parqueterie, la première entreprise transformatrice de bois certifiés (FSC, ...) au Brésil. Cette entreprise, dont l'activité principale est le négoce de bois tropicaux, possède plus de 250 000 ha de forêts certifiées. Cikel souhaite aujourd'hui gérer ses déchets en utilisant différentes techniques de carbonisation, l'objectif étant l'exportation du charbon obtenu vers l'Europe

Annexe 4 : Programme réalisé lors du séminaire à Cayenne le 03 07 2006

Lundi 03 juillet 2006
NOVOTEL, Chemin Hilaire
Route de Montabo - 97 300 CAYENNE
Tel : 05 94 27 13 04 – Fax : 05 94 28 13 95

PROGRAMME PREVISIONNEL :

- 8h30 : Filière biomasse énergie : enjeux et perspectives en Guyane – par Me PONS, Déléguée régionale de l'Ademe en Guyane.
- 9h15 : M. José GAILLOU, 2ème Vice Président de la Région Guyane, chargé du développement durable et des énergies renouvelables.
- 09h45 : Les technologies adaptées aux besoins de production d'électricité sur le réseau électrique et d'ERD – Par M.Philippe GIRARD, chef de l'Unité de Recherche Biomasse énergie du Cirad (Montpellier).
- 11h30 : Discussion.
- 12h30 : Déjeuner sur place (sur inscription).
- 14h : Discussion-débat – la production de bois avec des plantations d'espèces à croissance rapide. Le risque de modification de l'écosystème de savanes par des espèces colonisatrices. Exemple d'Acacia Mangium.
- 14h30 : Centrales électriques à bois au Brésil : caractéristiques, performances et limites d'installations existantes . exemples de centrales électriques à bois visitées au cours du study tour – M. Waldir QUIRINO, chercheur à l'IBAMA.
- 15h45 : Méthode d'analyse économique et financière, facteurs sensibles de la performance des installations. F. PINTA Cirad-Kourou.
- 16h15 : Discussion
- 16h30 : Cloture du séminaire.
-

Afin de faciliter l'organisation du séminaire, merci de bien vouloir nous indiquer votre participation , au plus tard le lundi 26 juin 2006.

Contact : francois.pinta@cirad.fr , Tel : 05 94 32 73 56 , Fax : 05 94 32 73 51

Sylvie.mouras@cirad.fr, Tel : 05 94 32 09 60 (à partir du 23 juin)

**Annexe 5 : Feuille de présence des participants au séminaire
à Cayenne (2p)**

**SEMINAIRE SUR LES TECHNOLOGIES
DE VALORISATION ENERGETIQUE DU BOIS EN GUYANE**

Lundi 03 juillet 2006 - Novotel Cayenne

Feuille de présence

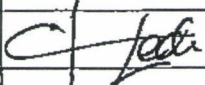
Nom	Prénom	Adresse	Poste occupé	Inscription au déjeuner	Signature
PINTA	François	CIRAD - KOUROU	CHERCHEUR	oui	
PONS	Suzanne	ADEME	DR	oui	
GIRARD	Philippe	CIRAD Forêt	chef d'APP	oui	
QUIRINO	Waldir	LPT / IBAMA - BRÉSIL	chercheur	oui	
HOUBAS	Sylvie	CIRAD	chercheur	oui	
Chaudet	Laurie	MOE Conseil	ingénieur	non	
CUYSSOT	Georges	CCI de la Guyane	CME	oui	
COURTINE	Pierre	ADEME	Ingénieur	oui	
ROUSSET	Patrick	CIRAD	chercheur	oui	
CASSAGNE	Bernard	FAN	Dir. des Exp.	oui	
BYRON	Philippe	Guyane Technopole	Chargé Aff.	NON	
LECOEUR	Nicolas	ONF	DR Adj.	NON	
DEFFENOIS	Julien	ONF	Chargé de mission	oui	
Montemont	Clauke	Paroz Guyane	Chargé	NON	
LECURIEUX	Julie	CONSEIL REGIONAL	Chargé mission	non	
ERIV	Corinne	SUBSTITUT Cayenne	Directrice	Non	
TULES	JPaul	I.ENERGIE	Ingénieur	Oui	
GOMBARD	Pascal	P.N.R.G.	Directeur	Non	
OTHILY	Arthur	Consultant		NON	
ATTICA	Marcel	Département Guyane	Responsable	NON	
GIRARD	Tac	EDF	Directeur	Oui	
MONICOLLE	Céline	SGAR - Préfecture	chargée de mission	oui	

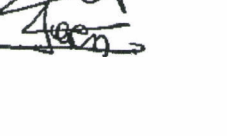
voir au dos

**SEMINAIRE SUR LES TECHNOLOGIES
DE VALORISATION ENERGETIQUE DU BOIS EN GUYANE**

Lundi 03 juillet 2006 – Novotel Cayenne

Feuille de présence

Nom	Prénom	Adresse	Poste occupé	Inscription au déjeuner	Signature
LE DUC	Jean	DIRET	Directeur	oui	

Nom	Prénom	Adresse	Poste occupé	Inscription au déjeuner	Signature
DALLE	Julie	julie.dalle.agriculture. guyane.fr	chargée de mission - DAF	oui	
TASSIUS	Joseph	joseph.tassius@edf-gf.fr	EDF Responsable ENR	oui	
GODON	Philippe	philippe.godon@aird.fr	à la CIPAD	oui	
LECONTE	Poul	dir.t.guyane@wanadoo.fr	dir. Tech	oui	
LEQUANTON	Lionel	PK8 MATOURY		non	
CADEZ	Michele	CACAO	Guyane Sciages	Non	
POPFAL	David	david.popfal@a-guyane.fr	chargé de mission	oui	
NERON	Karine	karine.neron@er-guyane.fr	Responsable SER	oui	

Annexe 6 : Fiches des technologies de valorisation énergétique du bois

- turbine à vapeur
- moteur à vapeur
- gazéification
- pile à combustible (hydrogène produit à partir de biomasse)

Fiche technique et économique sur les turbines à vapeur

Aspects techniques

L'une des technologies les plus communes pour la production d'électricité repose sur les centrales à cycle de Rankine en turbine à vapeur, notamment quand ces centrales sont alimentées par des combustibles solides.

La chaleur produite durant la combustion est utilisée pour élever la température et la pression de la vapeur dans la chaudière jusqu'à la pression de consigne. Cette vapeur est ensuite injectée entre les pales de la turbine à grande vitesse. L'impact de la vapeur sur les pales crée le mouvement de rotation d'un axe qui entraîne le générateur

Les turbines à vapeur sont utilisées selon deux modes distincts, en condensation avec ou sans extraction (illustré par la figure ci-après), ou à contre pression. Les rendements électriques sur PCI vont de 15 à 38% avec les turbines à condensation. Cette variation s'explique par la taille, le degré de sophistication et la nature du combustible utilisé.

