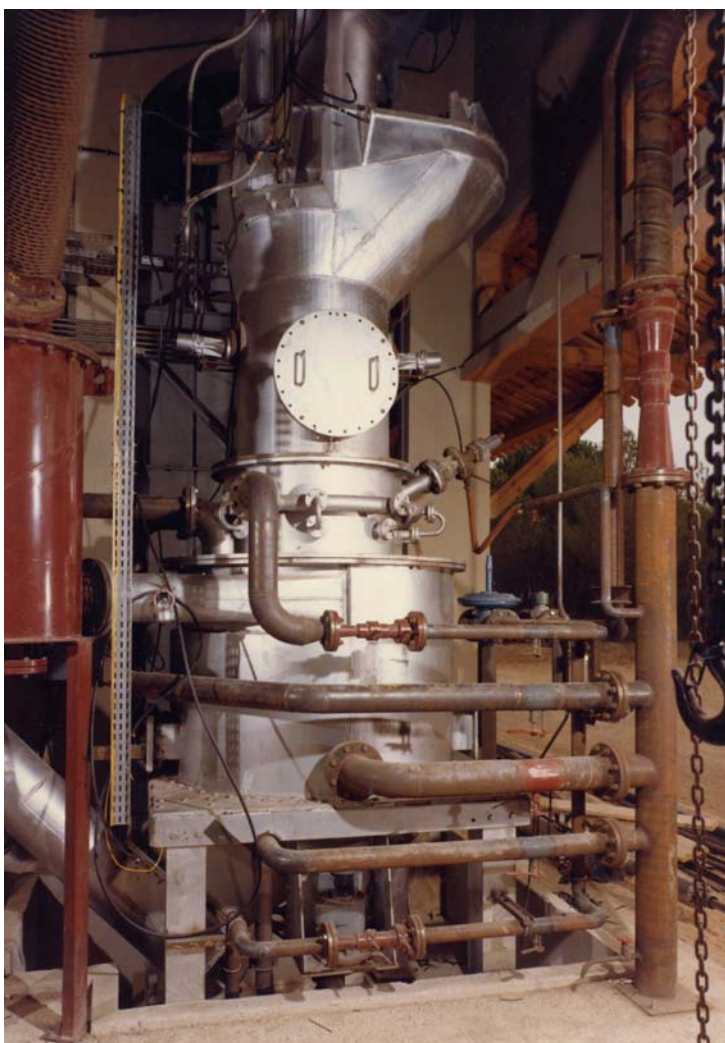


**ADEME**



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Centre d'Angers  
2 square Lafayette  
BP 406  
49004 ANGERS Cedex 01



# **PYROLYSE ET GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE POUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE**

**PROCEDES ET ACTEURS**

Octobre 2001



**OBSERVER**  
146 rue de l'Université  
75007 PARIS



**Cirad-Forêt**  
TA 10/16  
34398 MONTPELLIER Cedex 5

# SOMMAIRE

Synthèse.....	i
1 - Quelques rappels .....	2
1.1 - La biomasse.....	3
1.1.1 - Composition .....	3
1.1.2 - L'humidité .....	5
1.1.3 - Propriétés thermiques.....	5
1.1.4 - Pouvoir calorifique.....	6
1.1.5 - Caractéristiques physiques .....	6
1.1.6 - La mise en œuvre de la biomasse dans les procédés.....	7
1.1.7 - Disponibilité de la ressource .....	9
1.2 - Les différents procédés de conversion thermochimique de la biomasse .....	9
2 - La pyrolyse .....	11
2.1 - Introduction à la pyrolyse.....	11
2.2 - La pyrolyse rapide .....	11
2.3 - Les procédés de pyrolyse rapide .....	13
2.3.1 - Les procédés à lits fluidisés.....	13
2.3.2 - Les réacteurs ablatifs.....	14
2.3.3 -Les réacteurs à lits entraînés .....	14
2.3.4 - Les réacteurs à cône rotatif .....	14
2.3.5 - Les réacteurs de pyrolyse sous vide.....	15
2.4 - Les huiles de pyrolyse .....	15
2.4.1- Caractérisation des huiles de pyrolyse .....	16
2.4.2 - Applications pour les huiles de pyrolyse .....	17
2.5 - Analyse critique et recommandations .....	18

3 - La gazéification.....	23
3.1 - Les réactions chimiques de la gazéification .....	23
3.1.1. - Définitions .....	23
3.1.2 - Les principales réactions.....	24
3.2 - Nature des gaz produits.....	26
3.3 - Les différents types de procédés utilisés.....	27
3.3.1 - Procédés à lit fixe.....	27
3.3.2 - Procédé à lit fluidisé .....	29
3.4 – Analyse comparative des procédés .....	31
3.5 - Le traitement des gaz .....	36
3.5.1 – La séparation des particules ou poussières.....	36
3.5.2 – Elimination des goudrons.....	37
3.6 - Les applications de la gazéification .....	39
3.6.1 - La combustion directe.....	40
3.6.2 - La combustion dans les moteurs.....	40
3.6.3 - Les turbines à gaz .....	41
3.7 – Analyse critique et recommandations .....	45

**Photo page de couverture :**

Gazogène à co-courant PILLARD (Installation de Porquerolles - 130 kVA)

Les points de vue exprimés dans ce rapport sont ceux de l'expert seul, il ne saurait engager ni le gouvernement français, ni l'Ademe.

## SYNTHESE

Compte tenu de l'augmentation de l'impact sur l'environnement de l'accroissement de l'activité humaine, les énergies renouvelables sont d'une importance croissante d'un point de vue environnemental en substitution des énergies fossiles. La France, dans le contexte européen, a intégré cette dimension dans sa stratégie énergétique et se propose d'accroître significativement la part de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable d'ici 2010. La biomasse qui représente le gisement le plus important devrait à terme jouer un rôle important dans cette stratégie. Dans ce contexte, la pyrolyse et la gazéification sont deux options techniques qui permettraient de transformer la biomasse en vecteurs énergétiques plus ou moins directement convertissable en électricité.

Les technologies qui se sont développées sur la base de ces filières depuis plusieurs dizaines d'années ont atteint un niveau de maturité différent mais qui, pour certaines d'entre elles, est cependant suffisant pour que des pays européens, notamment les pays scandinaves, ou l'Angleterre, s'engagent dans des projets industriels. La France qui fut un des pays leader dans ce domaine dans les années 80, est aujourd'hui pratiquement totalement absente du concert international.

Cette démarche a conduit l'Ademe à confier au groupement Observer-Cirad la tâche d'analyser les possibilités d'avenir de ces technologies en France.

Ce travail comprend trois étapes :

- Technologies et Acteurs qui a pour objectif de mettre en perspective l'état de l'art sur la pyrolyse et la gazéification de la biomasse et les stratégies des opérateurs.
- Obstacles et opportunités techniques, économiques et politiques afin de préciser les conditions de leur insertion en France.
- Identification et proposition d'une stratégie française.

Le présent document rapporte de la première étape de ce travail. Il met en évidence :

### **A - Au niveau de la pyrolyse**

**A1** - Aujourd'hui, la grande majorité des unités de pyrolyse flash, dont l'objectif est la production de liquide, est développée dans le cadre d'unités de R&D. Toutefois, ENSYN a démontré la faisabilité industrielle de ses unités aux USA, mais il est vrai dans un contexte très spécifique. Les informations disponibles sur cette installation et ses performances réelles sont quasi inexistantes.

**A2** - La pyrolyse rapide présente deux avantages principaux par rapport aux autres voies de conversion thermo-chimiques de la biomasse.

- Le premier, le plus important, concerne le découplage possible entre la production et l'utilisation. En effet il est possible d'implanter une unité de production dans une zone où la ressource est abondante afin de minimiser les coûts de transport de la matière première et de bénéficier de l'effet d'échelle sur les investissements. Les huiles sont ensuite transportées aisément vers les lieux d'utilisation. Cet avantage joue peu en France, comparativement aux pays scandinaves par exemple, mais peut être non négligeable

surtout si les externalités du projet de l'unité sont prises en compte dans le calcul économique.

- Le deuxième avantage concerne la spécificité de ces huiles qui les rendent potentiellement substituables au carburant dans les transports. Cependant l'obtention d'un carburant directement utilisable à la pompe reste aujourd'hui une utopie, compte tenu des coûts de raffinage.

**A3** - Au niveau technologique les procédés qui sont proposés par les quelques fournisseurs ont atteint un niveau de maturité qui permet d'envisager leur démonstration industrielle. Les différentes solutions sont toutefois très proches les unes des autres en terme de rendement et de qualité d'huile. Si le nombre de réalisations reste encore faible dans le monde, notamment en ce qui concerne les réalisations industrielles, le procédé en lui même n'est pas en cause. Le manque de débouché pour les huiles du fait de leur grande hétérogénéité constituent certainement le principal handicap.

**A4** - Les problèmes qui restent à résoudre sont encore nombreux et tiennent essentiellement aux caractéristiques physico-chimiques des huiles et de leur extrême variabilité en fonction des procédés et des matières premières. Les perspectives d'aboutir à une maîtrise de procédé suffisamment fine pour orienter la réaction vers une composition définie sont, à notre sens, extrêmement faibles du fait de la complexité des réactions mises en œuvre et de la variabilité de la matière première. De même, la fraction solide contenue dans les huiles (sable de fluidisation, cendres et fines de charbon) est encore très problématique pour toutes les applications énergétiques.

**A5** - En terme d'application, les premiers essais réalisés sur des moteurs pour la génération d'électricité ont montré que moyennant des modifications mineures, ces derniers étaient susceptibles de fonctionner convenablement avec des huiles de pyrolyse. Cette application est certainement la plus prometteuse pour une application énergétique la pyrolyse. La covalorisation chimique et énergétique qui est souvent présentée comme la solution devant permettre de rentabiliser les installations, grâce à la forte valeur ajoutée escomptable sur certaine molécules, est à abandonner. En effet, d'une part, les marchés concernés sont des marchés de niche et une seule installation serait en mesure de saturer le marché mondial, du moins à des niveaux de prix attractifs. Ensuite, ce marché est déjà pour une part satisfait par des procédés plus conventionnels. Enfin, la stabilité des huiles est fortement altérée par les traitements, au point de nécessiter une utilisation immédiate. La pyrolyse perd dans ce cas l'un de ses atouts majeurs si les huiles, après récupération d'une fraction de produits chimiques, ne peuvent pas être transportée.

**A6** - Même si la pyrolyse, pour des applications énergétiques, ne va pas déboucher dans un avenir immédiat au niveau européen, une activité de recherche fondamentale dans ce domaine doit être maintenue et faire l'objet d'un soutien financier national minimum qui permette aux équipes actives de s'insérer dans les travaux menés au niveau international. Il convient, en effet, de ne pas oublier que la pyrolyse est la première étape de toute conversion thermo-chimique et que de fait, pour une part significative, elle conditionne les performances et l'impact sur l'environnement des procédés thermiques. Tout progrès réalisé dans ce domaine est, à priori, utilisable en gazéification et en combustion. Le renforcement des mesures environnementales milite dans ce sens, notamment pour accroître les performances environnementales des applications petites puissances de la combustion.

## **B - Au niveau de la gazéification**

**B1** - Les techniques de gazéification de la biomasse sont à la fois complexes et variées, elles font appel à un savoir faire qui ne s'improvise pas et qui manque encore de recul à la fois sur le plan scientifique et technique. Les principales difficultés rencontrées résultent directement des propriétés du combustible à savoir les biomasses. Cependant, la technologie de gazéification offre l'opportunité d'utiliser les équipements modernes de production d'électricité tels que les turbines à gaz pour la cogénération de chaleur et d'électricité infiniment plus performantes que les solutions traditionnelles peu efficaces issues des cycles à vapeur. Ses principaux avantages peuvent être résumés ainsi :

- rendement électrique élevé avec les turbines à gaz et les moteurs, même sur de petites puissances Cette amélioration des rendements permet une augmentation de tailles des installations biomasse sans accroître le rayon d'approvisionnement ce qui a un impact significatif sur les coûts d'investissements et d'approvisionnement.
- potentiel important d'utilisation en cogénération lié aux faibles puissances relatives des installations qui peuvent mieux s'adapter à la demande vapeur. Le marché en Europe, mais surtout en milieu tropical, est considérable.
- diminution significative des coûts de réduction des émissions du fait des faibles volumes de gaz mis en jeu par rapport à la combustion. La gazéification est une technique d'autant plus intéressante que l'on attache un grand intérêt aux problèmes de pollution et d'environnement. En effet, au delà de l'aspect substitution, avec ces procédés il est possible de mieux contrôler les émissions. Ensuite, le rendement électrique de la cogénération en cycle combiné pour les installations pre-industrielles actuelles rend la filière infiniment plus performante que la solution traditionnelle de production de chaleur et d'électricité par combustion directe.

**B2** - Le nombre d'installations existantes, tous combustibles confondus, montre bien le niveau de maturité incontestable de la technologie de gazéification, mais ne doit cependant pas faire oublier que ces installations ne concernent que faiblement des unités biomasse. Il convient de distinguer au niveau de la gazéification de la biomasse, les installations et procédés de petite et grosse puissance.

## **C - Installation de petite puissance (< 0,2 MWth)**

**C1** - Le nombre d'acteurs est fort limité. Si l'on exclu la multitude "d'industriels occasionnels", le nombre de fournisseurs susceptibles de garantir leur matériel est extrêmement limité. Ceux disposant d'une réelle expérience industrielle sont encore plus rares et à ce niveau les établissements Martezo en France sont vraiment une exception.

**C2** - Les procédés proposés restent 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 incompatible avec une utilisation fiable et simple de moteur pour la production d'électricité. Le recul industriel fait, de plus, encore défaut compte tenu du faible nombre de réalisations existantes.

**C3** - Il nous semble qu'à ce niveau il est nécessaire de revisiter l'approche technologique et d'apporter des solutions réellement innovantes susceptibles de fiabiliser la technologie. De plus, à quelques exceptions près, (BTG, UCL,...), les centres de recherches actifs en gazéification se concentrent beaucoup plus sur les lits fluidisés, laissant supposer que le lit fixe a atteint un bon degré de maturité. Il n'en est malheureusement rien au regard du faible nombre d'unités en fonctionnement dans le monde.

**C4** - Le marché de ces installations semble malgré tout plutôt orienté export (pays tropicaux notamment) que réellement hexagonal.

## **D - Installation de grande puissance > 5 MWth**

**D1** - Les succès rencontrés au niveau des lits fixes concernent essentiellement les installations thermiques, en Finlande et au Danemark pour ne citer qu'elles.

**D2** - Après quelques 30 ans, la gazéification de la biomasse en lit fluidisé a atteint un niveau technologique satisfaisant. L'unité de VARNEMO en Suède (6 MWe + 9 MWth) sur la base de la technologie Foster Wheeler en cycle combiné a largement contribué à crédibiliser la filière après quelques milliers d'heures de fonctionnement et beaucoup de difficultés, il faut l'avouer.

**D3 - La co-gazéification** a démontré sa faisabilité et son intérêt sur les projets autrichiens de Zeltweg (10 MWth) avec Austrian Energy et finlandais de Lahti (60 MWth) avec Foster Wheeler. Tous les deux sur la base de lit fluidisé circulant. Des progrès significatifs ont également été accompli sur le procédé Batelle au niveau de l'installation de Burlington (60 MWth) dans le Vermont, USA. Cependant, compte tenu de la nature des centrales à charbon d'EDF (fonctionnement en pointe) la co-gazéification ne semble pas avoir d'avenir immédiat en France.

**D4 - Pour la production d'électricité**, si la solution IGCC est perçue comme le concept idéal à partir de la biomasse, son développement et sa mise en œuvre reste cependant complexe dans le mesure où elle implique la maîtrise d'un ensemble d'équipements, depuis la préparation du combustible, jusqu'à la génération d'électricité. Elle est cependant maîtrisée par LURGI, TEXACO et SHELL sur la base de lignite, de charbon ou de résidus de pétrole qui ne sont pas réputées être des combustibles faciles. Les obstacles de la biomasse sont donc bien avant tout économiques.

**D5** - Cependant, la démonstration industrielle de la gazéification de la biomasse en grosse puissance reste à réaliser mais les perspectives sont très prometteuses pour autant que les quelques verrous technologiques soient levés.

**D6** - Si l'on considère le niveau actuel de la technologie, il est clair que la démonstration industrielle de la gazéification doit être achevée pour permettre à cette technologie d'émerger dans un marché porteur. Cependant il est clair aussi que le niveau actuel de connaissance scientifique sur les procédés et le traitement des gaz (totalement lié dans notre esprit) sont insuffisants. Si l'ensemble des problèmes qui se pose au niveau du traitement des gaz dispose de solutions techniques (cyclone, filtre haute et basse température, lavage) leur mise en œuvre en série augmentent les risques et les causes d'arrêt ainsi que les coûts de fonctionnement. Il est donc nécessaire de lever le verrou qualité des gaz à trois niveaux :

- **Elimination des goudrons** avec :
  - une réflexion est à mener sur la conception et les choix techniques en petite puissance afin de minimiser la production de goudrons et la taille des installations de traitement des gaz pour une application moteur. La gazéification étagée devrait offrir des perspectives intéressantes à ce niveau.
  - Des travaux sur le craquage thermique associé ou non au craquage catalytique pour les grosses puissances. Il est en effet surprenant que l'ensemble des efforts se concentrent sur la réaction hétérogène (gaz solide) alors que la première étape du processus thermochimique : la pyrolyse, permet de convertir la biomasse en gaz et cela majoritairement.
  
- **Elimination des poussières.** Différentes options ont été testées pour la filtration à chaud (IGCC). Si les premiers résultats sur l'unité de VARNEMO sur les filtres métalliques ont montré leur intérêt, des travaux seront cependant nécessaires pour fiabiliser les installations au niveau industriel.
  
- **Traitement des produits alcalins.** Pour les applications turbine, cet aspect est primordiale de même qu'il serait souhaitable pour des raisons de rendement (1 à 2 points sont en jeu) de limiter au maximum le refroidissement des gaz avant combustion et pour cela la compréhension de leur formation et de leur élimination.

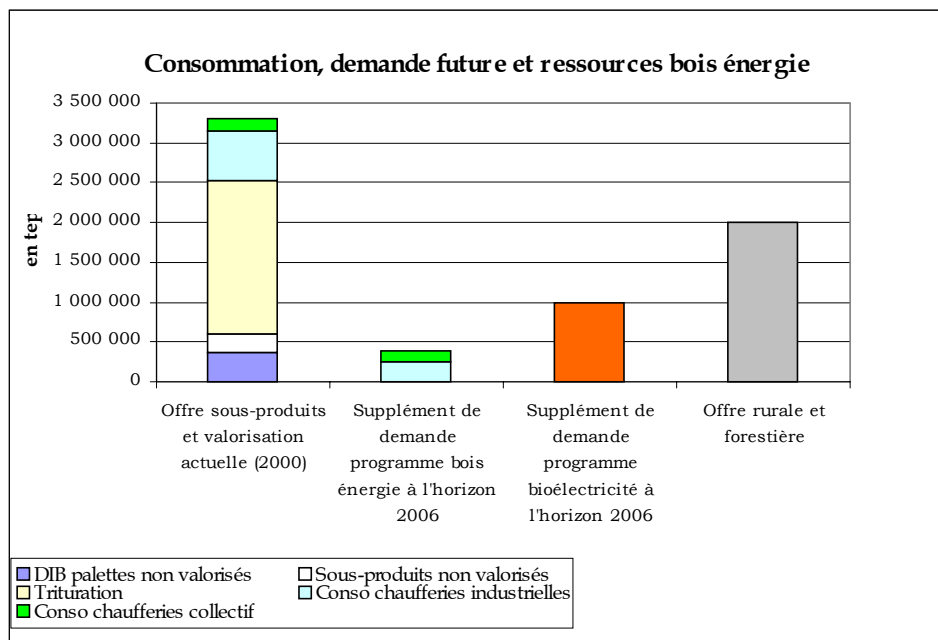
**D7** - Enfin, il apparaît important d'élargir la gamme des matières premières utilisables notamment vers les déchets pour lesquels les problèmes énoncé précédemment en matière de qualité de gaz seront encore plus important, notamment du fait d'un taux de cendre beaucoup plus élevé et plus complexe. A ce niveau, l'optimisation de procédés adaptés de la pyrolyse nous semble la voie la plus intéressante, sauf à accepter des rendements moindres sur des installations poly-combustibles, la recherche se doit, à ce niveau, de sortir des sentiers battus et les choix techniques qui prévalent depuis une trentaine d'années doivent être remis en cause. Nous pensons réellement qu'il y a des possibilités d'innovation techniques sur la base d'un certain nombre d'acquis, notamment en France, si les financements sont mis à disposition des industriels et des universitaires dans le cadre d'actions concertées.



# 1 - QUELQUES RAPPELS

Les énergies renouvelables utilisent des sources inépuisables d'énergies d'origine naturelle : rayonnement solaire, vent, cycles de l'eau et du carbone dans la biosphère, flux de chaleur internes de la Terre, effet de l'attraction lunaire et solaire sur les océans. Elles s'opposent ainsi aux énergies fossiles, dont les stocks forcément limités se sont constitués lors de la formation du système solaire (uranium, thorium), ou, au cours des âges géologiques, à partir d'une fraction infime de la biomasse terrestre qui a pu se fossiliser (charbon, pétrole, gaz naturel).

Compte tenu de l'augmentation de l'impact sur l'environnement de l'accroissement de l'activité humaine, les énergies renouvelables sont d'une importance croissante d'un point de vue environnemental en substitution des énergies fossiles. La France, dans le contexte européen, a intégré cette dimension dans sa stratégie énergétique et se propose d'accroître significativement la part de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable d'ici 2010 . La biomasse qui représente le gisement le plus important devrait à terme jouer un rôle important dans cette stratégie.



**Figure 1 :** Consommation, demande future et ressources bois énergie  
 (Source Ademe 2001 - pm.: Bois de feu = 8 Mtep - Paille non valorisée = 3.5 Mtep  
 Bois démolition/déchetterie = 0.7 Mtep)

La figure 1 présente la situation actuelle et future en terme de demande et de ressources bio-énergie en France. Ce tableau met en évidence l'importance de l'utilisation du bois énergie en France à ce jour et apporte un éclairage particulièrement important en ce qui concerne les usages et surtout la disponibilité en ressource. Ainsi, il apparaît assez clairement que le supplément de demande induit par le plan bois énergie de l'Ademe devrait engendrer une croissance de même ordre de grandeur que le volume DIB et connexe non valorisé. Cette situation implique naturellement que la quasi totalité de cette ressource sera utilisée par les chaufferies.