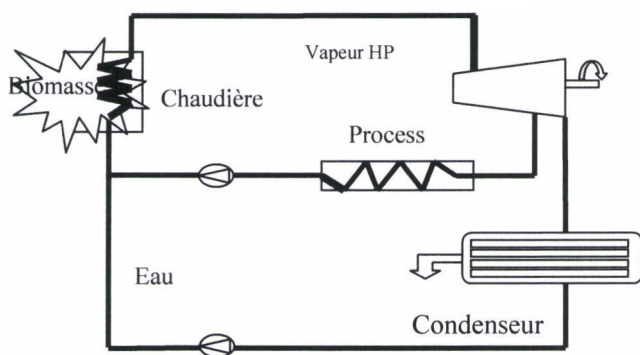


Schéma de principe d'un ensemble de génération d'électricité à condensation.

Les turbines à vapeur à contre pression ont généralement des capacités variant de 0,05 MW à 500 MW pour des applications en cogénération avec des rendements électriques faibles compris en 10 et 20% mais avec des rendements globaux supérieurs à 80% si l'on prend en compte l'énergie thermique utilisée. La grande majorité des applications se situe malgré tout à des niveaux de puissance inférieurs à 50 MW. La photo ci-après présente une turbine à condensation Nadsrowski.

Les unités de génération centralisées, généralement de grosses tailles et sans utilisation possible de la chaleur résiduelle, sont équipées de turbines à condensation. À l'opposé, dans le cas des petites unités décentralisées, elles sont situées à proximité de consommateurs de chaleur. Elles vont, dans ce cas, utiliser préférentiellement des turbines à contre pression. Dans les pays tropicaux, les besoins de chaleur peuvent être assez considérables y compris en milieu rural pour les besoins des agro-industries et de l'artisanat.

Un des gros avantages des turbines à vapeur réside dans le fait que la vapeur générée peut être produite par un large éventail de combustible et que ce combustible, utilisé pour chauffer l'eau, n'est pas en contact direct avec la vapeur ou les éléments tournants. Seul le pouvoir calorifique de combustible, et non sa qualité, est donc important.

L'électricité produite par le générateur est fonction des conditions de pression entrée et sortie turbine. Dans le cas de la turbine à condensation, la vapeur est évacuée dans un condenseur ce qui permet une récupération maximale de l'énergie de cette vapeur mais ne permet plus la récupération d'énergie thermique des condensats.

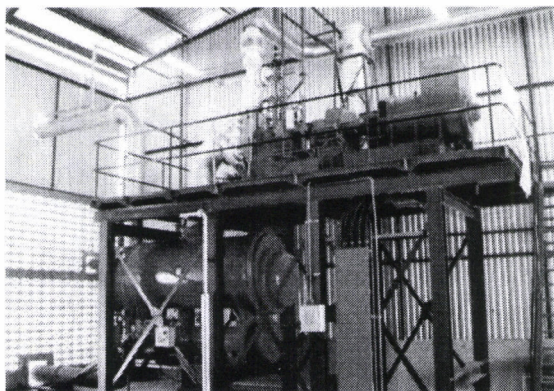


Photo 1 : Turbine a condensation Nadsrowski.

Pour certaines applications, le démarrage lent (nécessaire à la mise en pression) peut être un inconvénient, de même que les faibles performances obtenues en charge partielle (<70%). Un choix judicieux du matériel et un bon dimensionnement sont indispensables.

La limite la plus importante pour cette technologie est d'ordre financier, en effet l'investissement pour l'ensemble de la chaudière et de ses auxiliaires, est élevé. La mobilisation des fonds nécessaires est problématique pour une PME et à fortiori pour une collectivité rurale.

L'énergie électrique théoriquement récupérable avec la détente de la vapeur (en faisant abstraction de toutes pertes dans la conversion correspond à la différence d'enthalpie.

L'énergie fournie à la vapeur, par la pompe (négligeable) et la chaudière, correspond à l'énergie fournie par le combustible via la chaudière.

On définit ainsi le « rendement électrique du cycle théorique » (appelé par les thermiciens « rendement thermique théorique ») :

$$\eta_{\text{est}} = \frac{\text{électricité récupérable lors de la détente}}{\text{énergie fournie par la chaudière}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$

où h_1 , h_2 sont les enthalpies de vapeur respectivement sortie turbine, entrée turbine et h_3 l'enthalpie de l'eau entrée chaudière.

Ce rendement est uniquement lié aux niveaux de pression/température (et donc d'enthalpie) de la vapeur en sortie de chaudière et de turbine.

La variation d'entropie lors de la compression de l'eau restant négligeable par rapport aux autres transformations, on peut ne considérer que la partie détente du cycle pour déterminer le rendement isentropique. Ce rendement isentropique de la turbine est certes lié à la qualité de la turbine elle-même mais également aux niveaux de pression/température en entrée et sortie de turbine : une détente dans la zone diphasique (vapeur saturante) a un moins bon rendement isentropique qu'une détente de vapeur surchauffée.

Le rendement isentropique d'une turbine à vapeur varie en fonction de l'importance de la détente en zone diphasique par rapport à la détente en zone surchauffée : de 60% pour une détente essentiellement diphasique à 90 % pour une détente exclusivement en zone surchauffée (type turbine à contrepression).

Cette notion est importante car si elle a des répercussions évidentes sur l'efficacité énergétique de l'installation, elle a une implication forte sur les investissements. Ainsi, le choix d'investir dans un surchauffeur peut se discuter notamment si une disponibilité importante en déchets permet de négliger les aspects rendement.

Le choix n'est pas négligeable également en terme de maintenance (traitement d'eau) dans la mesure où les contraintes sont moins fortes. Par contre, le choix de la chaudière et la formation des personnels doivent être soignés afin de maintenir la qualité de la vapeur entrée turbines.

Il convient également de prendre en compte les pertes liées au transfert de l'énergie fournie par la vapeur en énergie mécanique de rotation du rotor. Les turbines ont des rendements mécaniques compris entre 85 et 95%. Enfin, le rendement de l'alternateur qui est de l'ordre de 95% prend en compte les pertes liées à la conversion de l'énergie de rotation de l'arbre de l'alternateur en énergie électrique. Si bien que le rendement électrique de la centrale qui correspond à l'électricité fournie aux bornes de l'alternateur par rapport à l'énergie calorifique fournie par le combustible de la chaudière sera affecté par les choix de matériel et de technologies réalisés.

En terme de choix technologique, dans le contexte des pays en développement, les critères de robustesse, de simplicité de mise en œuvre sont bien souvent prioritaires par rapport à la notion de rendement surtout lorsque le combustible à un coût négligeable.

Entre turbine à condensation et turbine à contre pression, toute chose étant égale par ailleurs, seul le rendement thermodynamique du cycle est le facteur limitant ainsi, le rendement théorique d'un cycle à condensation est pratiquement le double de celui d'un cycle avec une contre pression à 3 bars.

Aspects économiques

Cette technologie bénéficie d'une maturité acquise aux cours de nombreuses années d'expérience sur l'ensemble des continents et dans toutes (ou presque) les situations.

Certaines mises en œuvre concernent la récupération d'énergie sur les circuits vapeur existants et dans de très nombreuses configurations.

Le tableau 1 donne un ordre de grandeur des coûts d'investissement et de mise en œuvre des turbines à vapeur sur la base d'une installation type de cogénération à savoir, 15% de rendement électrique et 75% global, fonctionnant au charbon minéral à 0,5 c/kWh PCI.

Les turbines à vapeur à contre pression ont été mises en œuvre pour des puissances à partir de 40 kW même si, dans les pays industrialisés ces solutions ont du mal à trouver leur rentabilité économique en deçà du mégawatt notamment du fait des coûts de raccordement prohibitifs. Par contre, elles sont très largement utilisées pour entraîner d'autres éléments tournants comme des pompes, des ventilateurs, des compresseurs.

La durée de vie est extrêmement longue et excède fréquemment 50 ans pour autant que les opérations de maintenance soient correctement réalisées.

Cette maintenance est relativement limitée si l'on considère que le traitement d'eau concerne la chaudière. Il consiste en un suivi régulier de l'installation et notamment de ses auxiliaires, comme la lubrification, les éléments de refroidissement, de sécurité...

Investissement €/kW	Maintenance €/kWh	Coût moyen € c/kWh	
		800 h/an	4000 h/an
400 - 1500	< 0.4	2.5 - 6.5	4.0 - 12.0

Tableau 1 : Ordre de grandeur coûts d'investissement et de mise en œuvre turbine

Plus spécifiquement, les coûts d'investissement présentés au niveau du tableau 2 correspondent à la fourniture d'un groupe turbo alternateur complet, à savoir, turbine, réducteur de vitesse, alternateur et périphériques en fonction des niveaux de puissance.

Les coûts d'exploitation de ces ensembles sont de l'ordre de 1 à 3% des coûts d'investissements pour les ensembles à contrepression et 4 à 5% des coûts d'investissements pour les ensembles à condensation.

Pour l'ensemble de génération chaudière plus turbine, les coûts d'investissement peuvent varier dans une très large proportion selon la taille, les conditions de pression entrée/sortie, les standards de constructions.

Ces coûts pour une solution biomasse peuvent se décomposer en :

- 30% chaudière
- 25% préparation, stockage et manutention du combustible
- 10% traitement des fumées et contrôle de pollution
- 20% turbine et génération
- 15% bâtiment et ingénierie

Le seul poste qui puisse être sujet à de fortes variations est le poste préparation du combustible en fonction de sa nature (humidité, granulométrie,...) et dans une moindre mesure la chaudière selon le niveau de pression et d'humidité du combustible.

	Niveaux de puissance	Niveaux de rendements électriques	Coûts d'investissement en c €/kWe
Turbo-alternateur à contrepression	100 à 500 kWe	10 à 12%	600 – 800
	500 kWé à 1.5 MWe	12 à 14%	450 – 600
	1.5 à 5 MWe	12 à 15%	300 – 400
	5 à 10 MWe	15 à 20%	300 – 400
Turbo alternateur à condensation	500 kWe à 1.5 MWe	15 à 20%	600 – 1200
	1.5 à 10 MWe	20 à 25%	400 - 800

Tableau 2 : Coûts d'investissement selon niveau de puissance

Conclusion

Il existe de très nombreux constructeurs de turbines à vapeur. Presque tous présentent des références sur des installations industrielles fonctionnant à partir de biomasse (bagasse et autres sous-produits agro-industriels).

Une société brésilienne TGM qui fabrique et re-conditionne des turbines à vapeur s'est associée à un bureau d'ingénieur PTZ et un fournisseur d'alternateurs pour proposer une gamme de solutions

monoblocs adaptables sur tout type de chaudière. Le marché qui est visé concerne les petites agro-industries et les industries de bois brésiliennes.

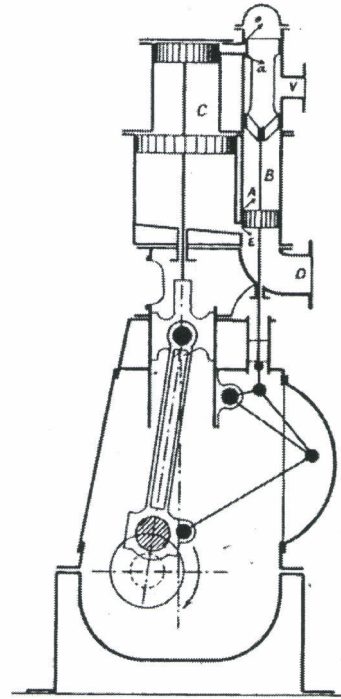
Cette standardisation permet de considérablement baisser les coûts et offre une solution modulable et facile à mettre en œuvre. C'est une solution qui apparaît comme extrêmement prometteuse dans un contexte d'économie rurale parce qu'il associe simplicité et faible coût.

Aspects techniques

La transformation de l'énergie de la vapeur peut également avoir lieu dans un moteur alternatif, même si l'essor des moteurs électriques, des turbines et autres moteurs à combustion interne, ont relégué les moteurs à vapeur en dernière position des équipements industriels pour la force motrice. Cependant, les moteurs à vapeur présentent l'avantage d'être extrêmement fiables et ont des caractéristiques qui ne sont pas obtenues par les autres générateurs.

Les moteurs les plus simples fonctionnaient sans détente de la vapeur dans le cylindre. Ainsi par une simple pompe, la vapeur remplit la totalité du cylindre et ne se détend pas. Il en résulte des rendements très faibles. Les moteurs plus élaborés, qui sont pour certains encore construits aujourd'hui, utilisent des systèmes d'obturation des cylindres qui limitent l'admission de la vapeur dans le cylindre en début de course du piston et permet la détente pendant la période de déplacement du piston. C'est le mouvement vertical des pistons, actionnés par les flux de vapeur qui, par le biais d'un arbre à cames et d'un vilebrequin, permet de faire tourner l'arbre relié à l'alternateur comme illustré dans le schéma.

Le gros avantage du moteur à vapeur réside dans le fait que, pour tous les niveaux de facteurs de charge, le moteur développe le même couple à toutes les vitesses de rotation des moteurs, la consommation de vapeur et la puissance restant proportionnelles à cette vitesse.



Pratiquement tous les autres moteurs nécessitent la même fourniture d'énergie pour maintenir un moment constant quand la vitesse varie. De plus, les moteurs à vapeur sont les seuls à avoir une consommation nulle de vapeur à une vitesse nulle alors qu'ils développent un moment identique et maintiennent la pression du process.

La conception plus simple des chaudières qui résulte d'une moins grande sensibilité des moteurs à la qualité de la vapeur, permet l'utilisation d'un grand nombre de biomasses dans les foyers. Le choix de ce dernier sera cependant, comme précédemment dans le cas des turbines, déterminant.

Il n'y a donc à ce niveau pratiquement aucune contraintes. La seule limite étant la combustibilité de la matière première et sa non contamination pour des raisons environnementales évidentes.

Le tableau 1 ci-après présente un aperçu des rendements thermodynamiques des moteurs à vapeur comparés aux turbines à vapeur simples.