Les projections (2006) font état de 1 Mtep concerné pour la production d'électricité. Cette demande ne pourra être satisfaite que par la ressource forestière (environ 2 Mtep mobilisables). Cette situation est très importante en terme économique pour les conséquences qu'elle entraîne au niveau de stratégie et de choix technologique. Les plaquettes forestières sont en effet 2 à 3 fois plus chères que les produits connexes. Par contre, la nature de cette ressource étant beaucoup moins diffuse, elle permet d'espérer des capacités installées plus importantes et donc des gains sur les taux d'intérêts (effet d'échelle).

## **1.1 - La biomasse**

La biomasse est une matière première qui présente des spécificités qu'il convient de rappeler ici dans la mesure où elles auront des conséquences sur les procédés.

Selon le Larousse, la biomasse est la "masse totale des êtres vivants subsistant en équilibre sur une surface donnée du sol ou dans un volume donné d'eau océanique ou douce". Il est important de signaler que dans le domaine énergétique cette définition est beaucoup moins restrictive voire même n'est pas appliquée de la même manière dans les différents pays européens. Ainsi, sous le terme biomasse peuvent être cités en plus des produits d'origine végétale et animale, des boues de station d'épuration, des déchets ménagers,... Pour notre part, l'emploi de ce terme dans ce document ne concernera que les produits d'origine végétale non contaminés tel que retenu à ce jour par le Comité de normalisation européen "bio combustible" à savoir :

- déchets végétaux agricoles et forestiers ;
- déchets végétaux provenant du secteur de la transformation alimentaire,
- déchets de bois, à l'exception des déchets de bois qui sont susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds à la suite d'un traitement avec des conservateurs du bois ou du placement d'un revêtement y compris en particulier les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition ;
- déchets de liège .

### **1.1.1 - Composition**

La biomasse est principalement composée de carbone (C), d'oxygène (O), d'hydrogène (H) mais également d'azote (N) et de matières minérales (MM), appelées cendres. Si la composition en C, H, O, N est assez constante entre les biomasses, par compte, le pourcentage et la nature des cendres peut varier dans de grandes proportions comme le montrent les tableaux 1 et 2 ci-dessous. Les sous produits agricoles et herbacés ont plutôt un taux de cendres élevé par rapport au bois.

Composition en % (massique)		C <sup>1</sup>	H <sup>(1)</sup>	O <sup>(1)</sup>	N <sup>(1)</sup>	MM <sup>2</sup>
Feuillus	Moyenne	51.0	6.07	42.5	0.37	2.5
	Ecart	4	7	6	116	175
Résineux	Moyenne	50.8	6.06	42.7	0.36	2.3
	Ecart	4	7	5	112	174
Pailles	Moyenne	48.9	5.97	43.9	0.82	7.3
	Ecart	4	8	6	69	67
Balles de riz	Moyenne	48.2	6.48	45.1	1.19	15.8
	Ecart	6	12	8	90	104
Bagasse	Moyenne	53.1	6.03	38.7	1.25	9.3
	Ecart	13	7	17	112	126
Tiges de coton	Moyenne	49.5	5.8	43.8	1.17	8.5
	Ecart	6	8	8	37	69

**Tableau 1** : Composition de quelques biomasses végétales (source ECN)

Comparativement aux principaux combustibles d'origine fossile, les teneurs importantes en oxygène et en azote des biomasses ont la particularité d'affecter négativement leur pouvoir calorifique. En outre, lors de la pyrolyse, l'oxygène de la biomasse se retrouve pratiquement intégralement dans les huiles, limitant de fait leur qualité pour une utilisation comme carburant moteur. L'azote quant à lui peut induire des niveaux de NO<sub>x</sub> dans les fumées de combustion supérieure aux normes tolérées, mais c'est surtout la composition des cendres de biomasse qui peut être à l'origine des plus fortes contraintes. Ainsi, particulièrement pour des produits ligneux autres que le bois, les cendres de biomasse contiennent de nombreux minéraux, plus ou moins volatils selon les niveaux de températures des traitements, qui peuvent se retrouver dans les fumées. C'est le cas notamment des produits dérivés du chlore. Ces produits outre les problèmes d'émissions peuvent être à l'origine de corrosions importantes et d'attaque des parties métalliques et des réfractaires. Enfin la présence en abondance des produits alcalins dans ces cendres abaisse considérablement le point de fusion de ces dernières et est à l'origine de dépôts dans les réacteurs ou sur les tubes de fumées des chaudières, par exemple, voire du blocage de grille dans les foyers par suite de formation de cendres agglomérées. Ces aspects ont été longtemps sous estimés et font aujourd'hui l'objet de plusieurs travaux au niveau européen.

mg/MJ	Si	K	S	Cl
Pailles de céréales	50 - 800	100 - 1100	50 - 100	50 - 620
Feuillus - copeaux	50 - 600	25 - 200	0 - 50	0 - 50

**Tableau 2** : Comparaison des variations de concentration en principaux éléments constitutants des cendres entre le bois et la paille (mg/MJ PCI)

En ce qui concerne les principaux constituants organiques de la biomasse : cellulose, lignine et hémicellulose dont la proportion peut être extrêmement variable en fonction de l'espèce végétale, de l'âge et des conditions de croissance, seule la lignine pose quelques problèmes lors des réactions de conversion thermo-chimique. En effet, composé le plus stable thermiquement (même si sa décomposition thermique démarre plus tôt que la cellulose) la

<sup>1</sup> en % de la fraction organique totale

<sup>2</sup> en % de la matière sèche

lignine est à l'origine des fractions les plus lourdes dans les huiles de pyrolyse et des goudrons qui polluent les gaz de gazéification.

Il est enfin intéressant de signaler que la biomasse contient généralement peu de soufre et que le rapport H/C est meilleur que pour certaines combustions fossiles.

### **1.1.2 - L'humidité**

La biomasse se caractérise également par une teneur en eau, ou humidité, importante et extrêmement variable dans le temps. Cette humidité s'exprime par le rapport masse d'eau par masse de produit brut<sup>3</sup>. Après leur récolte, les matières végétales non ligneuses ont généralement un taux d'humidité très élevé, jusqu'à 95% sur brut. Cette humidité présente plusieurs inconvénients :

- au delà de 60 % sur brut la combustibilité de la biomasse est quasi nulle et le séchage est indispensable,
- elle affecte négativement le rendement énergétique de toute transformation thermochimique,
- elle augmente le coût de transport.

Le séchage de la biomasse est une étape coûteuse, en terme à la fois d'investissement mais aussi de coût de fonctionnement.

Lors des réactions de conversion, au delà des aspects purement énergétiques liés à la vaporisation, la présence d'eau dans le combustible présente deux inconvénients principaux : limitation des transferts de chaleur dans le solide et présence de vapeur d'eau ou de condensats (selon le niveau de température dans la phase gazeuse) dans les produits obtenus.

Ainsi, pyrolyse et gazéification nécessitent des humidités ne dépassant généralement pas 15% sur brut.

### **1.1.3 - Propriétés thermiques**

Au fur et à mesure que la température augmente dans le réacteur, le bois subit différentes transformations dont la première concerne l'évaporation de l'eau, suivie de la pyrolyse et l'oxydation. Ces différentes étapes font intervenir des phénomènes de transfert de chaleur au sein du solide qui sont directement fonctions de la conductivité thermique du matériau (exprimé en  $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ).

Le bois est connu pour être un mauvais conducteur de chaleur du fait de la forte porosité du matériau et du nombre peu élevé d'électrons libres susceptibles d'être délocalisés. De nombreux facteurs influencent la conductivité thermique du bois. Les plus importants sont la direction du flux de chaleur par rapport à l'orientation des fibres, la nature de l'essence, l'humidité, la densité et la structure du bois.

La conductivité du bois est fortement anisotrope et la conductivité dans le sens des fibres vaut environ 2.5 fois la conductivité dans le sens perpendiculaire.

---

<sup>3</sup> dans le domaine des industries du bois il est courant d'exprimer l'humidité sur sec par le rapport masse d'eau par masse de produit anhydre.

La valeur moyenne dans le sens des fibres est d'environ  $0.23 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Cependant, suivant le type d'essence utilisée la conductivité thermique du bois varie légèrement comme l'illustre le tableau 3.

Bois	Conductivité thermique (W /m °C)
Feuillus lourds	0,290
Feuillus mi-lourds (chêne, hêtre dur, frêne...)	0,230
Feuillus légers (bouleau, chêne, érable, hêtre tendre...)	0,150
Résineux mi-lourds (pin sylvestre, pin maritime...)	0,150
Résineux légers (sapin, épicéa...)	0,120
Feuillus très légers (peuplier...)	0,120
Balsa	0,054

**Tableau 3 :** Conductivité thermique longitudinale du bois selon le CTBA

La conductivité thermique du bois dépend de l'humidité (Maclean). De nombreuses études ont été menées afin de proposer des relations empiriques entre ces deux paramètres. Dans tous les cas, la conductivité thermique du bois augmente avec la teneur en eau. D'autre part, pour une même teneur en eau, la conductivité thermique augmente avec la masse volumique. Et enfin les transferts de chaleur au sein du bois sont fonction de la taille des morceaux présents dans le foyer. Plus les échantillons sont volumineux et plus lents vont être les transferts de chaleur dans le matériau.

### 1.1.4 - Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique, ou contenu énergétique d'un corps, exprimé en kJ/kg, est fonction de l'humidité de la matière première. Plus cette dernière est élevée, plus ce pouvoir calorifique est faible. Le taux d'humidité doit donc toujours être associé à cette valeur.

Pour une biomasse sèche, le pouvoir calorifique varie très peu d'une matière première à une autre. Seuls les produits très cendreuse présentent un pouvoir calorifique qui chute proportionnellement au taux de matières minérales.

Une valeur de 18 000 kJ/kg pour les biomasses anhydres ayant moins de 1% de cendres peut être considérée comme une moyenne.



**Photo 1:** Pailles, balles de riz, morceaux de bois et écorces

### 1.1.5 - Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques de la biomasse telles que la masse volumique et la granulométrie sont très importantes pour les procédés thermo-chimiques.

La masse volumique est d'une extrême variabilité, de quelques dizaines de kilogrammes par mètre cube apparent pour les biomasses herbacées (photo 1), à près d'une tonne pour certains bois tropicaux. Mais cette valeur varie également pour un même produit en fonction de la taille des particules et de leur conformation.



Ainsi, sous forme de sciures, de plaquettes ou de rondins, la masse volumique d'une même espèce forestière peut varier du simple au double (photo 2).

**Photo 2:** Chutes d'éboutage

### 1.1.6 - La mise en œuvre de la biomasse dans les procédés

Sauf à présenter une granulométrie relativement homogène et une masse volumique appropriée, le pré-conditionnement des biomasses, est nécessaire. Un complexe utilisant la "biomasse" comme combustible comporte :

- un système de déchargement
- un système de broyage (voire deux)
- un séchoir
- des volumes de stockage
- un système d'extraction
- un système de transfert et d'alimentation
- une unité de conversion thermique et électrique
- une unité de traitement des gaz comprenant au minimum un dépoussiéreur
- un système de transfert des cendres
- un stockage de cendres.

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte lors de la phase de conception des installations, à savoir :

- la nature du combustible (humidité, granulométrie, propriétés colmatantes, masse volumique, température...),
- le mode de livraison du combustible (route, petit porteur de 40m<sup>3</sup>, gros porteur de 70m<sup>3</sup>, le rail,...),
- les fréquences de livraisons maxi (pas de livraisons de week end, les ponts) et mini. (2 rotations successives, etc...),
- l'autonomie minimale des stockages,
- le degré d'automatisme requis,
- l'environnement : constructions existantes, moyens d'accès, rejets,...

Il est difficile de définir une installation type. Chaque projet doit être étudié cas par cas. Dans le cas particulier de la paille en bottes ou en balles, par exemple, le déchargement, le stockage et l'extraction ne peuvent pas être intégralement automatisés, il faut nécessairement un engin avec son conducteur. Avant d'arriver à la chaudière, ou au gazéifieur, les bottes de

paille sont hachées plus ou moins finement selon le type de réacteur. L'utilité d'un hacheur de forte puissance doit se faire sous la surveillance d'un opérateur (risque d'incendie). Le stockage même tampon de paille hachée (photo 3) s'accompagne d'un dégagement plus ou moins important de gaz de fermentation en fonction de la durée de conservation et du taux d'humidité de paille, ce qui favorise les risques d'incendie.

Ce cas extrême donné, à titre d'exemple, montre bien les contraintes physiques d'exploitation et réglementaires ainsi que les critères de choix qui sont à prendre en compte lors de l'assemblage des différents équipements qui sont pour l'essentiel issus de l'industrie des équipements de manutention de produits en vrac utilisés dans les industries :

- agro-alimentaire
- minière
- thermique

Dans certains cas pour des produits particulièrement pulvérulents ou légers, leur compaction ou densification préalable peut être utile.



**Photo 3:** Pailles de blé hachées

L'ensemble de ces opérations est difficile et très coûteux, en terme d'investissement et de fonctionnement, et affecte les bilans énergétiques. Des systèmes spécifiques devront donc être mis en place en fonction à la fois de l'origine de la matière première mais aussi du procédé mis en œuvre.

Ainsi, les lits fixes nécessitent plutôt une granulométrie élevée, il existe cependant un optimum entre perméabilité des lits et vitesse de réaction. Les lits fluidisés qui optimisent les transferts dans le réacteur devraient nécessiter des particules les plus fines possibles, la contrainte majeure étant alors le temps de séjour de la particule.

Les données disponibles sur les unités actuelles en gazéification font apparaître une structure des coûts reprise dans le tableau 4 et qui mettent en évidence que la partie préparation du combustible représente de 30 à 42% du coût total d'investissement, hors système de production d'électricité, très variable en fonction des choix réalisés.

Type de gazéification	Atmosphérique	Sous-pression
Réception, stockage, manutention	15.4	11.1
Broyage et calibrage	7.7	5.6
Séchage	19.2	13.9
Gazéification	38.5	55.5
Traitement des gaz et eaux usées	19.2	19.9
Total	100	100

**Tableau 4 :** Répartition des coûts d'investissement par grand poste en %

### 1.1.7 - Disponibilité de la ressource

La disponibilité de la biomasse résiduelle (déchets agricoles) est très saisonnière et limitée à quelques mois dans l'année. Il est rare que plusieurs récoltes se succèdent sur les mêmes surfaces, dans la même année. Les sous produits agricoles doivent donc être récoltés, puis stockés. Dans certains cas, du fait des risques de développement et de prolifération de certains champignons ravageurs, ces produits ne peuvent être stockés et doivent être éliminés ou traités rapidement. Cette situation peut donc conduire à une disponibilité de la matière première toute relative et en tout état de cause induire des coûts très élevés dus au stockage. Cette remarque qui concerne les déchets agricoles est également valable, dans une moindre mesure, pour les biomasses forestières dont la récolte est souvent limitée à certaines périodes de l'année du fait de la mauvaise portance des sols. Cependant leur disponibilité est bien supérieure et les productivités à l'hectare ne dépendent pas des aléas climatiques comme le sont les cultures agricoles. Ce gisement constitue le principal gisement français en matière de biomasse.

Les résidus de transformation des produits agricoles présentent un énorme avantage par rapport aux produits agricoles dans la mesure où ils sont très localisés. Le traitement des produits agricoles se réalise rarement aux champs, ce qui fait que ces matières premières ont déjà été transportées et sont présentes en quantité importante, voire très importante en aval des agro-industries. Leur utilisation in situ peut avoir lieu sans coût de transport supplémentaire. Par contre, selon leur origine, leur humidité peut être variable. Plutôt faible pour les sous produits de décorticage telles que les balles de riz, elle sera élevée pour les sous produits de pressage comme la bagasse de canne à sucre,...

Ces produits sont par ailleurs de granulométrie assez homogène ce qui est un avantage.

### 1.2 - Les différents procédés de conversion thermo-chimique de la biomasse

Le bois et les autres formes de biomasse font partie des principales sources d'énergie durable et renouvelable, à même de fournir des combustibles à la fois solides, liquides et/ou gazeux. Le bois et a fortiori la biomasse peuvent être transformés puis utilisés de différentes manières pour la production d'énergie. La pyrolyse, la gazéification et la combustion sont les principales transformations utilisées de nos jours.

**La pyrolyse** est une transformation se déroulant en atmosphère aussi inerte que possible (absence d'oxygène). Le matériau initial est ainsi décomposé en une fraction solide, en liquide et en gaz. La proportion de ces différents produits est fonction des paramètres que sont la température, la pression, la vitesse de chauffage, le temps de séjour, etc... De façon générale, la température de réaction n'excède pas 600°C. Enfin, en fonction de la matière première et de l'avancement de la réaction, les réactions mises en jeu peuvent être endothermiques puis exothermiques voire athermiques. Au delà de ces utilisations classiques : barbecue, activation,... la fraction solide peut être utilisée en substitution dans les chaudières pour la production d'électricité. Les liquides peuvent être utilisés dans les moteurs pour la génération d'électricité ou après raffinage dans les transports. Les gaz, quand ils sont valorisés, sont brûlés pour entretenir le process avec l'une ou l'autre de ces fractions selon l'objectif final de l'installation.

**La gazéification** du bois consiste à décomposer en présence d'un gaz réactif (air, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, etc...) le matériau initial pour obtenir des produits gazeux. A la différence de la pyrolyse,



la gazéification du bois met en jeu des réactions d'oxydation partielle du matériau initial. Les produits gazeux obtenus sont principalement composés de H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. Les températures de gazéification sont supérieures à 800°C et peuvent atteindre plus de 1300°C en fonction du solide utilisé et du procédé employé. Il est à noter enfin que la gazéification est une réaction globalement endothermique. Les gaz produits seront brûlés pour la production de chaleur, ou injectés dans un moteur ou turbine pour la production électrique. Ils peuvent également être utilisés comme gaz de synthèse chimique (méthanol,...).

**La combustion** du bois est une transformation en présence d'oxygène qui décompose de façon complète le matériau initial carboné en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O tout en libérant de l'énergie (énergie de combustion). L'agent oxydant employé est toujours de l'oxygène, principalement puisé dans l'air. Tout comme la gazéification, les températures de combustion sont supérieures à 800°C. Les réactions de combustion sont toujours exothermiques. La combustion fournit de la chaleur qui sera utilisée pour le chauffage urbain, la production de vapeur et par suite d'électricité.

Ces trois voies sont rassemblées sous le terme de conversion thermochimique, qui fait référence à un ensemble de processus qui interviennent sous l'action de la chaleur et qui produisent des changements de nature chimique des composés constituant les produits d'origines.

Le tableau 5 précise pour chaque transformation les conditions en température et atmosphère ainsi que les produits obtenus. Seule la pyrolyse et la gazéification seront étudiées dans ce document.

Transformations thermochimiques	Températures	Atmosphère	Produits
Pyrolyse	< 700°C	Inerte (absence de O <sub>2</sub> )	Solide carboné (charbon) + liquide (goudron) + gaz
Gazéification	> 800°C	Gaz réactif air, O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, etc...	Essentiellement mélange gazeux H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> et CH <sub>4</sub>
Combustion	> 900°C	O <sub>2</sub> (air)	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O

**Tableau 5 :** Tableau récapitulatif des conditions opératoires des différentes transformations thermochimiques

## 2 - LA PYROLYSE

### 2.1 - Introduction à la pyrolyse

Prise dans son sens étymologique de pyro (feu) et lyse (coupure), la pyrolyse est le processus primaire de décomposition thermique de la biomasse. Cette réaction produit des gaz permanents, des vapeurs condensables et un solide en proportion variable selon les conditions opératoires et qui peuvent être valorisés à différents niveaux comme l'illustre la figure 2. Par extension, elle recouvre les procédés de valorisation thermique de la biomasse en l'absence d'oxygène. Selon les conditions de réaction, on distingue :

- **la pyrolyse classique ou lente** . C'est une technique très ancienne qui est utilisée pour la production de charbon de bois. Ce dernier est toujours utilisé notamment dans la métallurgie au Brésil ou dans les PED comme première source d'énergie domestique. En Europe, le charbon de bois concerne principalement le marché du barbecue et la production de charbons actifs. Les conditions de réactions se caractérisent par de faibles vitesses de chauffage des particules.
- **la pyrolyse rapide** . De développement récent, la pyrolyse dite rapide ou flash a pour objectif la production d'un produit liquide énergiquement ou chimiquement valorisable. La vitesse de chauffe des particules est très élevée de quelques dizaines à quelques milliers de °C/s. Seule cette dernière sera développée ci-après dans la mesure où elle a fait l'objet de nombreuses recherches sur les 15 dernières années pour la production d'électricité et de carburant de substitution.

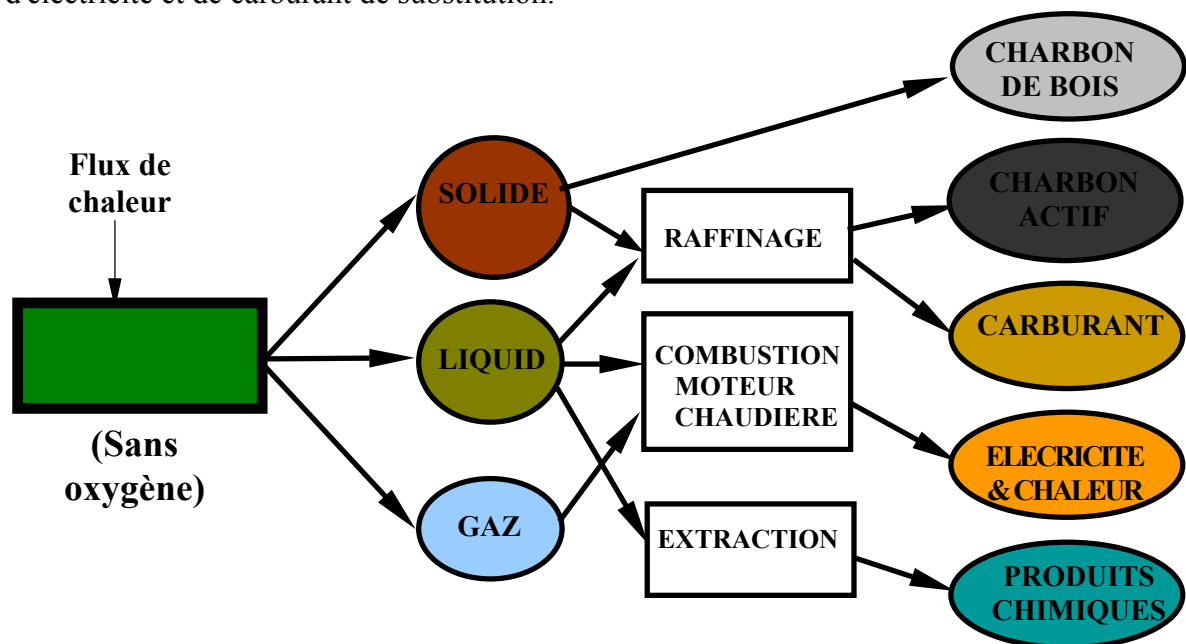


Figure 2 : Produits issus de la pyrolyse de biomasse et leurs utilisations.