	Rendement
Machine à action directe (sans détente)	0,25 à 0,35
CORLIS	0,60 à 0,70
Machine à soupape	0,65 à 0,75
Turbine à réaction et à condensation (0,1 bars)	0,75 à 0,80

Tableau 1 : Rendement thermodynamique des moteurs à vapeur

Les moteurs à vapeur que l'on peut retrouver commercialement se regroupent selon deux grandes conceptions.

Les moteurs verticaux : ces moteurs sont de conception modulaire. Chaque module comprend 2, 3 ou 4 cylindres couplés. Les moteurs de ce type les plus performants envoient la vapeur en sortie d'un cylindre pour alimenter en cascade le cylindre voisin. Dans le cas du moteur à double détente, que l'on peut considérer comme l'ancêtre des moteurs actuels type Spilling, la vapeur dite haute pression sortie chaudière est injectée dans le cylindre haute pression. Le déplacement du piston vers le bas et l'ouverture de la valve d'échappement injectent la vapeur dans un deuxième cylindre basse pression avant d'être elle-même évacuée vers l'atmosphère ou le condensateur. Dans un deuxième temps, de la vapeur haute pression est injectée sous le piston (alors en position basse) dans le cylindre haute pression pour faire remonter le piston, le même processus que précédemment a lieu dans le cylindre à basse pression. Le mode de régulation et d'ajustement de l'ouverture de valve influe directement sur la performance des moteurs et leur adaptabilité à différents niveaux de puissance appelée. Il existe peu de

constructeurs encore susceptibles de fabriquer ce type de matériel. Ce sont des matériels éprouvés présentant une durée de vie élevée et un coût de maintenance faible. A notre connaissance, Spilling (photo 1) et Engetherm sont les seuls constructeurs susceptibles de fournir ce type de matériel.

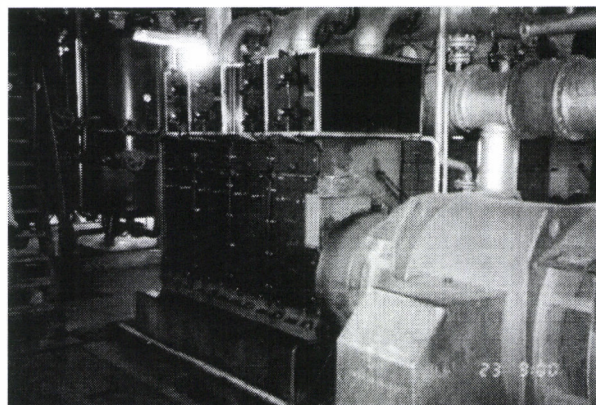


Photo 1 : Moteur à vapeur Spilling 600 kW

Les moteurs horizontaux : Le dernier constructeur en date, Mernack, (photo 2) a cessé son activité il y a une dizaine d'années. Il a en partie été repris par Engetherm. Ces moteurs de type locomotive fonctionnaient à relativement faible vitesse (100 à 250 tpm) et faible pression (8 à 10 bar) et étaient généralement constitués d'un seul cylindre.

De petites unités de 30 à 180 kW sont toujours fabriquées en Thaïlande. Dans ce cas, le moteur est situé en partie haute d'une chaudière à tube de fumées extrêmement simple (1 seul passage de fumées, sans faisceaux).

Deux volants d'inertie sont, de part et d'autre, solidaires du vilebrequin. La vapeur d'échappement est injectée dans la cheminée pour accélérer le tirage naturel. Le rendement de ce type d'installation est de l'ordre de 3% lorsqu'un combustible humide est utilisé, il peut atteindre 8% avec un combustible sec.

La pression de fonctionnement est généralement de 10 bars. La consommation de vapeur est élevée (12 à 15 kg/kWh).

Par rapport aux turbines à vapeur, le moteur présente plusieurs avantages en petite puissance :

- un rendement électrique plus élevé,
- une pression de vapeur d'admission, à performance équivalente, un peu inférieure,
- une vitesse de rotation de l'arbre moins élevée ce qui limite les coûts de maintenance. Ces coûts sont de l'ordre de 3% de l'investissement pour un fonctionnement de 5 000 h/an.

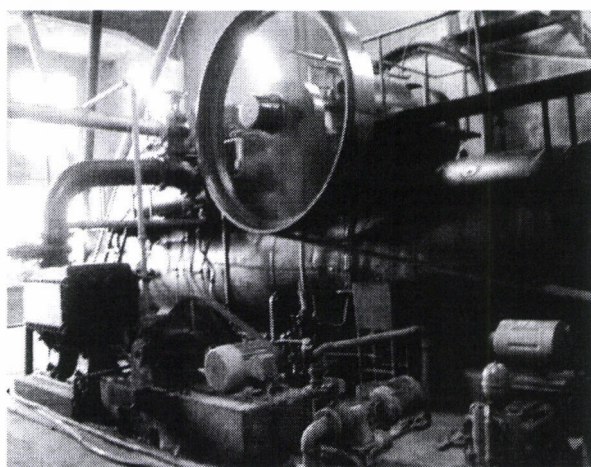


Photo 2 : Moteur Mernak (Bresil) en fonctionnement

Aspects économiques

Les performances techniques des installations de moteur à vapeur sont résumées dans le tableau 2.

Puissances électriques	30 – 1500 kWe
Pression de vapeur entrée	10 – 30 bars
Pression de vapeur sortie	0,5 – 1,5 bars
Vitesse de rotation	600 – 1000 tpm
Rendement électrique	10 à 20 %
Rendement thermique	55 à 60 %

Tableau 2 : Caractéristiques principales de moteurs à vapeurs

Les sociétés qui, au niveau mondial, proposent du matériel industriel sont très peu nombreuses et celles qui présentent de réelles références sont encore plus rares.

La Société Spilling en Allemagne qui fabrique et commercialise des moteurs à vapeur depuis plusieurs dizaines d'années possède des références dans de très nombreux pays (Congo, République centrafricaine, Madagascar,...) et en Europe avec une quinzaine d'installations en fonctionnement en Allemagne. Des travaux récents lui ont permis de développer un moteur sans lubrifiant avec des performances électriques garanties de 19%. L'inconvénient majeur de ce matériel réside dans son prix.

En PED, le moteur à vapeur Engetherm a été testé par le Cirad sur le site d'une coopérative, en condition réelle de fonctionnement. La pression de vapeur en entrée était comprise entre 15 et 17 bars pour une température variant de 200 à 280°C. La pression de sortie de la vapeur était toujours de 1 bar (100°C). Le débit de vapeur testé était compris entre 500 et 1100 kg/h. Les mesures ont principalement portées sur la partie moteur à vapeur et production d'électricité sans tenir compte des conditions de production de la vapeur. Dans nos conditions de mesure, la

puissance moteur calculée est comprise entre 15 et 90 kW. Le rendement électrique net est de 7 % avec une consommation spécifique de 18 kg vap./kWh. Le tableau 18 résume les tests réalisés. De façon générale, il ressort de ces tests que le moteur à vapeur Engetherm est un prototype qui fonctionne correctement sans souci important. La phase de démarrage est facile, la puissance est disponible en moins de 30 minutes et le fonctionnement en continu ne présente pas de difficultés importantes. Une personne ayant une formation minimale peut parfaitement contrôler l'installation.

Les niveaux d'investissement pour les moteurs avec l'alternateur, les périphériques et le raccordement sont à ce niveau extrêmement variable selon que l'on considère du matériel européen (600 à 900 €/kWe) ou brésilien (390 à 500 €/kWe).

Il y a relativement peu d'installations récentes en activité. Un travail effectué par Biomasse Normandie pour le compte de l'Ademe présente les résultats économiques de deux installations Spilling installées en Allemagne.

Nom de l'unité	Puissance installée MWe	mise en service	Rendement Electrique %	Pression Température	Invest. spécifique €/kWh	Coût entretien et maintenance (% invest.)
Assamstaat	0.25	1982	9.7	25 b 380°C	3480	3.5
Lohr	0.46	1964	10.6	29 b 350°C	2980	5.6

Données économiques d'installation Spilling en fonctionnant en cogénération en Allemagne (Biomasse Normandie, 2001)

Fiche technique et économique sur la gazéification

Aspects techniques

La gazéification consiste en une transformation thermique d'un solide combustible (charbon, coke, tourbe, bois...) en présence d'un composé gazeux (O_2 , air, CO_2 , vapeur d'eau...). Le but de cette transformation est de convertir le solide en un mélange gazeux combustible. Cette transformation met en jeu un ensemble de mécanismes thermochimiques, pyrolyse, oxydation et réduction, fortement couplés, qui conditionne le fonctionnement d'un procédé de gazéification et dont l'optimisation impose des contraintes technologiques dont certaines ne sont que partiellement levées à ce jour.

La gazéification se décrit comme une réaction hétérogène, c'est à dire une réaction de surface entre le carbone (C) contenu dans le solide et un gaz réactant qui peut être de la vapeur d'eau (H_2O) ou du dioxyde de carbone (CO_2). Ces deux réactions, (1) et (2), se produisent au niveau de la surface réactive totale de la particule, en fonction des propriétés de diffusion au cœur du solide et des cinétiques chimiques.



Sur le plan industriel, lorsque l'on parle de gazéification, l'objectif est donc de favoriser ces deux réactions (1) et (2), qui vont produire le gaz combustible. Pour ce faire, il faudra préalablement ou simultanément générer les éléments nécessaires à ces deux réactions, à savoir : le charbon très concentré en carbone, les réactants CO_2 et H_2O , ainsi qu'une quantité importante d'énergie le plus souvent par oxydation d'une fraction du carbone. Dans les procédés ces trois composantes sont produites par (cf. figure 1) :

- les réactions de pyrolyse qui permettent la production, très rapidement, de composés

hydrocarbonés gazeux, dès l'échauffement du combustible dans le réacteur,

- les réactions d'oxydation, homogène (phase gaz) et hétérogène (phase solide) plus ou moins complète et qui interviennent en présence d'oxygène comme classiquement en combustion.

Les produits hydrocarbonés lourds aussi appelés goudrons, nécessitent une attention particulière puisqu'ils sont généralement non complètement oxydés et qu'une partie d'entre eux, après des recombinaisons, se retrouvent dans les gaz et perturbent leur utilisation. Ils sont en effet responsables de l'encrassement des dispositifs avals du gazéifieur. L'élimination de ces goudrons, dans le procédé ou en aval de celui-ci, reste un des défis technologiques sur lequel portent aujourd'hui de nombreux travaux de recherche et développement.

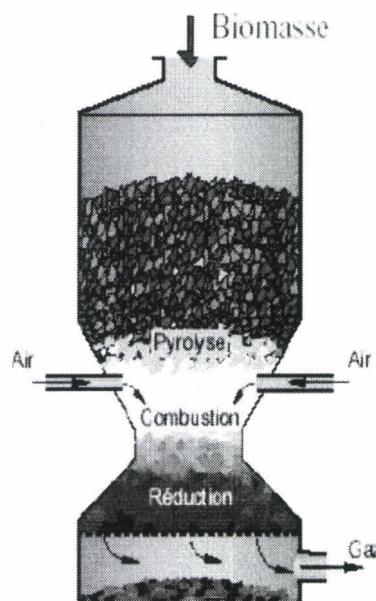


Figure 1: Principe de la gazéification en lit fixe

Lors de la gazéification, la partie organique du combustible est transformée principalement en monoxyde de carbone et en hydrogène. Ces

gaz contiennent aussi divers gaz inertes : vapeur d'eau, azote et dioxyde de carbone, en proportion variable en fonction des procédés et de la matière première ; ainsi que divers composés à l'état de traces, dont les proportions sont directement liées à la nature du combustible HCl, HF, NH₃, HCN, métaux lourds volatils à basses températures, etc.... Le pouvoir calorifique du gaz et sa composition sont fonction de la nature du combustible et du type de réacteur comme l'illustre le tableau ci-après.

Les gaz de gazéification sont chargés de nombreux éléments gênants (poussières, goudrons, alcalins, cendres, etc...) qu'il est nécessaire d'éliminer avant utilisation. Le lavage des gaz est une solution facile à mettre en œuvre. De l'eau pulvérisée est mise en contact avec le gaz et assure la condensation des goudrons. Ces derniers sont récupérés dans les eaux de lavage en sortie de la chambre de lavage. Si ces solutions sont réputées éprouvées, les problèmes rencontrés, notamment sur les petites installations,

montrent que l'efficacité de cette solution n'est pas aussi évidente et que de nombreux problèmes subsistent. La production d'eau polluée peut être importante, dans ce cas et son traitement, peut occasionner un coût important.

Si de nombreux concepts technologiques ont été développés pour des applications électriques en petite puissance, seules deux options sont techniquement matures.

Les fixes à tirages inversés. Cette configuration est généralement plus favorable à la production d'électricité de faible puissance avec un moteur thermique, du fait de la faible teneur des gaz en goudrons. La limite maximale en puissance se situe autour de 500 kg/h soit environ 500 kWe. Il s'agit en effet d'un compromis taille de particules/diamètre de la réduction du réacteur (cône) et qualité des échanges pour que n'apparaisse aucun point froid dans cette zone. Les réacteurs de gazéification en lit fixe à co-courant, malgré de faibles puissances, constituent une technologie attractive du fait de leur relative simplicité.

Gazéification à l'air		Lit fixe co-courant	Lit fixe contre-courant	Lit fluidisé circulant
Humidité biomasse	%mh ¹	6-20	n.d.	13 - 20
Particules	mg/Nm ³	100 - 8 000	100 - 3 000	8 000 - 100 000
Goudrons	mg/Nm ³	10 - 6 000	10 000 - 150 000	2 000 - 30 000
PCI du gaz	MJ/Nm ³	4.0 - 5.6	3.7 - 5.1	3.6 - 5.9
H ₂	% vol.	15 - 21	10 - 14	15 - 22
CO	% vol.	10 - 22	15 - 20	13 - 15
CO ₂	% vol.	11 - 13	8 - 10	13 - 15
CH ₄	% vol.	1 - 5	2 - 3	2 - 4
C _n H _m	% vol.	0.5 - 2	n.d.	0.1 - 1.2

Composition moyenne des gaz en fonction du type de procédé²

¹ Sur base humide

² Les valeurs pour les goudrons sont indicatives car aucune définition n'existe à ce jour

Si le taux de matières volatiles des charbons est bien maîtrisé et les températures de gazéification suffisantes, il n'y a plus de goudrons en aval.