### 2.2 - La pyrolyse rapide

D'un développement récent (une vingtaine d'années) la pyrolyse rapide donne des produits différents de la pyrolyse lente. Les particules sont soumises à un fort gradient de température dans un temps extrêmement court et les vapeurs formées sont refroidies très rapidement pour

éviter les recombinaisons et les craquages. Le chauffage rapide produit peu de charbon, essentiellement des composés liquides et ou gazeux selon le temps de séjour dans le réacteur.

Ce chauffage rapide peut se faire soit avec des particules fines chauffées dans un lit de type fluidisé soit par pyrolyse ablative. L'ablation consiste à imposer un contact entre la biomasse et une surface chaude en déplacement relatif.

La composition typique des différents produits obtenus dans le cas de la pyrolyse rapide (sur la base de la matière sèche) est la suivante :

- 40-65% de vapeur condensable (hors eau)
- 10-20% de charbon
- 5-25% de gaz
- 10-20% d'eau

Ces valeurs moyennes varient selon le type de réacteur. Par exemple, pour le réacteur cyclone de Lédé et coll. (1989), il est possible d'obtenir seulement 3 à 5% de charbon et une grande majorité de gaz ou de vapeurs condensables.

Les conditions opératoires suivantes vont provoquer une augmentation de la production de charbon :

- augmenter la taille des particules
- diminuer la température finale du réacteur
- diminuer la vitesse de chauffage du réacteur
- augmenter la pression de travail

Dans ce dernier cas, l'augmentation de rendement en solide provient des réactions secondaires entre les vapeurs chaudes issues de la pyrolyse et le solide en décomposition.

De fait, en ce qui concerne l'obtention des huiles de pyrolyse, les conditions suivantes sont nécessaires :

- diminuer la taille des particules pour les procédés en lits fluidisés ou transportés,
- augmenter la vitesse de chauffage jusqu'à des températures de 450-550°C
- diminuer le temps de séjour des vapeurs dans le réacteur

Ces conditions sont dans l'ensemble inverses de celles nécessaires pour le charbon. Il faut noter que les huiles contiennent une proportion d'eau importante qui peut représenter 20% de la production globale de la pyrolyse, sans considérer l'eau de l'humidité initiale de la biomasse.

Il est admis que les gaz proviennent de réactions secondaires des vapeurs. Pour obtenir du gaz, il faudrait donc augmenter le temps de séjours des vapeurs à une température supérieure à 500°C.

D'autre part, la pyrolyse de la biomasse s'accompagne de la formation d'aérosols, constitués de gouttelettes liquides sub-microniques visibles sous la forme de fumée. Leur mécanisme de production est encore mal connu. Les gouttelettes peuvent poser des problèmes dans un

procédé liés à la collecte des huiles et surtout l'empoisonnement des catalyseurs. Les travaux de recherche dans ce domaine sont encore trop rares.

## 2.3 - Les procédés de pyrolyse rapide

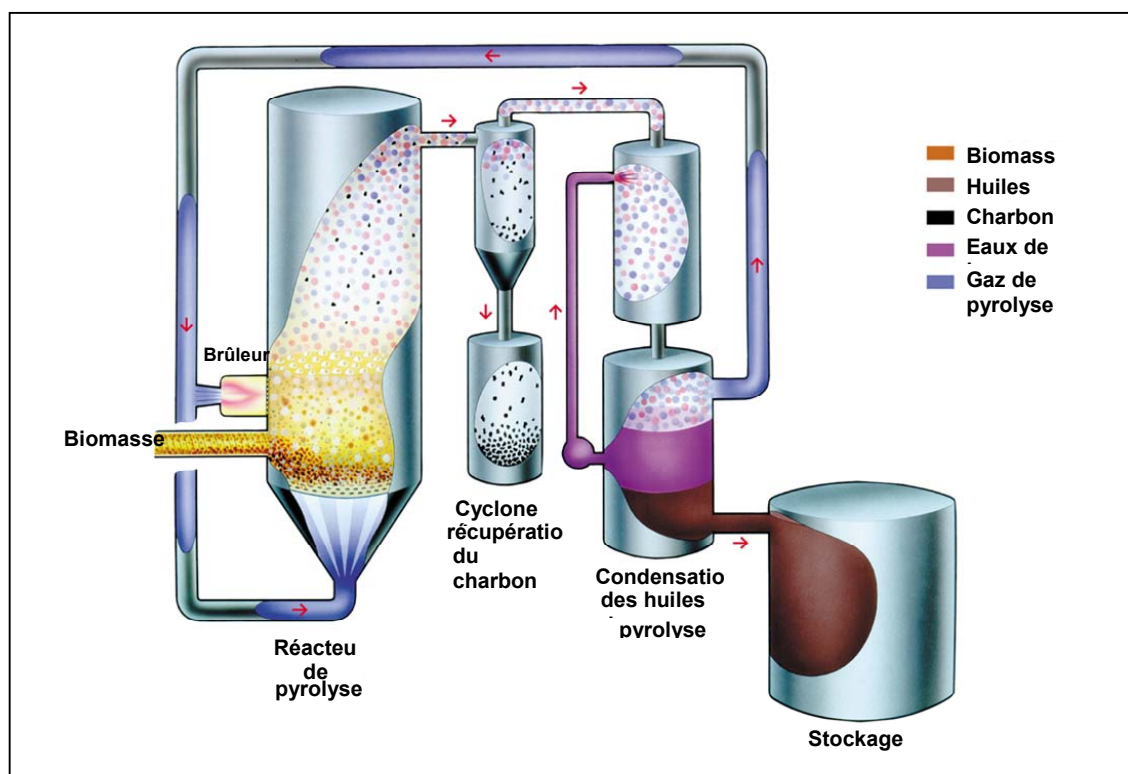
De ce qui précède, les principales caractéristiques des procédés de pyrolyse rapides sont :

- des vitesses de transfert de chaleur très rapides qui nécessitent pour la grande majorité des réacteur mis en œuvre à ce jour un broyage fin de la biomasse avant introduction dans le réacteur,
- un contrôle précis de la température de pyrolyse, vers 500°C, avec des temps de séjour des vapeurs courts, typiquement moins de 2 secondes,
- un refroidissement rapide des gaz de pyrolyse pour maximiser les liquides par rapport aux gaz.

Des fiches détaillées par procédé (5) sont données en annexe 1.

### 2.3.1 - Les procédés à lits fluidisés

Bien que de nombreux types de réacteurs aient été développés pour les procédés de pyrolyse rapide, la configuration en lits fluidisés est la plus développée. Cela provient du fait de leur simplicité d'emploi et de leur relative facilité de mise en échelle pour des développements industriels.



**Figure 3** : représentation schématique du procédé pilote RTI (Dynamotive/ Canada)

Les lits fluidisés denses à lit bouillonnant (bubbling fluidised bed) ont été choisis par plusieurs compagnies notamment : la société Dynamotive avec un procédé pilote de type RTI de 50 kg/h et une unité de démonstration en cours de réception de 450 kg/h au Canada et la société

Wellman avec la construction d'une installation de 200 kg/h en Angleterre. La figure 3 est une représentation schématique illustrant le procédé pilote RTI développé par Dynamotive au Canada.

Les réacteurs de type lits fluidisés circulants ont pour leurs parts été développés au niveau commercial par ENSYN et sont utilisés aux USA dans le domaine des arômes avec des installations de 1 à 2 t/h. Les avantages et inconvénients de ce type de procédé sont bien connus de l'industrie et sa mise en œuvre en pyrolyse flash ne déroge pas à la règle.

### 2.3.2 - Les réacteurs ablatifs

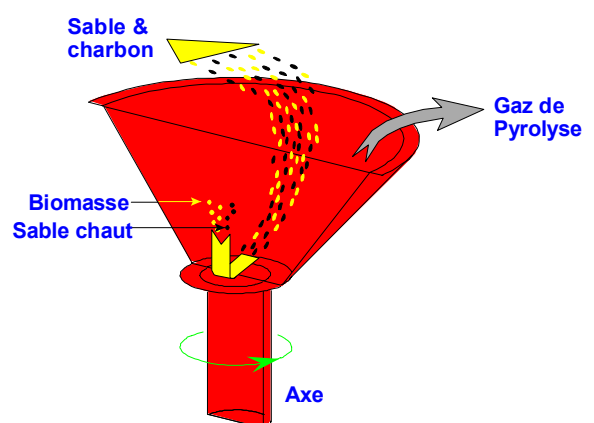
L'ablation consiste à imposer un contact entre la biomasse et une surface chaude avec un déplacement relatif. Les procédés ablatifs de pyrolyse sont intéressants dans la mesure où ils permettent l'utilisation de matière première de granulométrie plus grande, ce qui évite la phase de broyage fin. Les procédés ablatifs sont limités non pas par la vitesse "d'absorption" de l'énergie par la biomasse, mais par la puissance thermique délivrée par le procédé. La plupart des travaux exploratoires menés sur la pyrolyse ablative a été réalisée par le NREL (USA) dans leurs réacteurs de type vortex et par le CNRS à Nancy. De récents développements ont été menés à l'université de Aston (UK). Cette solution technologique de pyrolyse rapide présente l'avantage de proposer des systèmes potentiellement plus compacts à haut rendement. Leur industrialisation n'est cependant pas simple et n'a pas encore été effectuée.

### 2.3.3 -Les réacteurs à lits entraînés

Un procédé de pyrolyse rapide à flux entraîné a été développé à l'Institut de Recherche Technologique de Georgie (USA), puis conçu par Egemin (Be). Cependant, probablement à cause des difficultés rencontrées pour l'obtention de bons transferts thermiques entre la biomasse solide et le gaz vecteur caloporteur, le procédé Egemin a été rapidement abandonné.

### 2.3.4 - Les réacteurs à cône rotatif

Le réacteur à cône rotatif schématisé en figure 4, qui fut inventé à l'université de Twente et développé par BTG, est une technologie récente dont le principe est basé sur les réacteurs à lit transporté, mais dont le transport est réalisé par des forces de centrifugation au lieu de transport pneumatique par des gaz. L'absence de gaz de fluidisation évite la dilution des vapeurs de réactions et minimise la taille du traitement en aval de ces vapeurs. La tenue mécanique du réacteur est à confirmer mais il semblerait qu'aucune altération ne soit intervenue après plus de 1000 heures de fonctionnement. La photo 4 présente l'unité de 200 kg/h de BTG.



**Figure 4 :** Représentation schématique d'un réacteur à cône rotatif



**Photo 4 :** Unité BTG de 200 kg/h (Twente)

### 2.3.5 - Les réacteurs de pyrolyse sous vide

Les procédés de pyrolyse sous vides développés par la société Pyrovac (CAN) présentent des vitesses de chauffage très faibles au regard des autres procédés. Toutefois, la production d'huile en terme de

rendement et de qualité est permise par une évacuation rapide des gaz de pyrolyse due à la présence du vide, la pression réduite a également pour effet de diminuer l'importance des réactions de craquage thermique des vapeurs. C'est le faible temps de séjour des vapeurs qui rapproche ce procédé de la pyrolyse Flash par rapport avec un procédé de pyrolyse lente en tambour rotatif par exemple.

Après leur conditionnement, les particules qui peuvent être plus importantes qu'avec les procédés précédents sont introduites dans le réacteur au moyen d'un système d'alimentation sous vide. A l'intérieur du réacteur les produits solides circulent sur des plateaux horizontaux chauffés par un mélange de sel fondus portés à une température de 500°C.

Les matières organiques se décomposent en vapeurs rapidement soutirées du réacteur par une pompe à vide. Les gaz incondensables sont acheminés jusqu'au brûleur pour chauffer les sels fondus.

Le mode d'apport de chaleur est cependant problématique et a conduit la société Pyrovac à revoir plusieurs fois son procédé avant qu'il ne soit mis en œuvre au niveau industriel (photo 5). Le procédé est plutôt orienté déchet bien que de nombreux essais aient été menés sur du bois.



**Photo 5 :** Procédé Pyrovac d'une capacité de 3,5 t/h ( Jonquière, Québec)

## 2.4 - Les huiles de pyrolyse

Nous nous intéresserons ici particulièrement aux propriétés et aux applications des huiles de pyrolyse, produit majoritaire de la pyrolyse rapide.

### 2.4.1- Caractérisation des huiles de pyrolyse

Les caractéristiques principales des huiles brutes sont comparées au fuel lourd dans le tableau 6.

Propriétés	Huiles de pyrolyse	Fuel lourd
Taux d'humidité %	15-30	10
PH :	2.5	-
Masse volumique à 15°C : kg/l	1.20	1.03
Analyse élémentaire après séchage C :%	56.4	87.9
H :%	6.2	10.5
O :%	37.3	0.2
S/N :%	0.1	0.4 <1
Cendres : %	0.1	0.02
PCI (dépend du taux d'humidité) : MJ/kg	16-19	42.66
Viscosité (à 40°C et 25% d'eau) : cs	40-100	1500
Solides (charbon) : %	0.5	-

**Tableau 6:** Caractéristiques principales des huiles de pyrolyse

Les huiles de pyrolyse se présentent typiquement sous la forme d'un fluide brun foncé. En fonction de la nature de la matière première utilisée et des conditions opératoires de pyrolyse rapide, la couleur peut varier du rouge-brun foncé jusqu'au vert-foncé, dépendant de la présence de particules microscopiques de carbone et de la composition chimique du liquide. Ainsi, une filtration des vapeurs de pyrolyse à haute température donne aux huiles de pyrolyse un aspect rouge-brun, plus translucide (absence de particules). D'un autre côté, des teneurs importantes en azote dans les huiles de pyrolyse conduisent à une teinte vert-foncé.

Le liquide a une odeur caractéristique. Les vapeurs acres qui s'en dégagent peuvent irriter les yeux après une période d'exposition prolongée. Les huiles de pyrolyse contiennent plusieurs centaines de produits chimiques dans des proportions très variables, depuis des composés volatils à faible poids moléculaire (tel que formaldéhyde et acide acétique) jusqu'à des composés plus complexes à haut poids moléculaire (phénols et sucres).

**Stabilité :** Les huiles de pyrolyse contiennent des quantités variables d'eau (de 15% à 30%), qui peut former une phase liquide stable et homogène. Elles peuvent tolérer l'ajout d'une quantité d'eau plus ou moins importante, jusqu'à une certaine limite qui se situe vers 30% au-delà de laquelle une séparation de phase est constatée. Ainsi ce liquide n'est pas complètement miscible avec l'eau ni même avec des carburants dérivés du pétrole. En outre, ces huiles sont photo et thermolabiles. Il convient donc de les stocker convenablement.

**Masse volumique :** La masse volumique du liquide, d'environ 1,2 kg/litre, est très élevée comparée à celle des combustibles liquides classiques (0,85 kg/litre). Cela signifie que le liquide contient environ 42% de l'énergie contenu dans du fioul sur une base de poids, mais 61% sur une base volumétrique. Ceci a des implications directes sur la conception et la spécificité du matériel à employer (notamment les pompes).

**Viscosité :** La viscosité des huiles de pyrolyse peut varier de valeurs aussi faibles que 25 cS jusqu'à plus de 1000 cS, selon la teneur en eau, la quantité de composés légers et le temps de

stockage de l'huile. La viscosité des huiles est un des facteurs importants dans la plupart des applications utilisant des combustibles liquides.

**Distillation** : Après avoir été collectées les huiles de pyrolyse ne peuvent plus être ramenées à l'état de vapeur. Si on chauffe le liquide à 100 °C ou plus en vue d'enlever l'eau (outre des fractions plus légères), il réagit rapidement et produit un résidu solide carboné d'environ 50 % en masse et un distillat contenant des produits primaires et secondaires en plus de l'eau. Le liquide est donc chimiquement instable et cette instabilité augmente avec la température. Ainsi il est préférable de stocker le liquide à température ambiante. Même si certains changements se produisent de façon plus atténuée à cette température cela permet tout de même d'envisager une utilisation commerciale de ce produit.

La forte teneur en cendre ou en matières solides (fine particule de charbon ou de sable) constitue indiscutablement la contrainte la plus forte quelque soit l'application envisagée.

## **2.4.2 - Applications pour les huiles de pyrolyse**

Les huiles de pyrolyse pourraient représenter un combustible de substitution au fioul ou au diesel dans de nombreuses applications telles que les chaudières, les moteurs ou les turbines pour la production d'électricité. L'ensemble des applications est représenté figure 5. Parallèlement à cela il existe un éventail plus ou moins large de composés organiques qui peuvent être extraits et entrer dans la fabrication de produits chimiques liés aux domaines de la chimie fine, des arômes alimentaires, des résines, et des engrais.

### **2.4.2.1- Carburant de substitution**

L'utilisation de l'huile de pyrolyse raffinée en tant que carburant pour le transport est de nos jours techniquement réalisable, même si tous les problèmes ne sont pas complètement réglés. Par contre, sur le plan économique une telle utilisation n'est aujourd'hui pas viable.

### **2.4.2.2 - Combustion en chaudière**

Les huiles de pyrolyse peuvent se substituer aux fuels lourds ou légers pour la production de chaleur. Si les brûleurs classiques ne peuvent pas être utilisés directement avec les huiles, il apparaît néanmoins que les modifications à apporter sont mineures (pour autant que la qualité des huiles soient appropriées). Ces applications sont extrêmement dépendantes de la structure de prix des produits pétroliers qui est très variable d'un pays à l'autre. Elle n'offre que peu d'intérêt en France à ce jour. Par contre NESTE OY (FIN) a estimé qu'il existe un marché en Finlande dans la gamme 100 kW - 1 MW (soit 20 à 200 kg d'huile par heure).

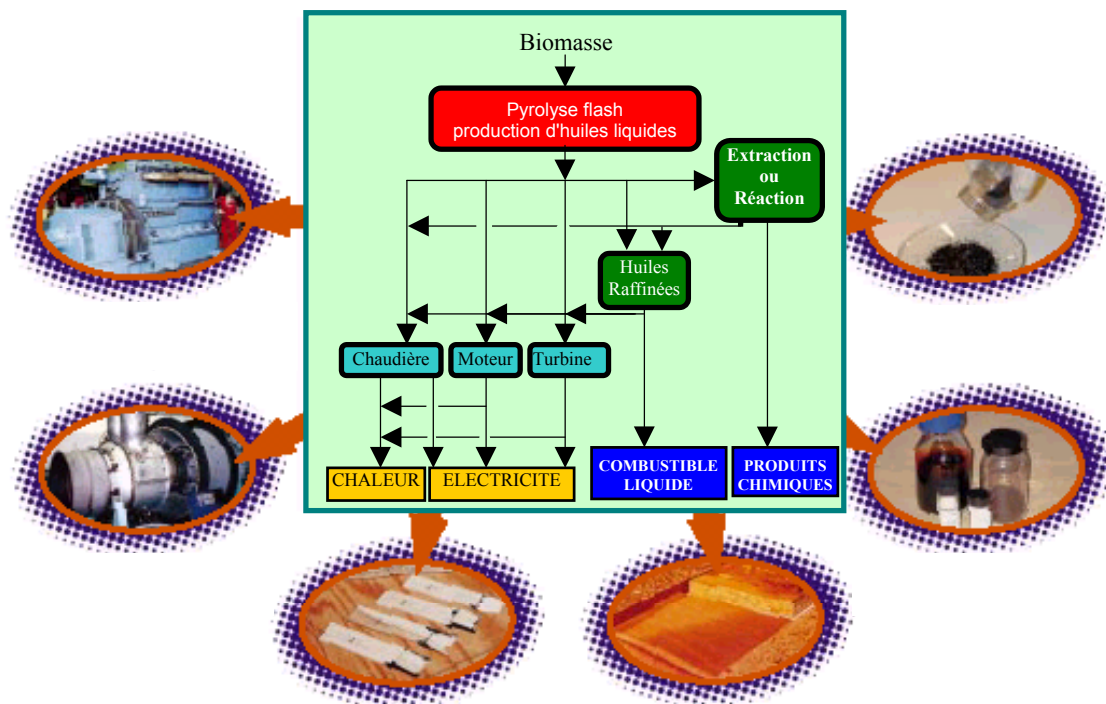
### **2.4.2.3 - Production d'électricité**

Ces dernières années, des durées de l'ordre de 500 heures de fonctionnement ont été atteintes sur divers moteurs, allant de l'échelle laboratoire jusqu'à des puissances de 1.4 MW électrique pour des moteurs thermiques dual fuel.

A titre d'exemple le moteur diesel modifié par Ormrod Diesels (UK) a totalisé plus de 400h de fonctionnement comprenant des périodes de plus de 9h pour une production d'électricité globale de 320 MWh. Sous réserve d'obtenir une huile exempte de matières solides en suspension, la génération d'électricité à partir de moteur semble réalisable comme le prouve les résultats des différents programmes européens.



Une turbine à gaz de 2,5 MWe a également été modifiée et des essais ont été entrepris bien que les perspectives de faisabilité techniques soient, à notre sens, illusoirs.



**Figure 5** : Les différentes applications des huiles de pyrolyse (PyNe)

#### 2.4.2.4 - Produits chimiques

La production de produits chimiques constitue une voie intéressante de recherche compte tenu des perspectives de valeur ajoutée escomptable sur certaines molécules. Cependant il convient d'en relativiser l'impact. Ces marchés sont d'une part déjà occupés et d'autre part les volumes concernés (à prix élevé) sont faibles.