Rappelons qu'un gaz chargé d'impuretés peut provoquer des altérations graves des pièces du moteur (corrosion des conduits de gaz, collage des soupapes, grippages des pistons,...).

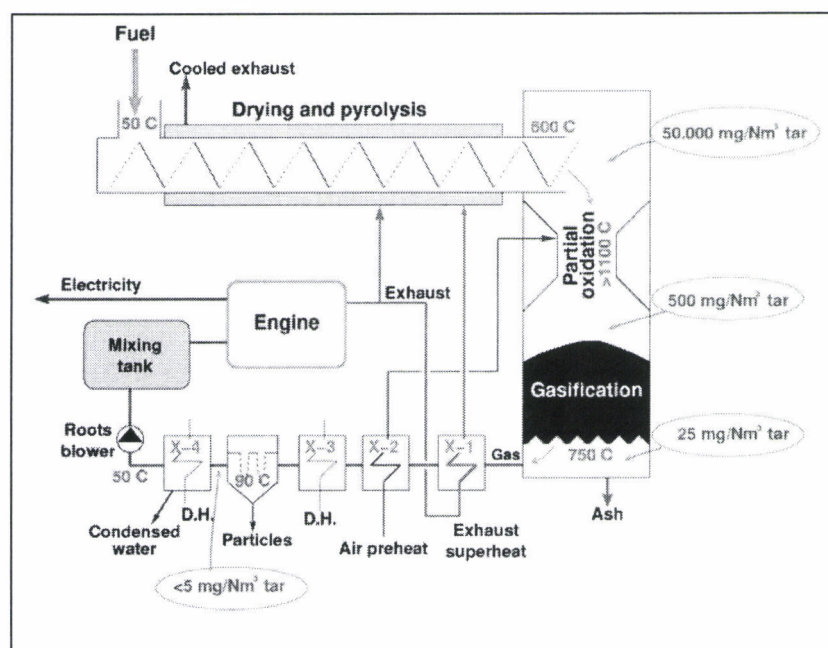


Figure 2: Schéma de principe du gazogène étagé développé par le DTU (B.Goebel, 2003)

Les groupes électrogènes moteurs combinent un moteur gaz ou diesel et un alternateur pour produire l'électricité. Les équipements de couplage au réseau sont maintenant fournis en standard et peuvent être conteneurisés. Ils comprennent, entre autre, un régulateur de tension, un contrôleur de facteur de charge pour les générateurs synchrones.

- un PCI faible de l'ordre de 4 MJ/kg, il est de 44 MJ/kg pour l'essence;
- une forte résistance à la détonation
- une combustion lente due à la faible proportion de composants combustibles dans le gaz
- un rapport de 1,3 kg d'air /kg de gaz (il est de 15 pour l'essence).

Les moteurs étant prévus initialement pour fonctionner avec des combustibles conventionnels, des modifications sont effectuées afin de les adapter aux caractéristiques du gaz qui sont :

Les groupes électrogènes moteurs sont des ensembles très compacts et modulaires disponibles sur une large gamme, de 5 kW à 5MW, avec des performances bien établies.

Les moteurs diesel "dualfuel" adaptés pour des puissances allant de 100 kW à plusieurs MW. Ces moteurs dérivent de moteur diesel à 4 temps de série industrielle à régime rapide (750 à 3000 t/mn) qui utilisent comme carburant un mélange de deux combustibles. Dans ce cas, un minimum de 70% de l'énergie, qui serait consommée par le moteur, est fourni par le gaz de gazéification. La plupart des constructeurs de moteurs diesel présentent des versions gaz en dual-fioul.

Les moteurs à gaz sont des moteurs à allumage commandé par étincelle électrique. Ils dérivent, la plupart du temps, de moteurs à **Aspects économiques**

essence, mais il existe une gamme industrielle dérivée de moteurs diesel modifiés. A cylindrées égales, les puissances de moteurs à gaz pauvre sont de l'ordre de 50% de celles des moteurs à essence et de 30% de celles des moteurs diesel non suralimentés. Ces moteurs sont conçus pour fonctionner avec des combustibles dont le PCI est compris entre 4 et 20MJ/Nm³.

Les rendements des moteurs qui peuvent atteindre 40%, se situent généralement aux alentours de 30 à 35%.

La figure 3 donne les plages de puissance escomptables en fonction du type de procédé mis en oeuvre.

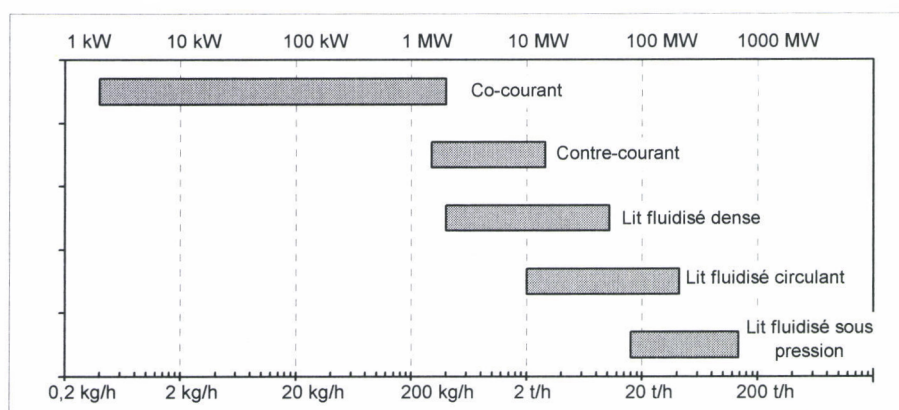


Figure 3 : Puissance envisageables en fonction du procédé de gazéification.

Si l'on exclut la multitude "d'industriels occasionnels", le nombre de fournisseurs susceptibles de garantir leur matériel est faible. Ceux disposant d'une expérience industrielle réelle sont encore plus rares. A ce niveau les établissements Martezo en France sont une exception. Il est regrettable que cette entreprise n'ait pas su capitaliser sur ce savoir faire pour faire évoluer son matériel.

On voit émerger aujourd'hui quelques constructeurs en Europe Xylowatt (BE) ou TKE (DK), dont la démarche est plus scientifique, à opposer aux initiatives des années 80 qui ont le plus souvent consisté à remettre au goût du jour les procédés issus des années 40.

Les matériels proposés restent néanmoins perfectibles et pour la quasi majorité d'entre eux, centrés sur des lits fixes à co-courant. Même si cette technologie permet de limiter le niveau de goudrons dans les gaz, lorsque le procédé est bien maîtrisé et la matière première adapté, elle est encore peu compatible avec une utilisation simple. Le recul industriel fait encore défaut compte tenu du faible nombre de réalisations existantes.