## 2.5 - Analyse critique et recommandations

Au jour d'aujourd'hui, la grande majorité des unités de pyrolyse flash est développée dans le cadre d'unités de R&D. Le tableau 7 regroupe les procédés en cours d'étude et constituant des solutions technologiques potentielles pour des unités commerciales bien que seule ENSYN ait démontré la faisabilité industrielle de ses unités aux USA, mais il est vrai dans un contexte très spécifique (utilisation alimentaire d'une fraction extrêmement faible des huiles produites avec une très forte valeur ajoutée). Les informations disponibles sur cette installation et ses performances réelles sont quasi inexistantes.

Il existe de nombreux autres réacteurs mis en œuvre au niveau de laboratoire dans pratiquement tous les pays européens ou aux USA et au Canada. Ces équipements ont été recensés par Brigdwater et ne seront pas présentés dans ce document notamment parce que ces réacteurs ont pour l'essentiel des capacités généralement inférieures au kg et ne présente pas d'originalité de procédé (90% lit fluidisé). De nombreuses informations sont disponibles

dans la revue PyNe News éditée par le réseau PyNe soutenu par l'Union Européenne et l'AIE et au sein duquel le Cirad assure la représentation française.

La pyrolyse rapide présente deux avantages principaux par rapport aux autres voies de conversion thermo-chimiques de la biomasse.

Le premier, le plus important, concerne le découplage possible entre la production et l'utilisation. En effet il est possible d'implanter une unité de production d'huile dans une zone où la ressource est abondante afin de minimiser les coûts de transport de la matière première et de bénéficier de l'effet d'échelle sur les investissements. Les huiles sont ensuite transportées aisément vers les lieux d'utilisation. Cet avantage joue peu en France, comparativement aux pays scandinaves par exemple, mais peut être non négligeable surtout si les externalités du projet de l'unité sont prises en compte dans le calcul économique.

Le deuxième avantage concerne la spécificité de ces huiles qui les rendent potentiellement substituables au carburant dans les transports. Cependant l'obtention d'un carburant directement utilisable à la pompe reste aujourd'hui une utopie, compte tenu des coûts de raffinage.

Société	Pays	Contact	Tél. Fax	Type technologie	Statut	Matière première	Nb d'unités	Taille max. kg/h	Commentaires
Constructeur									
ENSYN	US	BARNET	44.020.74.34.1871 44.020.74.34.1393	Lit fluidisé circulant	Com.	Bois	3	1 000	Essentiellement produits chimiques prouvés commercialement
BTG	NL	PRINS	31.53.489.2239 31.53.432.5399	Cône rotatif	Demo.	Bois et sous produits s	2	200	Centre de recherche
WELLMAN	UK	MAC LELLAN	44.121.601.3221 44.121.601.3123	Lit fluidisé dense	Demo.	Bois	1	250	Unité de recherche à ce jour arrêtée pour fin d'autorisation de fonctionner
DYNAMOTIVE	CA	MORRIS	1.604.222.5590 1.604.222.5545	Lit fluidisé dense sur base du procédé RTF	Démo.	Bois	1	450	Associée à RTI, l'ensemble constitue une équipe très performante
PYROVAC	CA	ROY	1.418.652.2298 1.418.652.2275	Sous vide	Démo.	Bois et déchets	1	3 000	Très actif commercialement mais une seule unité de démo, très orienté déchets
Pilote									
UNION FENOSA	ES		34.1.571.3700 34.1.571.2427	RTI	Demo.	Bois	-	200	Unité arrêtée. La réalisation européenne la plus complète à ce jour
FORTUM	FIN	GUST	358.204.50.37.38 358.204.50.6691	FORTUM	Demo.	Bois	-	?	En cours de construction sur un procédé encore confidentiel
ENEL	IT	ROSSI	39.50.53.5.610 39.50.53.5521	ENSYM	Demo.	Bois et sous produits	-	650	Grosses difficultés, techniques et politiques, pour démarrer l'installation
VTT	FIN	SOLANTAUSTI	358.9.456.5517 358.9.460.493	ENSYM	R&D	Bois	-	20	Pilote orienté recherche avec programme de tests très solides
JONQUIERE	CA	ROY	1.418.652.2298 1.418.652.2275	PYROVAL	Démo	Déchets	-	3 000	L'unité aurait été réceptionnée mais n'a pas encore atteint la capacité nominale
Autre : Recherche en France									
CNRS NANCY	FR	LEDE	33.3.83.17.52.40 33.3.83.32.29.75	Ablatif	Rech.	-	-	Centaines de g.	Parmi les 5 meilleures équipes de recherche
Autre : Pyrolyse Déchet									
THIDE/IFP	FR	THIBAUT	33.1.39.30.94.50 33.1.39.30.94.51	Pyrolyseur rotatif EDDITH (pyrolyse lente)	Com.	Ordures ménagères	4	3 500	Technologie mise au point pour les ordures ménagères

**Tableau 7 : Liste des principaux procédés et projets de pyrolyse, significatifs**

Au niveau technologique les procédés qui sont proposés par les quelques fournisseurs ont atteint un niveau de maturité qui permet d'envisager leur démonstration industrielle. Les différentes solutions sont toutefois très proches les unes des autres en terme de rendement et de qualité d'huile. Si le nombre de réalisations reste encore faible dans le monde, notamment en ce qui concerne les réalisations industrielles, le procédé en lui-même n'est pas en cause. Le manque de débouché pour les huiles du fait de leur grande hétérogénéité constituent certainement le principal handicap. Les résultats escomptés de l'unité pilote de Bastardo (ENEL, Italie), la plus grosse unité européenne à ce jour et conçue par ENSYN, seront à ce niveau déterminants quant à la viabilité de la technologie. Les premiers résultats ne sont malheureusement pas très encourageants puisque des modifications importantes sont actuellement en cours pour permettre à cette unité de redémarrer après plusieurs années d'attermoiement.

Les problèmes qui restent à résoudre sont encore nombreux et tiennent essentiellement aux caractéristiques physico-chimiques des huiles et de leur extrême variabilité en fonction des procédés et des matières premières. Les perspectives d'aboutir à une maîtrise de procédé suffisamment fine pour orienter la réaction vers une composition définie sont, à notre sens, extrêmement faibles du fait de la complexité des réactions mises en œuvre et de la variabilité de la matière première. De même, la fraction solide contenue dans les huiles (sable de fluidisation, cendres et fines de charbon) est encore très problématique pour toutes les applications énergétiques. VTT (FIN) teste actuellement les filtres céramiques hautes températures qui semble donner de bon résultats en terme de filtration mais au détriment du rendement en huile, par suite de l'augmentation du temps de séjour des vapeurs à haute température (augmentation du volume de gaz).

En terme d'application, les premiers essais réalisés sur des moteurs pour la génération d'électricité ont montré que moyennant des modifications mineures, ces derniers étaient susceptibles de fonctionner convenablement avec des huiles de pyrolyse. Cette application est certainement la plus prometteuse pour la pyrolyse pour une application énergétique.

L'utilisation de ces huiles en Turbine à Gaz (TAG) est à exclure avec le niveau technologique actuel. Des essais de très courte durée ont eu lieu au Canada sur une TAG de conception russe, les résultats présentés sont très controversés.

La pyrolyse présente par contre un intérêt certain pour le traitement de déchets et autres produits contaminés. La facilité de maîtrise de la réaction permet en effet d'orienter la réaction vers le solide, le gaz ou le liquide, et permet ainsi de séparer les produits constituant de la matière première ou de concentrer certains de ces constituants dans une des phases. Les applications énergétiques des produits issus de ces réactions risquent cependant d'être fortement aléatoires (fonction des matières premières traitées). C'est cette propriété qui a conduit l'IFP et la société THIDE à développer le procédé EDITH pour le traitement des déchets ménagers.

La co-valorisation chimique et énergétique qui est souvent présentée comme la solution devant permettre de rentabiliser les installations, grâce à la forte valeur ajoutée escomptable sur certaines molécules, est à abandonner. En effet, d'une part, les marchés concernés sont des marchés de niche et une seule installation serait en mesure de saturer le marché mondial, du moins à des niveaux de prix attractifs. Ensuite, ce marché est déjà pour une part satisfait par des procédés plus conventionnels, et la plus grande unité industrielle est française (Usine Lambiotte à Prémerie). Enfin, la stabilité des huiles est fortement altérée par les traitements

thermiques, au point de nécessiter une utilisation immédiate. La pyrolyse perd dans ce cas l'un de ses atouts majeurs si les huiles, après récupération d'une fraction de produits chimiques, ne peuvent pas être transportée.

Même si la pyrolyse, pour des applications énergétiques, ne va pas déboucher dans un avenir immédiat au niveau européen, une activité de recherche fondamentale dans ce domaine doit être maintenue et faire l'objet d'un soutien financier national minimum qui permette aux équipes actives de s'insérer dans les travaux menés au niveau international. Il convient, en effet, de ne pas oublier que la pyrolyse est la première étape de toute conversion thermo-chimique et que de fait, pour une part significative, elle conditionne les performances et l'impact sur l'environnement des procédés thermiques. Tout progrès réalisé dans ce domaine est, à priori, utilisable en gazéification et en combustion. Le renforcement des mesures environnementales milite dans ce sens, notamment pour accroître les performances environnementales des applications petites puissances de la combustion.

Cette recherche ne doit pas être uniquement comprise au sens très fondamental du terme (ex. élucidation de mécanismes physico-chimiques intimes). Elle doit aussi s'intéresser à tous les problèmes d'optimisation de réacteurs qui accompagnent les complexes réactions de pyrolyse. Les démarches sont en effet trop empiriques et les lois d'extrapolation ne sont pas encore clairement établies.

Si ce chapitre axe exclusivement les applications de la pyrolyse sur la production d'huiles, objectif quasi-exclusif des travaux actuels sur le sujet. Il faut cependant rappeler que la pyrolyse rapide peut également être conduite pour une production maximale de gaz ayant un pouvoir calorifique pouvant approcher les  $20 \text{ MJ/m}^3$ . Il est à noter que ce pouvoir calorifique est plus grand que pour le gaz obtenu en gazéification même à l'oxygène. C'était l'objectif initial de la pyrolyse rapide qui a été oublié un peu vite par les travaux actuels sur la gazéification.

Enfin, la pyrolyse reste une voie très intéressante pour le traitement de déchets et la séparation/concentration des polluants dans de différents fractions.

## 3 - La gazéification

D'un point de vue technique, la gazéification permet de transformer des combustibles solides hétérogènes en un combustible gazeux homogène et facilement utilisable. Il convient de signaler que la gazéification est une technologie simple et largement éprouvée notamment à partir du charbon. Le marché traditionnel de la gazéification est le gaz de synthèse comme étape intermédiaire à la production d'ammoniac et d'engrais. Les changements qui sont intervenus en matière d'ouverture du marché de l'électricité et de renforcement des contraintes environnementales ont ouverts de nouveaux marchés à la gazéification. Les perspectives ouvertes alors sont l'utilisation de technologies de production d'électricité à fort rendement à la fois pour de petites et moyennes puissances (moteurs thermiques) ou de grandes puissances (turbines à gaz) à partir de la biomasse.

La réaction globale étant fort complexe, il nous semble important d'en préciser les mécanismes de façon un peu plus fondamentale, cette approche permettra de comprendre où se situe les obstacles à son développement dans le domaine de la biomasse énergie.

### 3.1 - Les réactions chimiques de la gazéification

#### 3.1.1. - Définitions

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 généralement de convertir le solide en vue de l'obtention d'un mélange gazeux combustible. Elle se distingue donc de la pyrolyse, opération thermique s'effectuant en l'absence de gaz réagissant avec le solide, et de la combustion dans laquelle la plus grande partie du carbone contenu dans le solide est transformée en  $CO_2$ .

Cette transformation met en jeu un ensemble de mécanismes thermochimiques, pyrolyse, oxydation et réduction, fortement couplés, qui conditionnent 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.

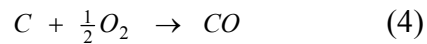
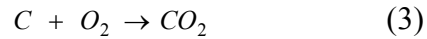
La gazéification, d'un point de vue purement scientifique, se décrit comme une réaction hétérogène, c'est à dire une réaction de surface entre le carbone (C) contenu dans le solide et un gaz réactant qui peut être de la vapeur d'eau ( $H_2O$ ) ou du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Ces deux réactions,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



Ces réactions sont lentes, comparées à l'oxydation (avec oxygène) lors de la combustion. Elle est environ 50 fois plus lente pour une gazéification à la vapeur d'eau et 100 à 150 fois plus lente si l'on considère le dioxyde de carbone comme gaz réactant. L'estimation des cinétiques de gazéification demeurent aujourd'hui très discutée et même si de nombreuses études existent en

gazéification de charbon, très peu sont celles qui s'aventurent dans la détermination de ces cinétiques chimiques et en particulier lorsque la biomasse est concernée.

Lorsque l'air ou l'oxygène est utilisé pour la gazéification, les réactions d'oxydation (3) ou d'oxydation partielle (4) qui ont lieu, fournissent l'énergie nécessaire aux réactions suivantes.



Le taux de conversion du carbone solide en gaz et la composition de ces derniers sont déterminés par :

- les constantes d'équilibres des diverses réactions mises en œuvre (une dizaine)
- les vitesses de ces réactions
- la composition du mélange oxygène/vapeur des réactions

**Ainsi, un long temps de réaction est une condition nécessaire au bon fonctionnement des réacteurs de gazéification.** Ceci explique que les premiers gazogènes, et les plus répandus, soient les réacteurs à lit fixes. Ils n'imposent aucune contrainte en terme de granulométrie et temps de séjour de la matière première. Toutefois, le réactant présent au niveau du solide (par m<sup>2</sup> de surface réactive) reste très faible dans de tels procédés et tend donc à limiter la réaction de gazéification. Dans ce contexte, les réacteurs à lit fluidisés présentent l'intérêt d'accroître considérablement les transferts massiques, mais également thermiques, au niveau de chaque particule en suspension. La disponibilité de réactants (H<sub>2</sub>O ou CO<sub>2</sub>), tout comme les échanges thermiques gaz/solide sont donc largement plus élevés et permettent un gain significatif en terme d'efficacité. Cependant, les technologies de gazéification utilisant des écoulements diphasiques sont beaucoup plus complexes à mettre en œuvre, ce qui les rend peu économique pour des installations de faibles puissances (< 5 MWe).

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<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O 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 :

- 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.

La gazéification est globalement une combustion incomplète.

### 3.1.2 - Les principales réactions

**La pyrolyse**, réaction légèrement endothermique, produit des gaz et une matrice solide résiduelle, concentrée en carbone, appelé charbon. La cinétique de pyrolyse, la répartition gaz/solide formée ainsi que les compositions chimiques des produits résultants dépendent de nombreux paramètres, mais la température, la vitesse de montée en température, la granulométrie et la nature du combustible sont toutefois les grandeurs les plus influentes. Cette décomposition joue un rôle particulièrement important dans les procédés car elle conditionne :

- Le charbon, **sa concentration en carbone, sa surface spécifique** et plus généralement sa réactivité en particulier vis à vis de la gazéification ultérieure avec H<sub>2</sub>O ou CO<sub>2</sub>.
- Les gaz (ou matières volatiles), qui selon le combustible initial peuvent représenter de 0 à 80 % de la masse totale. Il est courant de les décomposer en deux types :
  - Les gaz non-condensables, composées majoritairement d'un mélange de gaz combustibles (CO et hydrocarbures) et de dioxyde de carbone.
  - Les goudrons (matières volatiles condensables), composés de masses moléculaires plus ou moins élevées et à caractères aromatiques, ils sont liquides jusqu'à des températures relativement élevées (400-500 °C).

Ces goudrons, formés pendant cette étape de pyrolyse, nécessitent une attention particulière puisqu'ils sont généralement non complètement oxydés et qu'une partie d'entre eux après des recombinaisons plus ou moins importantes se retrouvent dans les gaz et perturbent leur utilisation.

Ils sont en effet responsables de l'encrassement des dispositifs de transformation des gaz en énergie électrique (moteurs thermiques, turbine à gaz, ...). L'élimination de ces goudrons, dans le procédé ou en aval de celui-ci, reste un des défis technologiques sur lequel porte aujourd'hui de nombreux travaux de recherche et développement.

**L'oxydation homogène** entre les matières volatiles et l'oxygène de l'air va permettre de produire de l'énergie d'une part, et la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone nécessaire à la gazéification d'autre part. Il convient également de préciser que la vapeur d'eau provient aussi de l'humidité initiale de la biomasse brute. Les cinétiques d'oxydation homogène pour les hydrocarbures, l'hydrogène et le monoxyde de carbone sont très rapides (quelques dixièmes de secondes) et bien connues.

L'oxydation des goudrons reste plus problématique à cause de leur cinétique beaucoup plus lente et d'une disponibilité en oxygène très faible, voire nulle (concurrence). En effet, la quantité d'air total injectée est minimale, elle permet d'équilibrer les bilans énergétiques réactionnels mais évite la formation excessive de CO<sub>2</sub>, produit lors de la combustion des matières volatiles.

Une solution à l'élimination de ces goudrons dans les procédés est le craquage thermique. Le principe consiste à les porter à hautes températures (> 1000°C), ce qui permet de rompre ainsi les liaisons de ces molécules "lourdes" et les décomposer en molécules plus légères, plus oxydables. C'est ce qui peut être réalisé dans les lits entraînés grâce aux hautes températures maintenues dans les réacteurs.

Cependant, les températures élevées ont une influence négative sur les procédés et en particulier sur les bilans énergétiques des installations : une énergie considérable est nécessaire pour atteindre ces niveaux de température et les gaz devront au final être refroidis avant utilisation. D'autre part, la création d'une zone chaude est associée, lorsque la biomasse est concernée, à la fusion des cendres et par conséquent aux difficultés technologiques qui en découlent en terme d'extraction et de corrosion.

Autrement dit, la conception d'un procédé de gazéification doit trouver un compromis au niveau des températures, afin de permettre le craquage thermique et une gazéification efficace d'une part et d'éviter la fusion des cendres et les pertes énergétiques d'autre part. Ce compromis est aujourd'hui un frein au développement de nouveaux procédés de gazéification puisqu'il se traduit par des niveaux de goudrons dans les gaz supérieurs aux tolérances des moteurs et mais surtout des turbines.



**L'oxydation hétérogène** du charbon permet d'apporter un complément énergétique aux procédés dans les cas où la part due aux oxydations homogènes s'avèreraient insuffisantes. Cette réaction doit toutefois être réduite à son minimum, dans la mesure où elle consomme du charbon qui ne sera, par conséquent, plus disponible pour la réaction de gazéification. De plus, la problématique des cendres décrite plus haut apparaît ici aussi comme une contrainte forte liée à cette réaction.

**Les transferts thermiques et massiques** jouent un rôle très important dans la maîtrise de tels procédés et sont indissociables des réactions chimiques décrites ci-dessus. En particulier, c'est la diffusion des gaz de pyrolyse, des fumées issues des oxydations ou encore de l'air, qui va permettre un bon mélange réactant/réactif nécessaire aux différentes réactions chimiques mises en jeu. Cet aspect est un point faible indéniable des réacteurs à lits fixes, en comparaison à ceux à lits fluidisés.

**Dans ce contexte, les propriétés du solide (granulométrie, densité, porosité,...), en contrôlant les phénomènes de transferts, jouent un rôle essentiel sur la conduite des procédés, que seule une conception de réacteur adaptée pourra optimiser.**

Gazéification, pyrolyse, oxydations homogène et hétérogène sont donc quatre mécanismes essentiels qui conditionnent les procédés de gazéification. Ces mécanismes thermochimiques, couplés aux phénomènes de transferts thermiques et massique font de ces réacteurs un système complexe très réactif dont la compréhension et la maîtrise est aujourd'hui indispensable à l'émergence de nouveaux procédés adaptés à la gazéification de la biomasse.

### **3.2 - Nature des gaz produits**

Lors de la gazéification, la partie organique du combustible est transformée principalement en monoxyde de carbone CO et en hydrogène H<sub>2</sub> et dans des proportions plus faibles en méthane CH<sub>4</sub>. Selon le type de réacteur mais surtout de gaz de réaction la somme H<sub>2</sub> + CO varie dans de fortes proportions et peut représenter jusqu'à 80% dans le cas de gaz de synthèse obtenus par gazéification à l'oxygène.

Ces gaz contiennent aussi divers gaz inertes : vapeur d'eau H<sub>2</sub>O, azote N<sub>2</sub> et dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, 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, NH<sub>3</sub>, HCN, métaux lourds volatils à basses températures, etc... Enfin, une part plus ou moins importante de composés hydrocarbonés, les goudrons résultant de la pyrolyse, peuvent être présents dans les gaz, en fonction du type de réacteurs utilisés et, une fois encore, de la qualité de la matière première.

Le pouvoir calorifique du gaz et sa composition est fonction de la nature du combustible et du type de réacteur comme l'illustre le tableau 8.

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

Tableau 8 : Composition moyenne des gaz en fonction du type de procédé<sup>2</sup>

### 3.3 - Les différents types de procédés utilisés

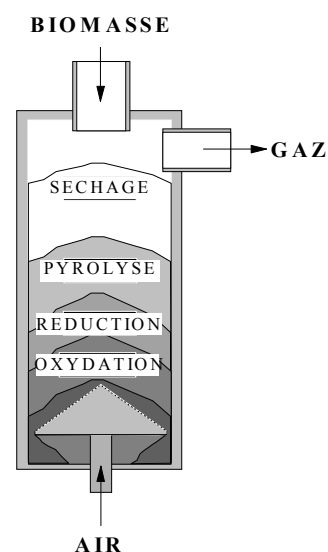
#### 3.3.1 - Procédés à lit fixe

##### 3.3.1.1 - Contre courant (updraft)

Dans les procédés à lit fixe à contre courant (updraft), le combustible solide est généralement introduit par la partie supérieure alors que l'agent oxydant nécessaire à la gazéification est introduit par le bas.

De part cette disposition, le gaz généré durant la gazéification est évacuée du réacteur près de la zone de pyrolyse et présente de ce fait une teneur en goudrons importante.

Le combustible solide est quant à lui complètement convertit en gaz et goudrons. Les procédés à contre courant peuvent être utilisés pour des combustibles solides humides et sont relativement peu sensibles à la taille de la matière première.



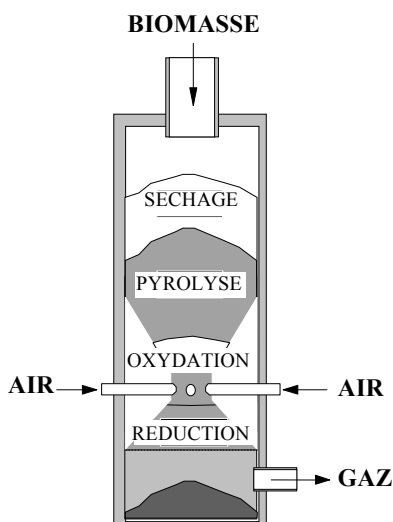
Les principaux avantages des lits fixes à contre courant sont leur simplicité de construction et leur efficacité thermique élevée : la chaleur sensible des gaz produits est en effet récupérée directement par la biomasse qui est alors séchée, préchauffée et pyrolysée avant d'entrer dans la zone de gazéification. En principe, il n'existe pas de réelle limitation en taille, dans la mesure où une mauvaise répartition de l'alimentation en air, qui pourrait se traduire par une augmentation du taux de goudrons, est de toute manière occultée par le principe même de la technologie. Toute fois, il n'existe pas d'installation de très forte puissance et les applications industrielles sont quasiment toutes thermiques. VOLUND au Danemark a couplé un moteur à un gazogène en

<sup>1</sup> Sur base humide

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

contre courant et rencontre beaucoup de problème avec le traitement du gaz et l'élimination des goudrons.

### 3.3.1.2 - Co-courant (downdraft)



Dans les procédés à co-courant (downdraft), le solide et l'agent oxydant se déplacent dans le même sens, de sorte que le gaz produit durant la gazéification est évacué du réacteur près de la zone la plus chaude.

Il en résulte une concentration en goudrons beaucoup plus faible que pour les procédés à contre-courant (crackage thermiques). L'efficacité du procédé qui s'exprime par la conversion du carbone issu du solide en carbone gazeux non condensable est plus élevée pour les procédés à co-courant.

De façon générale, les gazogènes co-courant doivent seulement être utilisés avec des combustibles solides relativement secs (typiquement 15% d'humidité) et à la granulométrie bien précise (quelques  $\text{cm}^3$ ) et exempt de poussières.

Du fait de la faible teneur en goudrons, cette configuration est généralement plus favorable pour la production d'électricité de faible puissance avec un moteur thermique. Une limite maximale en puissance théorique se situe autour de 500 kg/h soit environ 500 kWe. Il est probable que dans la pratique elle soit plus basse (350 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 et du marché potentiel important en Europe mais également dans les pays en voie de développement. Quelques installations fonctionnent depuis plusieurs milliers d'heures dans les conditions particulières il est vrai.

### 3.3.1.3 - Les lits étagés

Les lits étagés dérivent du gazogène DE LA COTTE où la conversion est réalisée en deux étapes et dans deux réacteurs distincts. Le premier réacteur est un réacteur de pyrolyse. Les vapeurs de pyrolyse sont acheminées vers une chambre de combustion. Les gaz chauds produits (1000 à 1100 °C) sont injectés dans le deuxième réacteur où le charbon de bois issu du premier réacteur est gazéifié par la vapeur d'eau et le  $\text{CO}_2$  contenus dans les gaz chauds. Ces réactions sont très endothermiques et utilisent la chaleur sensible produite par la combustion des vapeurs de pyrolyse. Ce principe présente l'avantage, lorsqu'il est bien maîtrisé de produire un gaz très propre (vis à vis des goudrons). Le problème est en effet traité grâce à la combustion séparée des vapeurs de pyrolyse et si le taux de matières volatiles des charbons est bien maîtrisé et les températures de gazéification suffisantes, il n'y a plus de formation de goudrons en aval.

L'inconvénient de ce type de réacteur concerne les problèmes d'écoulement des solides notamment au niveau de la zone de réduction des charbons. En effet, les temps de séjour et les températures à atteindre pour obtenir une conversion complète du carbone sont incompatibles

avec les biomasses cendreuses (fusion des cendres). Ils constituent par contre une excellente solution à la gazéification du bois et de ses dérivés.

### 3.3.2 - Procédé à lit fluidisé

Les procédés à lit fluidisé nécessitent un broyage grossier du combustible pour l'amener à une granulométrie de 2 à 5 mm. La fluidisation améliorant très sensiblement les échanges thermiques, le combustible introduit est rapidement chauffé jusqu'à la température du lit, permettant le dégagement des matières volatiles qui sont craquées et oxydées avant de quitter le gazéifieur. Le gaz contient donc généralement des hydrocarbures légers, mais peut également contenir des composés organiques ou aromatiques plus lourds, en faible quantité. La température du lit doit impérativement rester inférieure au point de ramollissement des cendres pour éviter leur agglomération. La température de fonctionnement est donc de l'ordre de 850 à 1 000°C. Les cendres extraites en continu ou périodiquement du lit, contiennent quelques pour cent de carbone imbrûlé. Elles doivent donc subir une combustion du résidu carboné pour pouvoir éventuellement être valorisées. Les cendres volantes sont majoritairement récupérées dans une batterie de cyclones, et peuvent être réintroduites dans le lit fluidisé pour en améliorer le rendement.

Les procédés en lit fluidisé peuvent être classés en trois catégories en fonction de la vitesse de fluidisation :

- les lits fluidisés denses (bubbling fluidisation bed)
- les lits fluidisés circulants (circulating fluidisation bed)
- les lits entraînés (entrained fluidisation bed)



Ces procédés ont été largement développés pour la combustion et la gazéification du charbon et pour le secteur papetier. Les travaux sur la gazéification de la biomasse ont largement bénéficié de ces expériences ce qui explique aussi l'avance technologique des pays scandinaves dans ce domaine (cf. photo 6), les travaux ayant été largement soutenus par un secteur industriel puissant.

Photo 6 : Projet BIOFLOW par Sydkraft à Vernamo

#### 3.3.2.1 - Les lits fluidisés denses

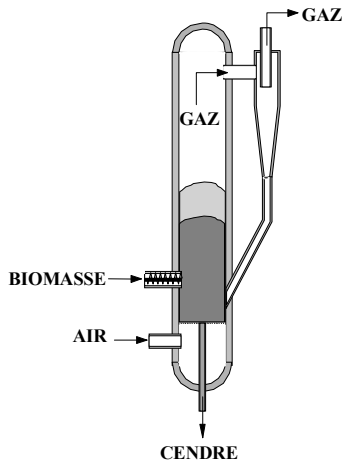
Les lits fluidisés denses se caractérisent par une vitesse de fluidisation relativement faible (1-2 m/s) qui permet la séparation nette des phases solides (lit) et gazeuses, sans entraînement des particules. Dans ces conditions, les particules sont simplement mises en mouvement et brassées au sein même du lit pour assurer de bons transferts thermiques et massiques.

Les réalisations de ce type souffrent cependant d'un certain nombre de contraintes d'exploitation inhérentes à ce mode de fluidisation : problèmes de maintien du niveau du lit lors des variations de charge, d'alimentation et de distribution de combustible, de flexibilité vis à vis des variations des caractéristiques du combustible, etc...

### 3.3.2.2 - Les lits fluidisés circulants

C'est en partie pour répondre aux problèmes précédents que furent développés les lits fluidisés circulants.

La vitesse de fluidisation est ici plus élevée (entre 4 et 6 m/s). Il y a alors expansion rapide du lit et entraînement des particules dans le flux gazeux jusqu'à l'extérieur du réacteur. Par une séparation solide / gaz au moyen d'un cyclone, on fait recirculer les particules solides dans le lit.



De cette façon, on obtient une masse solide continuellement en mouvement dans le réacteur. Une telle configuration permet de limiter les problèmes liés à des variations de charge.

Tous les procédés développés ou en cours de développement à l'échelle de démonstration sont basés sur le principe du lit fluidisé circulant.

Les principaux constructeurs sont Lurgi, TPS, Foster Wheeler (FW) et Carbona. Lurgi et TPS développent des lits fluidisés circulants à pression atmosphérique alors que FW et Carbona ont développé des systèmes sous pression avec des unités de traitement des gaz à chaud. TPS a développé une unité de craquage catalytique des goudrons.

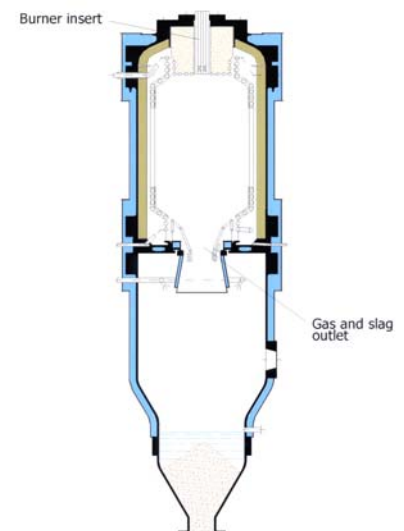
Le procédé FW possède la première unité de démonstration d'un réacteur de gazéification couplé à une turbine gaz (Varnamo) d'une capacité de 6 MWe + 9 MWth. Les technologies Lurgi et TPS sont en phase de développement et sont soutenues notamment par la Commission Européenne.

### 3.3.2.3 - Les lits entraînés

Ils correspondent au cas extrême où la vitesse des particules est proche ou égale à la vitesse des gaz. Ces conditions sont obtenues pour des vitesses de gaz élevées et nettement supérieures aux 6 m/s. On obtient alors un transport qui peut être considéré comme pneumatique.

Bien que cette disposition permette de réduire de façon significative la perte de charge induite par la présence du lit, elle présente l'inconvénient majeur de réduire le temps de séjour nécessaire à la gazéification et de travailler à des vitesses élevées en gaz.

Le combustible est introduit sous forme pulvérulente ou sous forme de boue (selon les procédés) avec des jets de comburants. Le combustible pulvérisé mis en présence d'oxygène développe une flamme très vive. Les débits d'oxygène et de vapeur sont cependant ajustés pour obtenir une réduction des gaz de combustion par le carbone. La température peut atteindre plus de 1700°C dans le cas d'un gazéifieur pressurisé comme c'est le cas du procédé Noell présenté ici. Cette température a plusieurs conséquences importantes :



- Le gaz de synthèse ne comprend pas de composés condensables ou de goudrons car les matières volatiles du charbon sont libérées dans une zone où la température est élevée ce qui permet leur dégradation. Le rendement de conversion du carbone est donc généralement supérieur à 99%.
- Les cendres sont éliminées sous forme liquide.
- Les très hautes températures atteintes nécessitent un refroidissement des réacteurs et du gaz ce qui impose une très grande intégration du procédé pour les valoriser.

### 3.4 – Analyse comparative des procédés

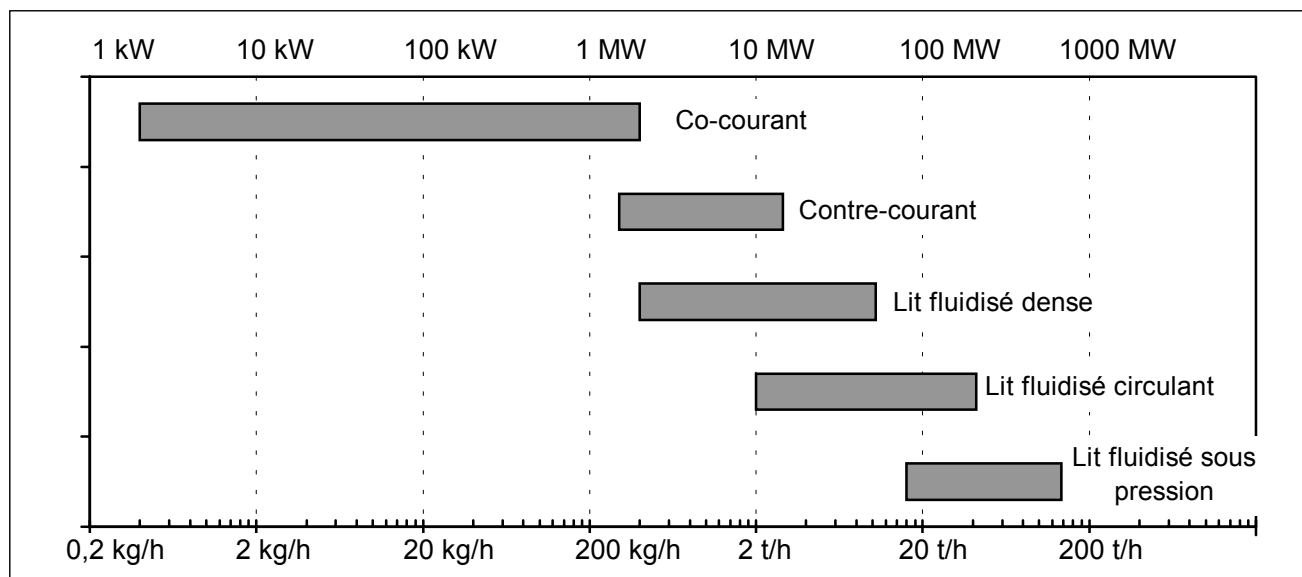
Sur la base des descriptions précédentes, le tableau 9 compare les éléments caractéristiques de la réaction de gazéification des différents types de procédés. Ce tableau met en évidence que la différence la plus significative concerne le temps de séjour du solide dans le réacteur avec ses conséquences sur la flexibilité du procédé vis à vis de la nature de la biomasse. Le temps de séjour de la phase gazeuse est toujours faible, entre 1 et quelques secondes, pour l'ensemble des procédés.

La capacité des unités de gazéification est souvent donnée en tonne de produit entrant ou en volume de gaz produit si bien que les comparaisons ne sont pas toujours possible, c'est pourquoi les unités utilisées ici pour caractériser les capacités sont exprimées en MWth équivalent gaz produit, chaque fois que les données disponibles rendent cette conversion possible (1MWth = 3 600 MJ).

Fonction	Lit fixe	Lit fluidisé	Lit entrainé
Température de réaction (°C)	500 à 1000	900 à 1000	900 à 1700
Temps de séjour de la biomasse	1 à 3 h	5 à 30 min	1 s
Formation des goudrons	Oui	oui	Possible
Aptitude à gazéifier les biomasses à fort taux de cendres	Relativement faible	Modérée	Bonne
Acceptation de fines	Relativement faible	Modérée	Bonne

**Tableau 9** : Comparaison des caractéristiques des familles de procédés de gazéification

Le tableau 10 résume les principaux avantages et les contraintes des différents procédés actuels pour la gazéification de la biomasse. Il met en évidence les critères technologiques qui ont conduit à la dichotomie actuelle, où les petites puissances se sont quasiment toutes tournées vers le lit fixe à co-courant et les unités de grosse puissance vers le lit fluidisé circulant. La figures 6 illustre ce tableau et donne les plages de puissance escomptables en fonction du type de procédé.



**Figure 6** : Puissance des installations envisageables en fonction du procédé de gazéification.

Les tableaux 11 et 12 présentent les constructeurs et fournisseurs de matériel de gazéification de biomasse ainsi que les projets qui, à notre connaissance, ont atteint un niveau de maturité satisfaisant, ce qui ne signifie pas que tous les problèmes soient nécessairement résolus. Ces listes ne sont pas exhaustives, certains travaux menés aux Etats Unis, en Australie ou en Nouvelle Zélande par exemple ont pu être oublié. Ensuite des choix ont été faits et certains constructeurs éliminés parce qu'ils ne nous semblaient pas apporter toutes les garanties de sérieux selon la connaissance que nous en avons. En effet, les informations bibliographiques disponibles sont parfois très partielles, voire subjectives, dans la mesure où il n'est pas rare qu'un procédé soit commercialisé sur les bases d'un simple pilote de laboratoire et de quelques essais paramétriques. EDF en a fait l'amère expérience en son temps en Guyane.

Des fiches présentant les fournisseurs les plus importants sont données en annexe 2. De même les projets les plus significatifs sont présentés en annexe 3.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<b>Co-courant</b>	
- Simple de conception et éprouvé pour certains combustibles	- Combustible homogène et de taille significative
- Simple de construction	- Taille des installations très limitée (350 kWe)
- Taux de conversion élevé	- Possibilité de fusion des cendres dans la grille du réacteur avec blocage
- Gaz relativement propre si combustible approprié	- Faible humidité des combustibles nécessaire
	- Coût de maintenance élevé (usure)
<b>Contre courant</b>	
- Construction simple et robuste	- Température des gaz faible en sortie avec risque de condensation
- Pas de limite de taille	- Gaz très chargé en goudrons
- Rendement thermique élevé	- Inadapté à la production d'électricité
- Plus grande souplesse vis à vis de l'humidité de la matière première	
<b>Lit fluidisé dense</b>	
- Bon contrôle des températures,	- Taille minimale pour être économique (20MWe)
- Vitesses de réaction élevée	- % particules élevé dans les gaz
- Bon contact solide/gaz	- Pertes de C avec cendres par entraînement limitant les rendements
- Construction relativement simple et opérationnelle	- Adapté aux particules de faible taille pour bénéfice optimal des propriétés
- Pas de limite de taille	- humidité faible <20%
- Traitement catalytique dans le lit possible	- sensible à la répartition granulométrique
- % goudrons modéré	
<b>Lit fluidisé circulant</b>	
- Bon contrôle de température et vitesse de réaction	- % de particules dans les gaz élevé
- Grande tolérance par rapport au combustible (type, taille)	- Humidité faible < 20%
- % goudrons dans les gaz modérés	- Taille minimale pour être économique (20 MWe)
- Construction relativement simple et opérationnelle	
- Taux de conversion élevé	
- Pas de limite de taille	
<b>Lit entraîné</b>	
- Bon contact gaz solide et mélange	- Coût préparation biomasse élevé (70% <70%)
- Vittrification des cendres	- Haute température donne gaz de qualité mais faible PCI
- Pas de limite de taille	- Perte de C avec les cendres
- Taux de conversion élevé	- Inventaire des combustibles limité
- Gaz propre par rapport aux goudrons	- Très forte taille minimale (>20 MWe)

**Tableau 10** : Avantages et inconvénients des différents procédés pour la gazéification de la biomasse



**Tableau 11 : Principaux constructeurs de gazéifieur de biomasse.**

Société	Pays	Contact	Tel/Fax	Adresse	Technologie	Objectif	Statut	Mat 1 <sup>ère</sup>	Taille max.	Nb unité	Coût US/K W	Commentaires
AEW (Associated Engineering Works)	INDE	G.M Satyanarayana	91.8819.22950 91.8819.24572	Gamini Compound Box 17 Tanuku 534 211, Andhra Pradesh	Lit fixe co-courant	Chaleur Electricité	Com.	Bois Balle de riz	2500 kWth	200 <sup>3</sup>	225	Principale référence pour la combustion. En cours de développement gazéifieur à balle de riz expérimenté au Burkina mais des problèmes de fonctionnement. Centrifugation des goudrons pour la séparation. Petites installations bien pensées en charbon de bois.
FERCO/ Battelle	USA	S. Weeks	404.831.9355 404.814.0549	FERCO, 950 E Paces Ferry Rd; NE, SU 810, Atlanta GA 30326	Double lit fluidisé	Electricité cycle combiné	Pilote industriel	bois	200 t/j	1		Ensembleur de l'unité de Burlington ayant licence de Battelle. Concept de départ permet difficilement de minimiser les goudrons en sortie du gazo.
FOSTER WHEELER	Fin	R. Lundqvist	358 5229 3314 358 5229 3309	Foster Wheeler R&D Center, SF-48601 Karhula	Lit fluidisé circulants atmosphérique	Cycle combiné	Pilote industriel	Bois, écorces, tourbes	2 à 27 t/h			Fournisseur du gazéifieur pour Sydskraft à Varnamo unité de démo en Suède. Seule unité biomasse complète. Pilote sur déchets municipaux
Kara Energy System	NI	G Prinsen	31.546.87.65.80 31.546.87.05.25	Po Box 570 Plesmanweg 27, 7600 Almelo Netherlands	Lit fixe à co- courant	Cogén.	R&D	Bois et aggloméré		1	2500	Fabricant de chaudière associé à BTG pour la fabrication de gazéifieurs
LURGI umwelttechnik GMBH	Allemagne	J. Albrecht		Lurgi-Allee 5, PO Box 11 1231, 60295 Frankfurt	Lit fluidisé circulants atmosphérique	Electricité Four de cimenterie	Pilote industriel	Tous type de Mat. 1ere	14Mwe + 50MW th			Installation de traitement des gaz fort complexe à efficacité sujette à caution. En gazéification charbon même limite par rapport à ses grands concurrents Texaco et Shell. Lit fixe à aggloméré en construction
Martezo	Fr	Melle Touillet	33.549.37.02.03 33.549.37.39.79	237 route de Paris BP419 86010 Piotier	Lit fixe à co- courant	Cogén.	Com.	Bois	200 Kwe	- 10		Deux unités toujours en opération dans le sud de la France, Ets Raud et Briollet. Opérationnel avec du bois sec et bien calibré.
SRC-GAZEL (UCL)	Be	J.Martin	32.10.47.2200 32.10.45.2692	2 place du Levant B 1348 - Louvain la Neuve	Lit fixe à co- courant	Electricité automatisé	R&D	Bois	160 KWe	1	1200	Projet pilote en cours alimenter à partir de cultures Energétique. Equipe très solide à l'origine de quelques amélioration sensible de l'unité Martezo.
SYSTEM JOHANSSON GAS PRODUCERS	AFRIQUE DU SUD	K.G Johansson	27.11.310.1008 27.11.805.1138	Box 295, Halfway House, 1685 Midrand,	Lit fixe à co- courant	Electricité	Com.	Bois	30-500 KWe	10	750	Implication d'un constructeur de moteur dans le consortium. Cité pour mémoire car pas de données très précise. Cependant l'Afrique du Sud est très active dans ce domaine.
THERMOSELECTS A	USA	D. Runyon	248.689.3060 248.689.2878	201 W. Beaver, Ste 230 Troy MI 48084	Gasification à l'oxygène avec vitrification	Traitement de déchets	Un pilot industriel	Déchets municipaux	50 et 100 000t/j			Adapté aux déchets ménager
TKE	Danemark	T.Koch	45.46.19.15.54 45.46.19.15.38	Stationsvej 4 DK - 4621 Gadstrup	Gasification étagée	Electricité	R&D	Bois Paille	500 kWth	2		Petite entreprise très innovante. Une unité de génération électricité à partir de copeaux de bois en R&D.
TPS TERMISKA PROCESSOR, AB	SUEDE	Eric Rensfelt	46.155.22.13.00 46.155.26.30.52	Studsvik, 611 82 Nykoping,	Lit fluidisé circulant	Cycle combiné	Un pilot industriel	Tout type	Jusqu'à 50 MW	2		Plusieurs projets en cours dont le projet ARBRE. L'une des ingénierie les plus performante en gazéification biomasse.
VOLUND (Babcock Wilcox)	Dk	O.Kristensen	45.75.56.8874 45.75.56.8873	Centre Centervej 2 DK 6000 Kolding	Lit fixe à contre- courant	Chaleur	Com.	Bois Ecorce paille	4-6 MWth	1	3000	Recherche en cours pour la production d'électricité, Une installation en chauffage urbain.. Rachetée depuis par ANSALDO
WELLMAN	UK	R. Mc Lellan	44.121.565.2766	Cornwall Rd, Smethwich,	Lit fixe co-courant	combustion	Com.	Tous type	Jusqu'à 3	Très		Expérience en gazéification du charbon, Intérêt