L'Inde mérite une attention particulière. En effet, elle mène depuis plusieurs années une politique incitative en faveur de la production d'électricité à partir de la gazéification de la biomasse qui commence à porter ses fruits et qui a vu l'émergence de plusieurs constructeurs dont une entreprise CICB qui a particulièrement retenu notre attention.

Les installations qui fonctionnent aujourd'hui ont des niveaux de puissance compris entre 100 et 400 kW. Il n'y a pas d'obstacle technique pour la mise en œuvre d'installations plus petites mais plutôt un obstacle économique (investissement et maintenance) qui fixe la taille minimale des installations à environ de 100 kW. Il y a, à notre sens, une puissance maximale qui ne pourra vraisemblablement pas être dépassée, elle est de 500 kWe et probablement de 400 kWe pour les installations à co-courant et de 1 MWe pour les lits étagés (bien qu'aucune installation de cette taille n'existe à ce jour).

Il existe peu de références qui présentent les performances d'installations, établies sur de longues périodes de fonctionnement. Pour les unités de 100 à 300 kW électriques, les rendements escomptables sur PCI sont :

- Rdt de gazéification : 70 – 80 %
- Rdt électrique : 15 – 20 %
- Rdt thermique (cogen.) : 35 – 50 %

Des rendements électriques supérieurs sont possibles lorsque l'ensemble des paramètres de fonctionnement sont au nominal. La consommation spécifique qui en résulte est alors comprise entre 1,2 et 1,7 kg de bois (17 000 kJ/kg) par kWh.

Sur le plan économique, tant que la mise en œuvre de séries suffisantes n'aura pas permis

de ramener les prix des équipements à un niveau satisfaisant, la filière n'est compétitive que pour les cas les plus favorables (matière première de qualité optimale et gratuite, durée de fonctionnement maximale,...).

Dans tous les cas, les groupes gazo-électrogènes exigeront des investissements lourds souvent d'un facteur 5 par rapport à un groupe diesel, du fait du faible pouvoir calorifique du gaz (moteur de grosse cylindrée), de la nécessité de traiter les gaz. Le tableau ci-dessous donne les ordres de grandeur des coûts d'investissements et de mise en œuvre.

Conclusion

La longue liste des opérations journalières de maintenance prévues sur un groupe électrogène (purgés divers, nettoyage filtres, vérifications des niveaux, ...) illustre bien la situation de cette technologie eu égard à sa mise en œuvre.

Cependant, les bons niveaux de rendements électriques escomptables, comparés aux autres solutions biomasse, et les progrès techniques en cours, rendent cette option réaliste notamment si le temps de fonctionnement est supérieur à 6000 heures par an.

Investissement €/kWe	Maintenance €/kWh	Coût moyen €/kWh	
		4 000 h	6 000 h
1700 à 3500	0.08 – 0.2	0.15 - 0.5	0.1 – 0.3

Fiche technique et économique sur les piles à combustible

Aspects techniques

La pile à combustible est un système de production d'électricité basé sur le principe inverse de l'électrolyse.

Une pile élémentaire est constituée de deux électrodes séparées par un électrolyte. L'hydrogène obtenu par reformage du gaz naturel par exemple réagit avec l'oxygène de l'air pour produire du courant électrique continu, en rejetant comme sous-produit de la chaleur et de l'eau selon le schéma simplifié de la figure 1.

Quand un électrolyte acide est utilisé, l'hydrogène se dissocie au niveau de l'anode pour former des ions hydrogène H^+ et un nombre équivalent d'électrons e^- . Les électrons voyagent à travers le fil conducteur et la charge externe pour arriver à la cathode où ils réagissent avec l'oxygène O_2 de l'air. L'électrolyte permet la diffusion d'un ion provenant de l'une des deux réactions. Enfin les ions hydrogènes et hydroxyles se combinent dans l'électrolyte pour former les molécules d'eau, donnant la réaction électrochimique globale suivante entre l'hydrogène et l'oxygène :



La conversion d'énergie par voie électrochimique dans les piles à combustibles se réalise à un niveau d'efficacité beaucoup plus élevé que celui de la combustion dans les machines thermiques traditionnelles, limitée par le cycle de Carnot. L'efficacité maximale théorique de la conversion d'énergie dans une pile à combustible est de 83%.

En pratique, les efficacités des piles à combustible utilisant l'hydrogène et l'oxygène purs peuvent atteindre 50% voire 60%.

Dans la pratique, le cœur ne peut fonctionner seul. Il faut lui adjoindre un circuit de combustible, un circuit de comburant, un

circuit de refroidissement, un contrôle commande et un onduleur. Ces circuits et périphériques sont consommateurs d'énergie et sont généralement alimentés par la pile elle-même, ce qui conduit à la diminution du rendement global de la pile.

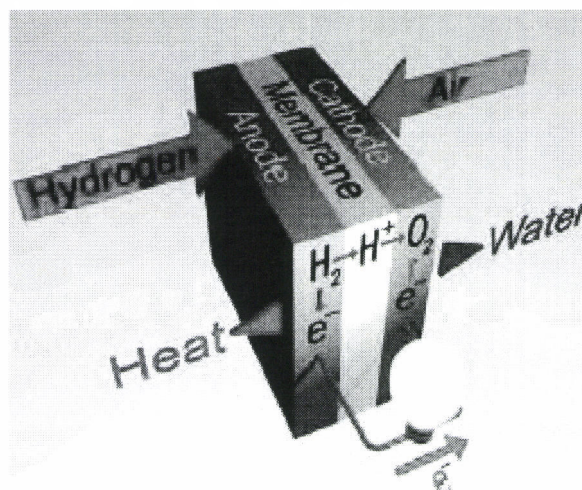


Figure 1 : schéma de fonctionnement d'un cœur de pile

On distingue plusieurs types de piles à combustible, généralement classées en cinq familles. Le classement correspond à une évolution historique des recherches sur les piles. Il repose sur les différents matériaux composant l'électrolyse ce qui revient également à classer les piles selon leur température de fonctionnement.

Compte tenu des températures de fonctionnement, on destine généralement les piles fonctionnant à haute température, Molten carbonate fuel cell (MCFC) et Solid oxide fuel cell (SOFC), à des applications stationnaires de production d'électricité et à la cogénération. Avec de tels systèmes, on atteint de hauts

rendements car la chaleur dégagée par la réaction électrochimique est exploitée. Plusieurs constructeurs dépassent 40% en rendement électrique (certains annonçant jusqu'à 55%) et atteignent près de 40% de rendement thermique portant ainsi le rendement global à près de 90%.

Les piles de type Proton exchange membrane fuel cell (PEVFC), fonctionnant à des températures généralement inférieures à 90°C, sont davantage destinées à des applications mobiles, transportables, aux unités de secours (groupes électrogènes) ou aux transports.

La pile ne rejète que de l'eau (voir réaction plus haut) et du dioxyde de carbone (au niveau du reformeur) et pas de polluants usuels tels que les oxydes d'azote (NOx) et les oxydes de soufre (SOx).