<sup>3</sup> Non vérifiable

PROCESS ENGINEERING			44.121.555.5651	Warley, West Midlands, UK B66 2LB				hors déchets	m diamètre	nombreuses		récent pour la gazéification de la biomasse avec le groupe Shell. Une installation de démo est programmée.
Xylowatt	SUISSE	H.Sharan	41.52.335.3500 41.52.335.1442	Birchstrasse 6, 8472 Seuzach	Lit fixe à co-courant	Électricité	Com.	Tous types	50 à 2500 kWth	200		Joint Venture avec Decentralized Energy Systems, (DESI) et DASAG (Dasad Energy Engineering ltd)Inde. Uniquement référence indienne

**Tableau 12 : Projets de gazéification de la biomasse.**

Société	Pays	Contact	Tel/Fax	Technologie	Objectif	Statut	Mat 1 <sup>ere</sup>	Taille	Coût kW/installé	Commentaires
AERIMPIANTI (Ansaldo, TPS)	ITALIE	G. Campagnola	39.2.54.97241 39.2.54.97300	TPS/ansalso	Cogénération cycle vapeur + cimenterie	Démo.	Déchets en palette	2 x 15 MWth	-	Voir fiche
ARBRE	UK	K. Pitcher	44.113.224.42384	TPS	Electricité - IGCC	Démo.	TCR	8 MWe	6 000 □	Unité qui devrait démarrée en fin 2001 - réception en cours mais pas d'info. plus précises (voir fiche)
BIOELECTRICA	ITALIE	C. Panzani	39.399.50.53 50.21	Lurgi	IGCC	Démo	TCR	12 MWe		Projet arrêté
BURLINGTON ELECTRIC,	USA	J. Irving	802.865.7482 802.865.7481	FERCO	Thermique + électrique IGCC	Démo.	divers	40 MWth		De grosses difficultés avec les goudrons pour la génération d'électricité (voir fiche)
EVN (Energie Versorgung Nord)	Allemagne	U.Rehling	49.46.316.2147 49.46.316.2148	Lit étagé	Electricité Moteur	Démo.	Bois	50-350 KWe		Unité de démo à expo 2000 1 unité de démo en cogénération. Petit bureau d'étude et ensemblier Technologie plutôt compliquée
LATHI	Finlande	J.Hancala		Foster Wheeler	Cogénération en cycle vapeur	Commercial	Bois et dérivé	40 MWth		Co-gazéification avec charbon 15% en capacité installée de la centrale (voir fiche)
HARBOORE	Danemark	Knud Holm	45.76.14.34.00 45.76.14.36.00	Volund	Chaleur	Démo.	Plaquettes forestières	5 MWth		Modification sur l'unité pour la production d'électricité (voir fiche)
RAUD	France	Mf RAUD		Martezo	Electricité moteur	Commercial	Bois	100 kWe	4 600 □	A accumulé plusieurs dizaines de milliers d'heures
SYDKRAFT VARNAMO PLANT	SUEDE	K. Stahi	46.40.25.59.63 46.40.611.5184	Foster Wheeler	IGCC	Démo	plaquette	6 MWe	4 600 □	Seule référence biomasse à avoir fonctionner en couplage turbine à gaz (voir fiche)
SCHWARZE Pumpe	Allemagne	Thomas Obermeier	49.35.64.69.37.70 49.35.64.69.37.34	Lurgi NOELL BG/Lurgi	Mathanol Electricité	Commercial	Déchets divers	100 000 t 75 MWe	-	Neufs gazéifieurs en fonctionnement - Ancienne unité au charbon reconverte 80% déchets et 20% charbon

### 3.5 - Le traitement des gaz

Les gaz de gazéification sont généralement chargés de nombreux éléments gênants (poussières, goudrons, alcalins, cendres, etc...) qu'il est nécessaire d'éliminer avant valorisation énergétique. La qualité des gaz, qui est la résultante de l'ensemble des réactions intermédiaires citées précédemment, va être dépendante de la conception même du réacteur de gazéification mais aussi de la matière première. En fonction du type d'application, les spécifications seront différentes, le tableau 12 donne les teneurs admises par diverses techniques de valorisation des gaz de gazéification par rapport à ces principaux polluants.

		Moteurs thermiques	Turbines à gaz	Synthèse Méthanol
Pouvoir calorifique minimum	MJ/Nm <sup>3</sup>		4-6	-
Température maximum	°C	le plus bas	450-600	
Particules	mg/Nm <sup>3</sup>	< 50	< 30	< 0.02
Taille des particules	µm	< 10	< 5	
Goudrons	mg/Nm <sup>3</sup>	< 100	0 ou vapeur	< 0.1
Alcalins métalliques	ppb	na	20-1000	
NH <sub>3</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	n.l.	n.l.	< 0.1
HCl	mg/Nm <sup>3</sup>		<1	< 0.1
Composés Soufrés (H <sub>2</sub> S ; COS)	mg/Nm <sup>3</sup>		<1	< 1
CO <sub>2</sub>	% vol.	n.l.	n.l.	<12, (n.l.)

**Tableau 12** : Qualité des gaz nécessaires pour la production d'électricité et la synthèse de méthanol (n.l. = non limité)

#### 3.5.1 – La séparation des particules ou poussières

Les particules proviennent pour la grande majorité de fines de charbon et pour une faible part de cendres. Leur concentration qui s'exprime en mg/Nm<sup>3</sup> dépend pour beaucoup de la nature de la matière première et du procédé de gazéification (lit fixe ou lit fluidisé). La concentration est comprise entre 100 mg/Nm<sup>3</sup> et 100 g/Nm<sup>3</sup>. Le dépoussiérage des gaz se fait de différentes façons.

La plus simple consiste à utiliser des dispositifs classiques (cyclones, filtres à marche, laveurs,...) en sortie du réacteur afin de séparer la phase solide de la phase gazeuse (photo 7). Cette opération ne peut se faire qu'à des températures relativement basses ce qui nécessite le refroidissement du gaz en amont avec la problématique de la condensation des goudrons et la perte d'énergie des gaz, notamment pour les applications en cycle combiné.

Pour éviter cela, la filtration à chaud est une technique nouvelle qui est encore en voie de développement / démonstration pour ces applications biomasse. Elle consiste à utiliser des filtres à chandelle conçus en céramique réfractaire pouvant supporter des températures élevées de l'ordre de 800 à 900°C. Le nettoyage de ces filtres est réalisé en continu par injection pulsative d'un fluide gazeux sous pression à l'intérieur des chandelles (N<sub>2</sub>, gaz de gazéification,...). Ces filtres ont généralement un rendement de filtration extrêmement élevé, supérieur à 99,9%. De ce fait, les efforts se concentrent actuellement sur la réduction de leur coût et sur l'amélioration de leur fiabilité pour un fonctionnement de longue durée. Les recherches portent notamment sur la résistance aux chocs thermiques des éléments filtrants,

ainsi que sur la stabilité chimique à long terme du matériau en atmosphère corrosive (alcalins, soufre, chlore, etc...). Leur coût d'utilisation n'est pas négligeable du fait notamment de la consommation d'azote (150 kg/h à Varnamo).

Un retour d'expérience est en cours sur certaines installations pilotes de plus ou moins grande puissance comme l'installation de Värmano en Suède. Ainsi, deux types de filtres céramiques ont été testés sur l'unité et ont montré des faiblesses dans leur utilisation bien avant leur fin de durée de vie normale (1500h/5000h). Cependant, l'amélioration de la qualité et des types de céramiques, très rapide dans ce secteur, pourrait offrir une solution durable pour la filtration haute température des gaz de gazéification.

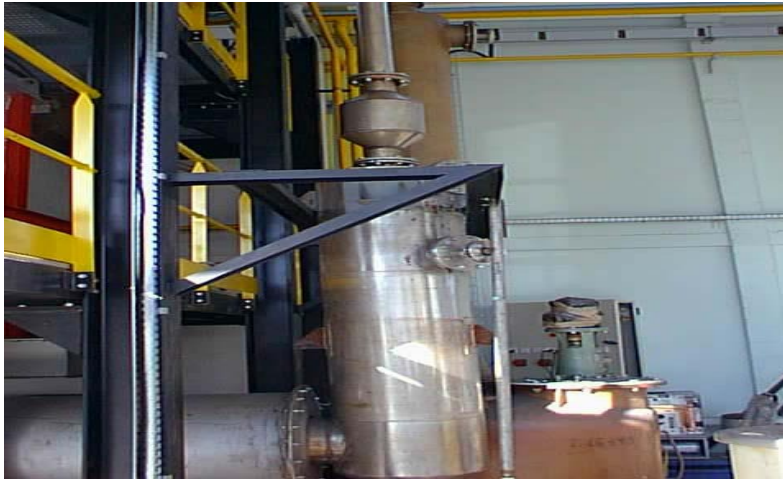


Photo 7 : Laveur avec dévésiculeur

La taille des particules et leur répétition granulométrique joue un rôle important dans l'efficacité de filtration et de régénération après nettoyage. Une connaissance poussée des gaz à traiter est donc nécessaire pour un choix judicieux. Leur coût et leur complexité de mise en œuvre les prédisposent plus spécifiquement aux grosses puissances.

Devant les problèmes rencontrés avec les filtres céramiques, des filtres métalliques produits à partir de poudre d'acier inoxydable ont été testés et ont montré de bonnes performances. Aucune altération n'est apparue après quelques centaines d'heures de fonctionnement. Les températures de fonctionnement sont cependant inférieures ce qui nécessite un refroidissement préalable des gaz jusqu'à environ 400 °C. A cette température les métaux alcalins ne sont plus supposés être sous forme gaz et devraient donc pouvoir être éliminés avec les particules. Il convient cependant d'être prudent sur leur utilisation à long terme et en filtration de gaz issus de combustibles à plus fort taux de composés tels que le soufre, avant de pouvoir garantir leur tenue dans le temps, notamment vis à vis de problèmes de corrosion qui pourraient apparaître.

### **3.5.2 – Elimination des goudrons**

Les goudrons contenus dans les gaz de gazéification sont encore très mal définis dans la littérature et une tentative de normalisation est en cours au travers d'un projet européen dénommé Tar protocol auquel participe le Cirad. La concentration en goudrons est fortement variable en fonction du procédé retenu, de la matière première, de la disposition des entrées de l'agent gazéifiant. Des valeurs allant de 10 mg/Nm<sup>3</sup> à 150 g/Nm<sup>3</sup> sont généralement admises comme le montre le tableau 14.

Plusieurs méthodes d'épuration des goudrons sont utilisées ou en cours de développement. Elles ont tous basées sur les procédés suivants :

- **Le traitement thermique** : Les goudrons sont décomposés à haute température (>1000°C) par simple craquage. Des essais menés par VTT sur un lit fluidisé à partir de tourbes, ont montré que la concentration en goudron du gaz pouvait être ramenée à des niveaux comparables aux lits fixes à co-courant avec un crackage thermique conduit entre 800 et 1000 °C. Cela signifie qu'une augmentation de la température de sortie des gaz en lit fluidisé peut permettre une certaine réduction du niveau de goudron mais aura des répercussions au niveau des rendements. Le crackage thermique peut intervenir de différentes manières, en augmentant le temps de séjour des gaz à la température de sortie des gaz, en provoquant le contact entre les gaz et une surface chaude (ce qui n'est pas sans affecter les rendements et n'offre qu'une efficacité relative du fait d'un mauvais mélange), en provoquant une oxydation partielle des vapeurs par l'introduction d'air ou d'oxygène dans les gaz. Cette dernière solution est assez efficace mais va également affecter les rendements.
- **Le craquage catalytique** : La décomposition des goudrons est réalisée par l'action simultanée de la température (800°C) et d'un catalyseur solide (dolomie en général). Les tests réalisés ont montré une très grande efficacité de cette solution avec des performances supérieures à 99%. La plupart des solutions adoptées situent le crackage catalytique dans un réacteur extérieur au réacteur principal de gazéification. Le catalyseur peut cependant être incorporé au lit (Varnamo), son efficacité est alors moindre. Le problème principal des catalyseurs réside dans leur coût, par suite d'une désactivation assez rapide par encrassement et contamination. Les expériences industrielles de longues durées ne sont cependant pas encore suffisantes pour avoir le recul nécessaire.
- **Le lavage humide** : 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. Ils sont en particulier dus à la présence d'aérosol dans les gaz. Les filtres électrostatiques seraient une excellente solution à ce problème (leur efficacité a été testée par le CIRAD sur des fumées de pyrolyse) mais leur coût de mise en œuvre limite leur application. Un système classique comprend une étape de refroidissement du gaz suivie d'un pulvérisateur haute performance qui favorise le contact entre les particules et les gouttelettes et qui, en augmentant leur taille va favoriser leur récupération. La dernière étape est constituée d'une tour qui permet de réduire la vitesse des gaz et d'augmenter le temps de séjour des gaz pour rééquilibrer le système. Un niveau inférieur à 20 mg/Nm<sup>3</sup> de goudron et 10 mg/Nm<sup>3</sup> de poussières est réalisable par ce type de procédé. La production d'eau polluée peut être importante et son traitement, obligatoire, occasionner un coût prohibitif.
- **La condensation forcée** : Le gaz traverse un échangeur convectif assurant la condensation des goudrons (sans contact direct) et la récupération d'énergie thermique. Ce procédé est en cours de tests par le CIRAD dans le cas d'un projet européen.

### 3.5.3 – L'élimination des alcalins

Les métaux alcalins sont responsables de corrosion sur les pales de turbine provoquant une altération du surfaçage. Il est communément admis que leur élimination est obligatoire, même s'il n'y a cependant pas eu d'essais sur les nouveaux alliages développés et utilisés en surfaçage.

Ces métaux sont présents sous forme vapeur dans les gaz à haute température et ne seront éliminés que si le gaz est refroidit. La température maximum qui est admise pour la condensation de ces produits est d'environ 600 °C. Ils sont donc potentiellement récupérables avec les particules sur les filtres haute température . Cependant ces produits peuvent occasionner des altérations des céramiques et des dépôts difficiles à éliminer ainsi que des corrosions. Les laveurs constituent une solution efficace à leur élimination.

Les travaux dans ce domaine sont encore limités et les principaux d'entre eux concernent la combustion de biomasse ou les problèmes sont sensiblement différents.

Le tableau 13 rassemble les caractéristiques d'utilisation des différents systèmes d'épuration ainsi que le taux de réduction envisageable (Hasler).

	Temp.	Particules	Goudrons	NH <sub>3</sub>	HCl	H <sub>2</sub> S
Craquage catalytique	900 ° C		>95%			
Filtre céramique						
Filtre à manche	App. 200°C	60-85%	0- 25%			
Filtre à lit de sable	10 - 20°C	70-95%	60-95%	>95%	90%	80-95%
Tour de lavage	50-60°C	70-90%	10-25%			
Venturi			50-90%			
Atomiseur rotatif	<100°C	95-99%			90%	>95%
Dépoussiéreur électrostatique	40-50°C	>99%	0-60%			

**Tableau 13** : Taux de réduction des différents systèmes d'épuration des gaz.

La qualité des gaz constitue le principal verrou technologique actuel de la gazéification.

### 3.6 - Les applications de la gazéification

Le gaz produit par gazéification de la biomasse est un mélange de CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et d'hydrocarbures lourds plus ou moins dilués avec de la vapeur d'eau et de l'azote. Son pouvoir calorifique (PCI) varie de 3,5 à 6 MJ/Nm<sup>3</sup> selon le procédé et les agents de gazéification utilisés (air, oxygène, vapeur d'eau,...). Selon ses caractéristiques (PCI, composition,...) il peut être utilisé de façon fort différente. Ne seront retenues ci-après que les options relatives à la production d'électricité même si les applications thermiques sont assez largement éprouvées.

### 3.6.1 - La combustion directe

Le gaz peut être brûlé dans une chaudière produisant de la vapeur haute température et haute pression valorisée dans un groupe turbo-alternateur pour produire de l'électricité. L'avantage de cette solution par rapport à la combustion directe est la possibilité d'un contrôle plus efficace de la combustion de la matière première et des émissions. C'est une solution qui est actuellement utilisée en centrale à charbon. La seule contrainte à l'utilisation des gaz de gazéification dans les chaudières peut résulter d'un taux élevé de soufre et de chlore dans les gaz (selon les combustibles) qui pourrait provoquer des corrosions. Les expériences menées aux Etats Unis ou dans les pays scandinaves en co-combustion montrent que quelque soit le mode d'alimentation envisagée (brûleur séparé ou mixte,...) il est difficile de substituer plus de 10% du charbon. La gazéification préalable de la biomasse pourrait permettre de lever ce verrou et d'accroître la substitution. Cependant, les centrales à charbon françaises étant des équipements de production de pointe, cette filière est donc totalement inenvisageable pour des raisons d'approvisionnement.

### 3.6.2 - La combustion dans les moteurs

Si l'on dispose d'un gaz pauvre propre, il est tout à fait possible de l'utiliser dans les moteurs à combustion interne. Rappelons en effet qu'un gaz chargé d'impuretés (goudrons, oxydes, eau,...) peut provoquer des altérations graves des pièces du moteur (corrosion des conduits de gaz, collage des soupapes, grippages des pistons,...). Les groupes électrogènes moteurs combinent un moteur gaz ou diesel et un générateur 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.

Les moteurs étant prévus initialement pour fonctionner avec de l'essence ou du gasoil, il est nécessaire d'y effectuer des modifications afin de les adapter aux caractéristiques du gaz pauvre, qui sont :

- PCI faible de l'ordre de 4 MJ/kg alors que pour l'essence il est de 44 MJ/kg ;
- Forte résistance à la détonation qui permet au gaz de supporter des taux de compression de 12 à 14 ;
- Lenteur de combustion due à la faible proportion de composants combustibles dans le gaz (30% de CO et d'H<sub>2</sub> pour 70% de CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub> environ pour la gazéification à l'air) ;
- Le rapport stœchiométrique nécessaire pour la combustion du gaz pauvre est de 1,3 kg d'air /kg de gaz (il est de 15 pour l'essence).

Les groupes électrogènes interconnectables sont des ensembles très compacts et modulaires disponibles dans toutes les gammes de 50 kW à 5MW avec des performances bien établies. Les gaz peuvent être utilisés dans :

- Les moteurs diesel "dualfuel" pour des puissances allant de 100 kW à plusieurs MW, c'est le type de moteur qui est le plus intéressant pour utiliser le gaz pauvre de gazogène dans la mesure où le diesel vient suppléer aux carences éventuelles de qualité du gaz. 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. Environ 80% de l'énergie qui serait consommée par un diesel de même puissance est fournie par le gaz de gazéification.

- Les moteurs à gaz sont les moteurs à allumage commandé par étincelle électrique. Ils sont dérivés la plupart du temps de moteurs à essence, mais il existe une gamme industrielle dérivée de moteurs diesel modifiés. A cylindrées égales, les puissances de moteurs à gaz pauvre à allumage commandé sont de l'ordre de 50% de celle des moteurs à essence et de 30% de celle des moteurs diesel non suralimentés.

### 3.6.3 - Les turbines à gaz

Une turbine à gaz (TAG) est constituée d'un compresseur d'air, d'une chambre de combustion et d'une turbine. Une grande variété de combustible peuvent être utilisés dans les TAG : méthane, gaz de décharge, diesel,... et la co-combustion est possible.

Les combustibles sont mélangés à l'air de combustion et brûlé sous pression pour fournir des gaz à haute température. Ces derniers sont détendus dans la turbine qui entraîne le générateur et le compresseur. Le rendement d'une TAG est très sensible à la température. Le rendement nominal d'une TAG d'une puissance inférieure à 10 MW varie de 29 à 34% mais ces chiffres chutent rapidement quand les conditions de fonctionnement s'éloignent des conditions optimales. C'est pour cette raison que les TAG sont utilisées à une puissance déterminée même si elles sont en mesure de satisfaire des variations de facteur de charge.

Les émissions d'oxyde d'azote constituent la principale limite des TAG. L'injection d'eau ou de vapeur est le système de contrôle de ces émissions le plus souvent mis en œuvre.

Il est possible de brûler le gaz de gazéification dans une TAG et lorsque ce cycle à gaz est associé à un cycle à vapeur, nous obtenons alors un cycle combiné. On marie ainsi les possibilités de travail à haute température de la TAG et celles de la vapeur à basse température. Le rendement de la TAG étant d'environ 30%, le rendement global du système peut atteindre 50%. Les perspectives d'amélioration du rendement de la production d'électricité offertes ont conduit les constructeurs à privilégier cette voie à ce jour en Europe (IGCC). L'installation de Varnamo en Suède, est la seule unité à avoir accumuler quelques milliers d'heures de fonctionnement avec une turbine à gaz couplée.

Il faut remarquer que dans les systèmes turbines à gaz classiques, on arrive à un rendement net d'environ 40%, la limite supérieure étant bien sûr donnée par la loi de Carnot qui a établi que le rendement ne pouvait pas dépasser  $\frac{T_2 - T_1}{T_1}$  ( $T_2$ ,  $T_1$ , températures froides et chaudes des sources de chaleur).

Le cycle de Rankine, cycle de base applicable au système vapeur-turbine à vapeur, est beaucoup moins performant que le cycle de Carnot.

Si le pouvoir calorifique du gaz est supérieur à 4 MJ/Nm<sup>3</sup> et la qualité satisfaisante il n'y a pas de problème à utiliser les gaz de gazéification dans une turbine. Cependant, le faible pouvoir calorifique de ces derniers se traduit par un volume de gaz injecté à la turbine important (ballast). Cela peut provoquer un problème de déséquilibre entre le débit du compresseur et le débit de la turbine et nécessiter de modifier le turbo-chargeur pour adapter le compresseur à la turbine. Ainsi, l'utilisation des turbines à gaz en gazéification n'est pas aussi trivial qu'il n'y paraît.



Le choix entre une solution moteur ou turbine n'est pas évident et il n'y a pas de règle établie pour des unités de puissance installée comprises entre 5 et 30 MWe. Les moteurs sont moins exigeants que les turbines en terme de qualité de gaz et sont plus performants que les turbines à gaz simple. Par contre les solutions en cycle combiné sont beaucoup plus compétitives mais évidemment beaucoup plus complexes.

### **3.6.4 - Les piles à combustible**

La pile à combustible est un système de production d'électricité basé sur le principe inverse de l'électrolyse. Compte tenu de son intérêt futur nous avons choisi d'en rappeler ici les caractéristiques, même si la qualité des gaz de gazéification est encore très loin de satisfaire aux critères de qualité encore mal définis d'une pile à combustible.

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.

Quand un électrolyte acide est utilisé, le gaz hydrolyse 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 et l'eau  $H_2O$  de l'électrolyte pour former les ions hydroxydes  $OH^-$  chargés négativement.

#### ***Réaction***

Enfin les ions hydrogènes et hydroxydes 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 traditionnels, limité 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% à 60%.

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 et l'effet de taille ne joue pas de rôle ce qui favorise les projets d'installations à faible puissance, entraînant des faibles coûts d'investissement.

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 effluents dans l'environnement. Ces qualités, combinées avec un niveau très faible de bruit et de vibration dû à l'absence de grosses machines tournantes, favorise la décentralisation des installations.

Le tableau 14 donne la classification des types de piles à combustible, chacune étant définie par la nature de l'électrolyte, les caractéristiques techniques et les prévisions de commercialisation différentes. La pile à acide phosphorique PAFC est la plus industrielle.

TYPE	PILE POLYMERE - (PEFC)	PILE A ACIDE PHOSPHORIQUE - (PAFC)	PILE A CARBONATE FONDU (MCFC)	PILE A ELECTROLYTE SOLIDE (SOFC)
ELECTROLYTE	Membrane polymère	Acide phosphorique	Carbone fondu	Oxyde de zirconium
IONS ACTIFS	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	O <sup>-</sup>
TEMPERATURE	80°C	200°C	600 - 700°C	700 - 850°C
COMBUSTIBLE	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO, H <sub>n</sub> , C <sub>m</sub>	H <sub>2</sub> , CO, H <sub>n</sub> , C <sub>m</sub>
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 ELECTRIQUE	40%	> 40%	> 46%	> 50%

**Tableau 14** : Types de piles à combustible

Leur très haut rendement les rendent particulièrement attractive dans un ensemble en génération d'électricité avec gazéifieur. 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 précédemment à savoir la qualité des gaz.

### 3.6.5 - Les rendements de conversion

Il est extrêmement difficile de parler de rendement de conversion de gazéification et de comparer les procédés les uns par rapport aux autres dans la mesure où ces rendements sont extrêmement liés à la matière première, qu'à ce jour, les installations de référence sont peu nombreuses, qu'aucun test comparatif n'a été réalisé, qu'ils sont bien évidemment fonction des matériels et procédés mis en œuvre (peut-on comparer un moteur diesel avec une TAG en cycle combiné) et enfin que les résultats qui sont publiés, sans être erronés, ne sont pas toujours de la plus grande transparence.

Dans un même ordre d'idée, l'aspect rendement thermique ou électrique, n'est certainement pas le critère le plus déterminant (toute chose étant égale par ailleurs) dans la mesure où les procédés présentent des spécificités qui les rendent plus facilement compatibles avec un type de biomasse (ressource disponible) et qu'en conséquence de quoi, le choix final pourra s'orienter vers un procédé moins « performant » techniquement, mais dont les performances économiques seront bien supérieures.

Cette notion de rendement est aussi fonction de l'application finale. Ainsi le rendement thermique d'un lit fixe à co-courant va varier entre 60 et 80 % alors qu'un lit fixe à contre courant, dont une bonne part de l'énergie des gaz est utilisée pour le séchage et la pyrolyse de la matière première, à un rendement compris entre 70 et 90%. Cependant dans le premier cas, la production d'électricité via la combustion du gaz dans un moteur a été démontrée alors que

l'utilisation pour la génération d'électricité des gaz issus d'un contre courant est très problématique.

Toutefois, le tableau 15 fixe les ordres de grandeur de rendements électriques escomptables sur des installations de capacité supérieure à 50 MW.

	Rendement électrique net (%)
Gazéification en co-combustion	27.8
Gazéification en cycle combiné	35.5
Chaudière à grille conventionnelle	25

**Tableau 15** : Rendement escomptable pour une centrale biomasse en cogénération (Lindman)

Le tableau 16 présente les performances mesurées sur l'installation de Varnamo pour des tests réalisés à partir d'un combustible constitué à 40% de bois et 60 % d'écorces et fonctionnant à un facteur de charge de 77 %.

Débit combustible kg/h	3276
PCI combustible MJ/kg	16.5
Energie combustible entrant MWpci	15
Facteur de charge %	77
Production électrique TAG MWh	3.25
Production électrique vapeur MWh	1.36
Production électrique totale MWh	4.61
Consommation auxiliaires MWh	0.39
Rendement électrique (15°C %)	28.1
Rendement électrique calculé (0 °C , 100 % charge) %	31.8
Production thermique MWh	11.3
Rendement global (à 15 °C) %	75
Rendement global calculé (0 °C , 100 % charge) %	81

**Tableau 16** : Performances de l'installation de Varnamo (Sydckraft)

Le CIRAD et EDF ont réalisé, il y a quelques années, des tests de performance comparatifs sur des petites unités de gazéification en lit fixe de divers constructeurs. Seuls les résultats mesurés sur des installations Chevet et Martezo, qui proposent encore du matériel, sont donnés dans le tableau 17.

<b>Gazéifieur</b>	<b>Chevet</b>	<b>Martezo</b>
Moteur	Agrom 40 kW	Mercédès 118 kW
Combustible	Bois	Bois
Débit combustible (kg/h)	50	75
Humidité combustible (%)	10.1	13.3
PCI combustible (MJ/kg)	16.76	15.33
Débit gaz moteur Nm <sup>3</sup> /h	110.9	174
PCI gaz sec (MJ/ Nm <sup>3</sup> )	4.47	4.99
Durée de la mesure (h)	1	2
Air gazéification/air stœchiométrique	0.41	0.35
Puissance moteur (kWe)	32.5	58.3
Rendement gazéification (gaz sec bois humide ) (%)	54.7	66.4
Rendement moteur (%)	25.4	27.4
Rendement total (bois humide) (%)	13.9	18.2
Consommation spécifique	1.54	1.29

**Tableau 17** : contrôle de performances sur deux installations de production d'électricité en lit fixe à co-courant. (EDF)

Les meilleurs résultats enregistrés ont été obtenus à partir de bois d'épicéa sur l'installation Martezo et sont de 21.7 % de rendement électrique. Cependant ces essais mettent également en évidence une sous utilisation très importante de l'installation.

### **3.7 – ANALYSE CRITIQUE ET RECOMMANDATIONS**

La technologie de gazéification offre l'opportunité d'utiliser les équipements modernes de production d'électricité tels que les turbines à gaz pour la cogénération de chaleur et d'électricité infiniment plus performantes que les solutions traditionnelles peu efficaces issues des cycles à vapeur. Ses principaux avantages peuvent être résumés ainsi :

- Rendement électrique élevé avec les turbines à gaz et les moteurs, même sur de petites puissances Cette amélioration des rendements permet une augmentation de tailles des installations biomasse sans accroître le rayon d'approvisionnement ce qui a un impact significatif sur les coûts d'investissements et d'approvisionnement.
- potentiel important d'utilisation en cogénération lié aux faibles puissances relatives des installations qui peuvent mieux s'adapter à la demande vapeur. Le marché en Europe, mais surtout en milieu tropical, est considérable.
- diminution significative des coûts de réduction des émissions du fait des faibles volumes de gaz mis en jeu par rapport à la combustion. La gazéification est une technique d'autant plus intéressante que l'on attache un grand intérêt aux problèmes de pollution et d'environnement. En effet, au delà de l'aspect substitution, avec ces procédés il est possible de mieux contrôler les émissions. Ensuite, le rendement électrique de la cogénération en cycle combiné pour les installations pre-industrielles actuelles rend la filière infiniment plus performante que la solution traditionnelle de production de chaleur et d'électricité par combustion directe.

Cependant, les techniques de gazéification de la biomasse sont à la fois complexes et variées, elles font appel à un savoir faire qui ne s'improvise pas et qui manque encore de recul à la fois sur le plan scientifique et technique. Les principales difficultés rencontrées résultent directement des propriétés du combustible à savoir les biomasses. Par ailleurs, on peut remarquer l'absence de l'industrie française dans ce domaine aujourd'hui, alors qu'un travail énorme avait été accompli dans les années 80 par le Cemagref, Creusot Loire,... sous l'impulsion de l'AFME notamment et même s'il est hors de propos d'en faire état ici, il convient de le signaler.

### **Un ensemble de réactions et des matières premières qui exigent un compromis.**

Bien que le contact gaz solide/combustible soit d'une grande importance, le constructeur de gazéifieur doit prendre en compte d'autres facteurs parmi lesquels les caractéristiques de la biomasse sont certainement des plus importantes.

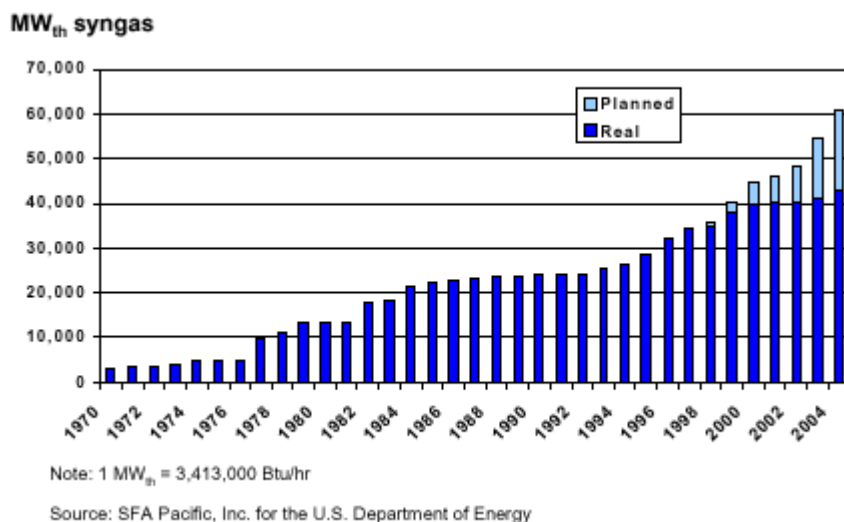
La biomasse, en fait il conviendrait de parler des biomasses, est un combustible dont les propriétés varient dans de fortes proportions. Parmi celles qui ont une influence directe sur le choix du procédé, nous pouvons citer : l'humidité, la teneur en cendres, la température de fusion et de ramollissement des cendres, la granulométrie, la dureté,... L'importance relative de ces caractéristiques varie d'un procédé à l'autre. Ceci revient à dire **que l'on peut obtenir un rendement optimum pour une biomasse donnée avec un procédé de gazéification donné mais changer de combustible revient à modifier des conditions opératoires et il est difficile alors d'atteindre cet optimum.** Avec des biomasses d'origines diverses, le choix du procédé devient critique compte tenu des particularités et des rendements de gazéification des différents procédés, des traitements annexes,... Cet aspect ne milite pas dans le sens d'une diminution des coûts et doit rendre très suspicieux dès lors qu'un procédé se réclame d'une grande universalité.

La totalité des sous produits des industries du bois sera, en effet, totalement utiliser d'ici 2003 (fig.1). Le gisement réel mobilisable en France se situe donc en forêt, voir au niveau des déchets industriel et ménager. Ces matières premières étant soient chères soient complexes, il nous semble souhaitable que la France s'engage clairement dans le soutien qu'elle doit apporter à la bio électricité et notamment, à notre sens, en favorisant l'amont dans la définition des prix du rachat du kWh. La France doit également pouvoir s'engager dans la démonstration industrielle de procédé en partant de l'expérience de Varnamo à laquelle EDF a participé, afin d'assurer le transfert de connaissance. L'utilisation de biomasse forestière pour la production d'électricité en cycle combiné est la seule option technique qui permettrait de respecter nos engagement vis à vis du protocole de Kyoto et de valoriser nos forêts avec un impact fort sur l'environnement.

### **Des progrès considérables sur les quinze dernières années dont va pouvoir bénéficier la gazéification de la biomasse**

SFA Pacific Inc. qui a réalisé une étude pour le DOE américain a recensé 329 projets de gazéification (tout combustible confondu) représentant au total 754 gazéifieurs (incluant de nombreuses petites unités et des installations arrêtées voire démantelées). Parmi ceux-ci, 161 unités sont en fonctionnement ou seront réalisées prochainement représentant une capacité installée d'environ 60 GWth pour 414 gazéifieurs. Parmi ceux-ci, seulement 128 unités sont en fonctionnement représentant 366 gazéifieurs pour une capacité totale installée de 42 GWth.

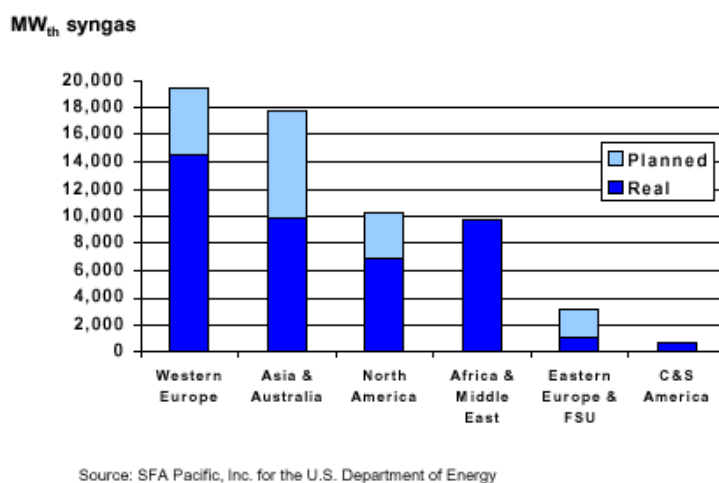
Toujours selon SFA Pacific, il y aurait à ce jour 33 projets sérieux, en cours de négociation dans le monde, pour une capacité totale de 18 GWth et dont la grande majorité concernerait la production d'électricité. Les 30 plus grosses unités commerciales référencées sont données en annexe 3, comme on peut le constater, aucunes de ces installations ne concernent la biomasse.



**Figure 7 :** Capacité installée cumulée mondiale des unités de gazéification.

La figure 7 présente la courbe cumulée de la capacité installée dans le monde. La courbe ascendante depuis le milieu des années 90, met clairement en évidence l'intérêt croissant pour cette technologie. La croissance actuelle concerne majoritairement la production d'électricité. Les installations de référence dans ce domaine, en biomasse, en sont encore à la démonstration.

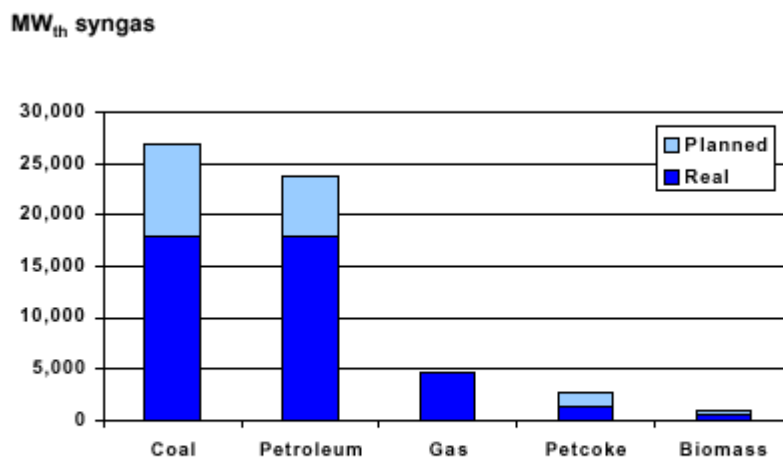
L'appui important et renouvelé apporté à la recherche et à la démonstration par les programmes Joule, Thermie et FAIR et énergie au niveau du 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> PCRD vont dans le même sens (70 M€ dans le cadre du 4<sup>e</sup> PCRD pour la gazéification).



**Figure 8 :** Capacité installée en gazéification par grande région du monde.

La tendance internationale va dans le sens d'une multi-fonctionnalité des installations, gaz de synthèse et cogénération afin d'améliorer le faisabilité économique des unités. Il est également intéressant de constater que l'Europe arrive assez largement en tête en matière de capacité installée, notamment bien avant les Etats Unis, comme l'illustre la figure 8. Les unités européennes les plus récentes sont des investissements très importants réalisés par les compagnies pétrolières pour le traitement des résidus de raffinage. Les gaz qui en résultent sont généralement de bonne qualité, ce qui permet sans problèmes particuliers la production d'électricité en cogénération associé à la production d'hydrogène.

Ces chiffres qui montrent bien le niveau de maturité incontestable de la technologie de gazéification ne doivent cependant pas faire oublier que ces installations ne concernent que faiblement des unités biomasse comme le montre la figure 9.



Source: SFA Pacific, Inc. for the U.S. Department of Energy

**Figure 9** : Unités de gazéification par type de combustible.

Cependant, même si le charbon et les résidus de raffinerie sont les combustibles dominant en gazéification, la biomasse fait son apparition et des progrès significatifs ont été réalisés dans le domaine sur les dix dernières années qui ont poussé l'Union Européenne à lancer un appel d'offre spécifique en 1993 qui devrait aboutir à la réalisation de quelques projets commerciaux dont le projet ARBRE en Angleterre. Signalons, près de Dresde (Allemagne) la société Schwarze Pumpe qui produit du méthanol à partir de gazéification de diverses matières premières. Lurgi, et plus récemment BG/Lurgi, après avoir fonctionnées plusieurs dizaines d'années au charbon, ont été reconverties pour un fonctionnement à 80% déchets et 20% charbon sans problème particulier. Elle traite 400 000 t de déchets par an.

### **Une démonstration industrielle encore à réaliser pour la gazéification de la biomasse avec application électricité.**

Il convient de distinguer au niveau de la gazéification de la biomasse, les installations et procédés de petite et grosse puissance.

### - Installation de petite puissance (< 0,2 MWth)

Le nombre d'acteurs est fort limité. Si l'on exclu la multitude "d'industriels occasionnels", le nombre de fournisseurs susceptibles de garantir leur matériel est extrêmement limité. Ceux disposant d'une réelle expérience industrielle sont encore plus rares et à ce niveau les établissements Martezo en France sont vraiment une exception. Il est extrêmement regrettable que cette entreprise n'ait pas su capitaliser sur ce savoir faire et fait évoluer son matériel.

Pour la production d'électricité, on peut voir émerger quelques constructeurs en Europe GAZEL (BE) ou TKE (DK), dont la démarche est basée sur une approche plus scientifique, à opposer aux initiatives du début des années 80 qui ont le plus souvent simplement consisté à remettre au goût du jour des procédés issus des années 40. Les procédés proposés restent néanmoins perfectibles et pour la quasi majorité d'entre eux, centrés sur des lits fixes à 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 incompatible avec une utilisation fiable et simple de moteur pour la production d'électricité. Le recul industriel fait, de plus, encore défaut compte tenu du faible nombre de réalisations existantes.

Il nous semble qu'à ce niveau il est nécessaire de revisiter l'approche technologique et d'apporter des solutions réellement innovantes susceptibles de fiabiliser la technologie. Les initiatives internationales auxquelles il est souvent fait référence sont plutôt orientées démonstration que recherche. De plus, à quelques exceptions près, (BTG, UCL,...), les centres de recherches actifs en gazéification se concentrent beaucoup plus sur les lits fluidisés, laissant supposer que le lit fixe a atteint un bon degré de maturité. Il n'en est malheureusement rien au regard du faible nombre d'unités en fonctionnement dans le monde (si l'on fait abstraction des installations "de crise" en fonctionnement en Asie). L'implication de PME-PMI dans ce secteur, avec leur faible capacité en matière de R&D n'a certainement pas contribué à faire évoluer significativement ces technologies alors que, à notre sens, des opportunités existent.

Le marché de ces installations semble malgré tout plutôt orienté export (pays tropicaux notamment) que réellement hexagonal.

### - Installation de grande puissance > 5 MWth

Les succès rencontrés au niveau des lits fixes concernent essentiellement les installations thermiques, en Finlande (F.W) et au Danemark (VOLUND) pour ne citer qu'elles.

Après quelques 30 ans, la gazéification de la biomasse en lit fluidisé a atteint un niveau technologique satisfaisant. L'unité de VARNEMO en Suède (6 MWe + 9 MWth) sur la base de la technologie Foster Wheeler en cycle combiné a largement contribué à crédibiliser la filière après quelques milliers d'heures de fonctionnement et beaucoup de difficultés, il faut l'avouer.

**La co-gazéification** a démontré sa faisabilité et son intérêt sur les projets autrichiens de Zeltweg (10 MWth) avec Austrian Energy et finlandais de Lahti (60 MWth) avec Foster Wheeler. Tous les deux sur la base de lit fluidisé circulant. Des progrès significatifs ont également été accompli sur le procédé Batelle au niveau de l'installation de Burlington (60 MWth) dans le Vermont, USA. Cependant, compte tenu de la nature des centrales à charbon



d'EDF (fonctionnement en pointe) la co-gazéification ne semble pas avoir d'avenir immédiat en France.