La pile à combustible a des performances supérieures à pratiquement tous les autres systèmes de production d'électricité (rendement électrique de 40 à 72% de l'énergie primaire). De plus, à partir d'une puissance de l'ordre de 200 kW, le rendement électrique reste constant. L'effet de taille n'ayant pas de rôle, les projets d'installations de faible puissance sont

favorisés car ils présentent comparativement des coûts d'investissement plus faibles.

Enfin, la pile à combustible possède un rendement électrique plus élevé à charge partielle qu'à pleine charge, ce qui permet un fonctionnement très souple et une réduction considérable des émissions par rapport à d'autres générateurs dont les performances chutent avec le facteur de charge.

Ces qualités, combinées avec un niveau très faible de bruit et de vibration dû à l'absence de grosses machines tournantes, favorisent la décentralisation des installations voire des applications individuelles.

Le tableau ci-après (Nguyen, 1997) donne une classification des différents types de piles à combustible, chacune étant définie par la nature de l'électrolyte et ses caractéristiques techniques. Les dates prévisionnelles de leur commercialisation sont également précisées.

Les piles à acide phosphorique (PAFC) et SOFC sont les plus matures industriellement. Quelques unités sont en démonstration en Europe.

Type	Pile polymère - (PEFC)	Pile à acide phosphorique - (PAFC)	Pile à carbonate fondu (MCFC)	Pile à électrolyte solide (SOFC)
Electrolyte	Membrane polymère	Acide phosphorique	Carbone fondu	Oxyde de zirconium
Ions actifs	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Température	80°C	200°C	600 - 700°C	700 - 850°C
Combustible	H_2	H_2	H_2, CO, H_n, C_m	H_2, CO, H_n, C_m
Combustible primaire	- Gaz naturel - Méthanol - Naphta - GPL - Huiles légères	- Gaz naturel - Méthanol - Naphta - GPL - Huiles légères	- Gaz naturel, Méthanol - Gaz de pétrole et de charbon - Biogaz	
Commercialisation	1998 Puissance 250 kW	1990 Puissance 200 kW	Après 2005	Après 2010 Puissance 7 kW
Rendement électrique	40%	> 40%	> 46%	> 50%

Tableau 1 : Les différents types de piles à combustible

Le combustible

La pile à combustible doit être alimentée avec de l'hydrogène. La production d'hydrogène renouvelable à partir de la gazéification de la biomasse présente donc un intérêt environnemental considérable vis à vis de l'effet de serre puisqu'il allie haute performance et caractère renouvelable.

Cependant, à ce jour, la solution la plus classique consiste en un reformage du gaz naturel produisant un gaz riche en hydrogène, qui peut être purifié.

Le système complet d'une pile à combustible, avec l'ensemble de ses accessoires, devient dès lors très complexe comme l'illustre la figure 2 ci-après.

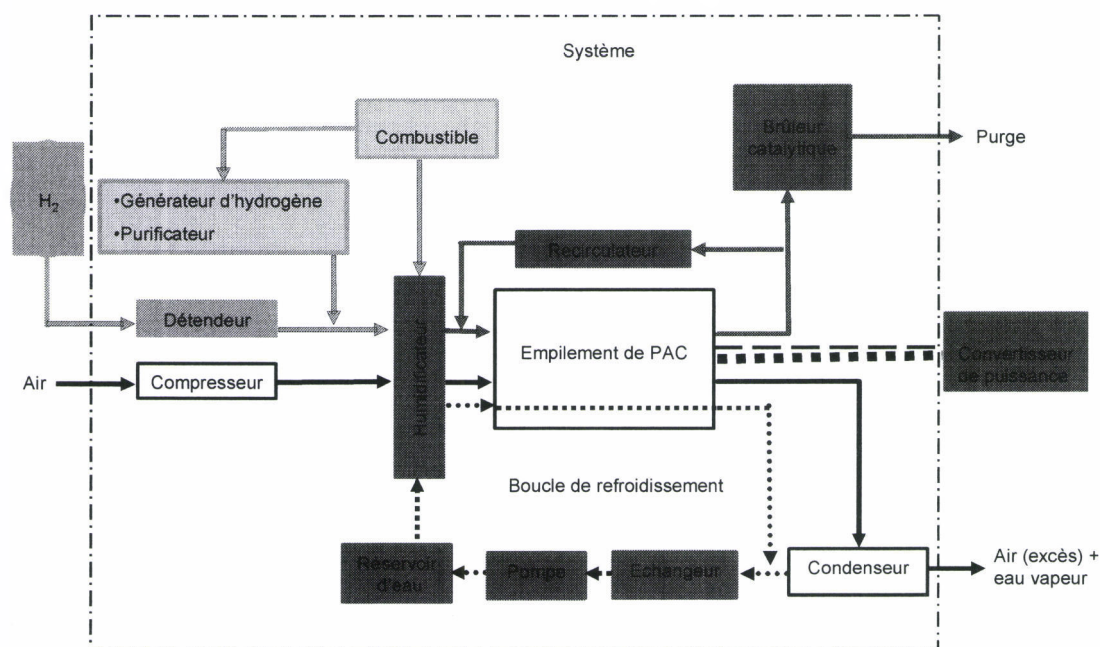


Figure 2: schéma de principe du système complet d'une pile à combustible

Aspects économiques

Les piles à combustible n'ont pas atteint le stade de la production en série et de la commercialisation. Les rares modèles aujourd'hui disponibles à la vente sont des unités pilotes qui permettent aux constructeurs, ainsi qu'aux exploitants, de recueillir des retours d'expérience sur ces systèmes, leur installation, leur coût

exploitation, de maintenance et les problèmes qui pourraient être liés à leur démantèlement.

Par nature, ces prototypes sont très coûteux comme l'illustre le tableau ci après établis sur la base du prix du gaz naturel à 1.9 €/kWh.

Investissement €/kWe	Maintenance €/kWh	Coût moyen €/kWh	
		4 000 h	8 000 h
5000 - 15000	0.5 – 5.0	14.5 – 19.5	9.0 – 11.5

Pour une installation stationnaire de production décentralisée d'énergie, les constructeurs se sont fixés un objectif : 1 000 à 1500 € par kilowatt installé. A ce jour, le coût avoisine plutôt 10 000 à 15 000 €/kW (il s'agit d'une moyenne, des variations parfois importantes étant relevées d'un constructeur à un autre).

Pour atteindre leur objectif, les constructeurs doivent optimiser les systèmes existants, réaliser des ruptures technologiques et fiabiliser l'ensemble de leurs systèmes.

Conclusion

Le très haut rendement des piles à combustible les rend particulièrement attractive dans un ensemble en génération d'électricité avec un générateur de gaz. Cependant, les travaux en sont à leur début et il est probable que le couplage gazéifieur/pile à combustion se heurte aux mêmes contraintes que pour la production d'électricité en moteur à combustion interne, à savoir, la qualité des gaz, et ce, avec une acuité encore plus élevée dans la mesure où même des pollutions à l'état de trace pourraient venir perturber le fonctionnement des catalyseurs. Aucun retour d'expérience n'est à ce jour disponible sur le sujet.