**Pour la production d'électricité**, si la solution IGCC est perçue comme le concept idéal à partir de la biomasse, son développement et sa mise en œuvre reste cependant complexe dans la mesure où elle implique la maîtrise d'un ensemble d'équipements, depuis la préparation du combustible, jusqu'à la génération d'électricité. Elle est cependant maîtrisée par LURGI, TEXACO et SHELL sur la base de lignite, de charbon ou de résidus de pétrole qui ne sont pas réputés être des combustibles faciles. Les obstacles de la biomasse sont donc bien avant tout économiques.

A partir d'un appel d'offre spécifique lancé par l'Union Européenne en 93, trois projets ont été retenus, deux seulement sont en cours de réalisation. Le projet Arbres (8 MWe), qui associe au procédé TPS un schéma global avec fourniture de matières premières à partir de cultures en TCR de saule, est le plus avancé et devrait être réceptionné en fin 2001. En incluant l'unité de Batelle dans le Vermont, qui expérimente la production d'électricité à partir de turbine avec de gros problèmes sur les goudrons, et l'unité de Varnamo, les unités de gazéification de la biomasse en cycle combiné ne seront que quatre dans le monde. Une seule d'entre elle a fonctionné à ce jour. Cela fait peu pour espérer un retour industriel. Cependant ce mouvement récent est aussi la reconnaissance de la plus grande crédibilité de la technologie (Un cinquième projet de démonstration en Autriche pour une unité de 3 MWe sur un procédé développé par l'Université de Vienne est en cours de construction). Il est à associer à la forte croissance de nombre de projets de gazéification, tout combustible confondu, au niveau mondial (3000 MWth/an).

Bien que le nombre de réalisations escomptables en France soit assez limité, compte tenu de la taille minimum critique des installations, elle dispose d'atouts non négligeables en matière de savoir faire industriel pour que des projets de démonstrations soient engagés en collaboration avec les principaux constructeurs actuels afin d'assurer une intégration progressive.

La démonstration industrielle de la gazéification de la biomasse en grosse puissance reste donc à réaliser mais les perspectives sont très prometteuses pour autant que les quelques verrous technologiques soient levés.

Pour ces unités, la politique de rachat du kWh sera déterminante en ce sens que selon la tarification il sera, ou non, possible pour un industriel (hors papetier) de produire de l'électricité à partir de la biomasse.

### **Des besoins en recherche pour l'amélioration de la qualité des gaz.**

Si l'on considère le niveau actuel de la technologie, il est clair que la démonstration industrielle de la gazéification doit être achevée pour permettre à cette technologie d'émerger dans un marché porteur. Cependant il est clair aussi que le niveau actuel de connaissance scientifique sur les procédés et le traitement des gaz (totalement lié dans notre esprit) sont insuffisants.

Si l'ensemble des problèmes qui se pose au niveau du traitement des gaz dispose de solutions techniques (cyclone, filtre haute et basse température, lavage) leur mise en œuvre en série

augmentent les risques et les causes d'arrêt ainsi que les coûts de fonctionnement. Il est donc nécessaire de lever le verrou qualité des gaz à trois niveaux :

- **Elimination des goudrons** avec :
  - une réflexion est à mener sur la conception et les choix techniques en petite puissance afin de minimiser la production de goudrons et la taille des installations de traitement des gaz pour une application moteur. La gazéification étagée devrait offrir des perspectives intéressantes à ce niveau.
  - Des travaux sur le craquage thermique associé ou non au craquage catalytique pour les grosses puissances. Il est en effet surprenant que l'ensemble des efforts se concentrent sur la réaction hétérogène (gaz solide) alors que la première étape du processus thermochimique : la pyrolyse, permet de convertir la biomasse en gaz et cela majoritairement.
- **Elimination des poussières.** Différentes options ont été testées pour la filtration à chaud (IGCC). Si les premiers résultats sur l'unité de VARNEMO sur les filtres métalliques ont montré leur intérêt, des travaux seront cependant nécessaires pour fiabiliser les installations au niveau industriel.
- **Traitement des produits alcalins.** Pour les applications turbine, cet aspect est primordiale de même qu'il serait souhaitable pour des raisons de rendement (1 à 2 points sont en jeu) de limiter au maximum le refroidissement des gaz avant combustion et pour cela la compréhension de leur formation et de leur élimination.

Enfin, il apparaît important d'élargir la gamme des matières premières utilisables notamment vers les déchets pour lesquels les problèmes énoncé précédemment en matière de qualité de gaz seront encore plus important, notamment du fait d'un taux de cendre beaucoup plus élevé et plus complexe. A ce niveau, l'optimisation de procédés adaptés de la pyrolyse nous semble la voie la plus intéressante, sauf à accepter des rendements moindres sur des installations poly-combustibles.

Il nous paraît important que la recherche à ce niveau sorte des sentiers battus et que les choix techniques qui prévalent depuis une trentaine d'années soient remis en cause. Nous pensons réellement qu'il y a des possibilités d'innovation techniques sur la base d'un certain nombre d'acquis, notamment en France, si les financements sont mis à disposition des industriels et des universitaires dans le cadre d'actions concertées.

### **Des acteurs et un marché disparate**

Les éléments qui poussent au développement de la gazéification, tous combustibles confondus mais qui sont aussi déterminants pour la biomasse, sont le renforcement des contraintes environnementales et les besoins croissants en électricité qui ont entraîné l'ouverture du secteur de l'électricité au privé dans de très nombreux pays.

A ce niveau, l'Asie constitue le marché le plus important en terme de capacité installée et de marché potentiel. A ce stade, la Chine offre le meilleur potentiel même si le secteur électrique ne s'est pas encore libéralisé. La situation politique mais surtout économique y milite dans le sens d'une plus large ouverture et les besoins croissants de la population devraient pousser les pouvoirs publics à "privatiser" le secteur électrique. Si le charbon devrait constituer indiscutablement le combustible principal, la biomasse devrait pouvoir y jouer un rôle non

négligeable. A l'image de la Chine, l'ensemble des pays en développement, et tout particulièrement les pays tropicaux, qui permettent d'envisager des productivités des plantations 3 à 5 fois supérieures à celles de l'Europe, constituent un marché très important et qui devrait émerger rapidement.

Aux Etats Unis, premier pays en terme de capacité installée, tous combustibles confondus, la quasi totalité de nouveaux projets en gazéification sont orientés production d'électricité. Cependant l'intérêt pour la biomasse et les énergies nouvelles en général y est fort limité depuis quelques années et les programmes de recherches nationaux dans le domaine ont été fort ralentis. C'est ce qui explique que les projets qui sont à ce jour à l'étude ou en cours de réalisation concernent les compagnies pétrolières pour la gazéification de sous produits de raffinage compte tenu des performances environnementales reconnues de la gazéification par rapport à la combustion classique pour des combustibles aussi polluants (soufre et matériaux lourds).

Cependant, ce marché de l'électricité ou de la bio électricité si l'on intègre l'aspect environnement est nouveau et en perpétuel évolution, il ne facilite pas la prise de décision et une bonne visibilité pour qu'un industriel décide de s'engager dans la R&D sans une volonté politique affichée et un appui financier important au moins pendant les premières années (de redémarrage pour la France).

Il convient également de rappeler même si cet aspect n'a pas forcément été très développé dans ce document que la pyrolyse et la gazéification peuvent permettre la production de carburant de substitution (H<sub>2</sub>, Méthanol,...). Dans un contexte énergétique évoluant il n'est pas certain que ces solutions technologique à partir de la biomasse ne soient pas amenées à jouer un rôle prépondérant dans la satisfaction des nos besoins futurs.

Enfin, il est évident que les aspects économiques sont fondamentaux et jouent un rôle prépondérant y compris sur la technique. L'existence d'un marché pour la bio-énergie, qui soit compatible avec le coût de la matière première, permettra la levée de certains verrous. Ces aspects seront abordés dans le document de stratégie qui complète ce travail.

## POUR EN SAVOIR PLUS

Bridgwater A.V. and al - Fast pyrolysis of biomasse - A handbook - ISBN 1872691072 - EPL Press - May 1999.

European commission - Biomass conversion technologies – Achievement and prospects for heat and power generation - European Commission EUR 18029EN – November 1998.

Handbook of gasifiers and gas treatment systems - Davro corporation -FE 1772 - 11 February 1976

IEA - Status of gasification in countries participating in the IEA Bioenergy gasification activity - report 2EWAB01.26- July 2001

KEES W.Kwant - EWAB/Novem - Netherlands - Status of Gasification in countries participatin in the IEA Bioenergy gasification activity -Report 2EWAB01.26 - July 2001

Milne T., Abotroglou N., Evans R. - Biomasse gasifier tars. Theirs nature, formation and conversion - NREL/TP - 570 - 25357 - November 1998.

Nguyen DL - L'arrivée de la pile à combustible dans les exploitations industrielles de cogénération . Les 6<sup>e</sup> entretiens de la technologie. Lille - 1997.

PyNe revue - disponible sur Web : [www.pyne.co.uk](http://www.pyne.co.uk)

Reed T., Graboski M.S., Leire B. - Fudamentals development and scal up of the air oxygen stratified down draft gasifier - Biomass energy fundation press - SERI/PR - 234 - 2571 - 1998.

Rensfelt E. - IEA Biomass thermal gasification activity - Sub task 6 - gasification of waste TPS - 96/19 - 1996

Spath P. Mann M. - Life cycle assessment of biomass gasifier combine cycle system - NREL/TP - 430 - 23076 - December 1997

Wan Yih Huei et Adelman Steve - Distributed utility technology - Cost performance and environnemental characteristics - NREL/TP - 463 ; 7844 - June 1995.

## **ANNEXE 1**

### **Procédés et projets significatifs de pyrolyse**

<b>BTG : Biomass Technology Group</b>	
<b>Type de procédé :</b> Réacteur à cône rotatif	
<b>Localisation :</b> Enschede, Hollande	<b>Etat actuel :</b> R & D
<b>Contact :</b> W. Prins Biomass Technology Group, B.V. , P. O Box 217, Enschede Netherlands Tel : 31 53 486 2282 Fax : 31 53 432 5399 Email : w.prins@ct.utwente.nl	<b>Capacité :</b> 200 kg/h <b>Année :</b> 1992
<b>Financements :</b> Union Européenne	
<b>Source :</b> – Scaling-up of the rotating cone technology for biomass fast pyrolysis, B. M. Waagenaar, R. H. Venderbosch, J. Carrasco, R. Strenziok, B. J. Van der Aa, Proceedings of the 1 <sup>st</sup> world conference on biomass for energy and industry, Spain, June 2000, pages 1514-1518, James & James – Pyne newsletter, issue 10, dec 2000 – www.btgworld.com – Plaquettes commerciales	

Le procédé développé par BTG est basé sur le réacteur à cône rotatif développé à l'Université de Twente en Hollande (Chem. Eng. Sci., 5109, 1994) et fonctionnant à une température d'environ 550°C.

### Description de la technologie

#### Matière première - type d'alimentation

BTG utilise principalement trois types de biomasse, du bois de taillis à courte rotation, de la paille et de la balle de riz. Le bois est préalablement conditionné avant d'être introduit dans le réacteur de pyrolyse. Il semblerait que les autres matières premières soient utilisées en l'état, ce qui paraît peu probable avec la paille. Le bois doit être séché (teneur en humidité < à 6% en masse) puis réduit en taille (morceaux inférieurs à 2 mm). Pour ce faire l'unité de pyrolyse est équipée d'une station de prétraitement de la matière première. Celle-ci, d'une capacité de 4 tonnes/jour, dispose, en série, d'un séchoir et de deux broyeurs à marteaux qui réduisent successivement la taille de la biomasse à 8mm puis à 2mm. La biomasse est ensuite introduite dans le réacteur au moyen d'un sas à clapet au centre du réacteur conique.

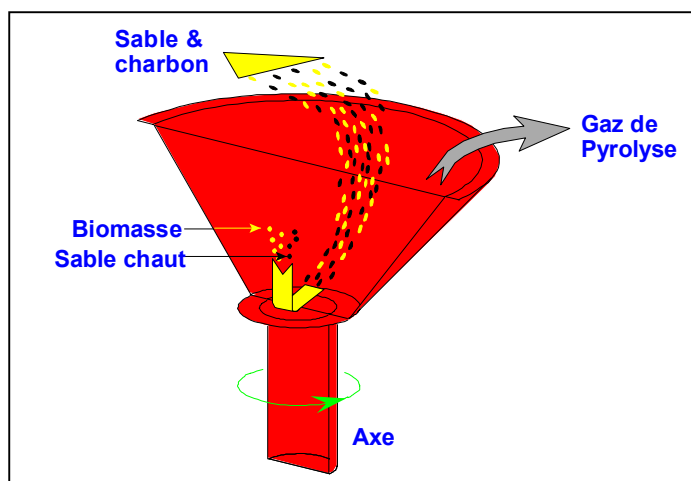
#### Procédé de pyrolyse

BTG a développé un réacteur de pyrolyse à cône rotatif dans le but d'optimiser la rapidité de chauffe de la matière première et de diminuer les temps de séjour des gaz, contrairement à des réacteurs de type lit fluidisé,

pour éviter des réactions de craquage et donc améliorer les rendements. En effet au cours de réactions de craquage thermiques, les molécules organiques contenues dans les vapeurs de pyrolyse se fractionnent sous l'effet de la température pour donner des gaz non condensables. Une représentation schématique du réacteur est présentée dans la figure ci-dessous. La biomasse et du sable chaud (550°C) sont introduits à la base du réacteur conique. Sous l'effet de la force centrifuge, générée par la rotation du cône, les particules solides sont transportées vers le haut et rapidement mélangées pour que se produise la réaction de pyrolyse. Le charbon produit, les cendres et le sable refroidi sont évacués par le haut du cône et alimentent un réacteur de combustion dans lequel le charbon est brûlé. La chaleur fournie par cette combustion permet de chauffer le sable avant que celui-ci ne soit réinjecté dans le cône de pyrolyse. Les vapeurs de pyrolyse sont refroidies dans une tour à eau avant d'être stockées (il faut 0.6 m<sup>3</sup> d'eau par tonne de biomasse transformée).

Deux modèles de pyrolyseurs ont été construits, le BTG 50P et le BTG 200P de capacité respective en biomasse de 50 et 200 kg/h.

Caractéristiques du modèle BTG 200P	
Temps de résidence des gaz chauds	0.1 - 1 seconde
Quantité de solides en entrée	25 t/h (pour un cône de 1m diamètre)
Température du sable	550°C
Taille du cône	0.65 m de diamètre en haut et 0.21 m de diamètre à la base
Nombre de rotations par minute	300



Représentation schématique du réacteur de pyrolyse à cône rotatif développé par BTG

## Performances

### Bilan matière - Energie

L'unité pilote mise en place dans les locaux de BTG aurait fonctionné 1000 heures. Le tableau ci après précise les performances de l'installation.

Pour 200kg de bois	
Quantité de sable nécessaire	450 kg
Air combustion des charbons	330 kg
Liquide	105 kg d'huile et 47 kg d'eau
Solides	30 kg de charbon et 2 kg de cendre après combustion
Gaz produits	30 kg de gaz de pyrolyse ,272 kg de N <sub>2</sub> et 91 kg CO <sub>2</sub>

Les produits obtenus sont à 70 % en masse des huiles, 10 % du charbon et 20 % des gaz de pyrolyse. Le rendement maximum en huile obtenu est de 74% en masse à partir de bois sec (10 %).

### Qualité des huiles

Les principales caractéristiques des huiles de pyrolyse obtenues à partir de plaquettes de bois sont les suivantes :

Pouvoir calorifique	14.8 MJ/kg
Densité	1200 kg/m <sup>3</sup>
Viscosité à 40 °c	53 mm <sup>2</sup> S <sup>-1</sup>
Acidité	pH de 2.5
Teneur en eau	18 % massique
Teneur en cendre	0.002 % massique

### Analyse critique

Du fait de la non dilution par les gaz de fluidisation, les vapeurs sont évacuées rapidement de la zone chaude du réacteur permettant de limiter les réactions secondaires de craquage. Ce craquage peut occasionner jusqu'à 10% de pertes dans les huiles sous forme de gaz. Ensuite puisqu'aucun gaz vecteur n'est nécessaire, les produits de pyrolyse sont non dilués, donc moins volumineux et plus facile à traiter, ce qui limite les coûts d'installation d'une unité de production. La technique de réacteur en cône mis au point par BTG n'est employée que pour des petits pilotes. L'utilisation de cette technique à plus grande échelle, avec un cône de plus grande taille risque de générer des problèmes d'homogénéité du mélange des solides et de temps de séjour des particules dans le réacteur. Ensuite à plus grandes échelles des problèmes d'étanchéité risquent de se poser notamment sur la partie tournante. Pillard avait, en son temps, rencontré ce type de problèmes sur des pyrolyseurs à cône rotatif. Bien que BTG assure que le cône ne présente pas de trace d'usure après 1000 heures de fonctionnement, on peut supposer que ce type de réacteur vieillit assez vite, usé par le sable très abrasif et les corrosions qui s'en suivront lors des arrêts de l'installation.



**Informations complémentaires**

Depuis 1996, BTG développe en partenariat avec l'entreprise KARA des unités de production d'électricité en utilisant des huiles de pyrolyses comme carburant dans des moteurs diesel. Ces études sont faites à partir d'une unité d'une capacité de 4 tonnes/heure en biomasse sèche. La puissance en sortie de générateur est de 7.0 MW électrique ce qui correspond à un rendement de 35%.

<b>DYNAMOTIVE</b>	
<b>Type de procédé :</b> Pyrolyse rapide avec réacteur à lit fluidisé	
<b>Localisation :</b> Vancouver, Canada	<b>Etat actuel :</b> R&D
Contact : K. W. Morris 105-1700 West 75 <sup>th</sup> Avenue, Vancouver, BC, Canada, V6P 6G2 Tel : 1 604 267 6000 Fax : 1 604 267 6005 email : arobson@dynamotive.com	<b>Capacité :</b> 420 kg/jour <b>Année :</b> 2000
<b>Financements :</b> privés	
<b>Source :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Fast pyrolysis of biomass for green power generation, K. W. Morris, W. L. Johnson, R. Thamburaj, Proceedings of the 1<sup>st</sup> world conference on biomasse for energy and industry, spain, june 2000, pages 1519-1524, James &amp; James</li> <li>– Pyne newsletter, issu 10, dec 2000</li> <li>– Plaquettes commerciales</li> <li>– www. Dynamotive.com</li> </ul>	

Ce procédé de pyrolyse rapide en réacteur à lit fluidisé à été développé et breveté en 1995 par RTI (Resource Transforms International, Ltd.), et racheté par Dynamotive en 1996.

### Description de la technologie

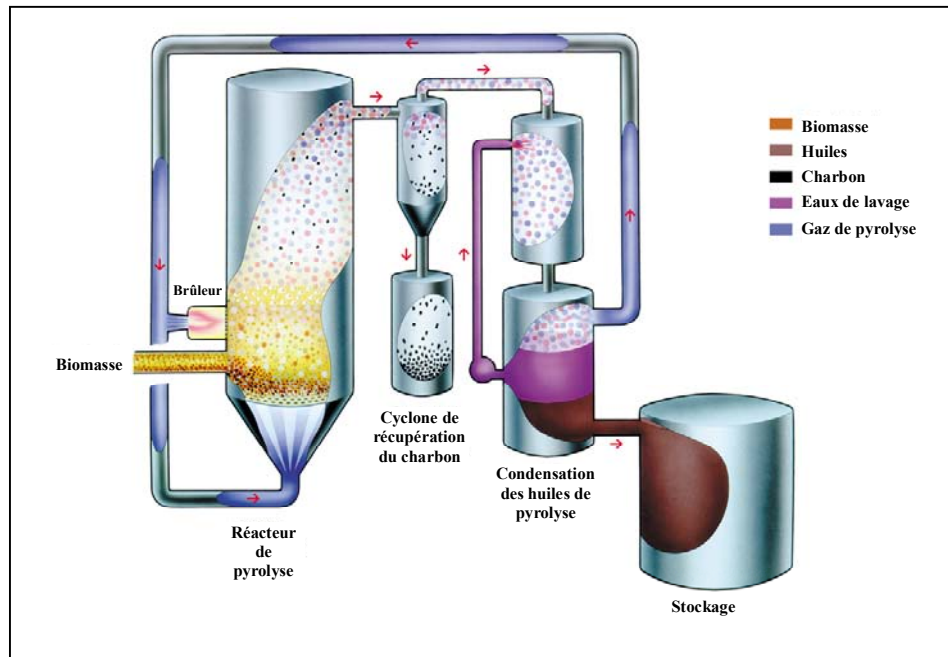
#### Matière première, type d'alimentation

La matière première utilisée est essentiellement de la biomasse telle que des déchets d'industries du bois (sciure de bois, écorce) et des sous-produits agricoles (canne à sucre, bagasse, paille de blé, etc ...). Cette biomasse est séchée pour obtenir des taux d'humidité inférieurs à 10 % et broyée en fines particules (1 à 2 mm) pour assurer des taux de transfert de chaleur rapides dans le réacteur. Une fois traitée, la matière première est convoyée dans une trémie de stockage qui alimente le réacteur de pyrolyse en continu.

#### Procédé de pyrolyse

Il s'agit d'un lit fluidisé classique. Dans le réacteur, la matière première est rapidement chauffée entre 450 °C et 500°C en absence d'oxygène. La figure ci-après présente le schéma de principe du procédé. Celle-ci est convertie en trois produits principaux : des huiles de pyrolyse qui sortent du réacteur sous forme de vapeurs, des gaz inertes non-condensables et du charbon. L'ensemble est dirigé vers un cyclone ou, par force centrifuge, il y a séparation de la phase solide (charbon) de la phase gazeuse. Le charbon est récupéré dans un container placé sous le cyclone. Des problèmes de refroidissement du charbon ont été rencontrés et la solution adoptée sur la nouvelle unité n'a pas été précisée.

Les gaz sont ensuite rapidement refroidis dans une tour par l'intermédiaire d'un liquide de refroidissement. Les huiles de pyrolyse se condensent et sont collectées dans un réservoir. Les liquides de refroidissement qui sont plus légers que les huiles, flottent en surface et sont récupérés pour être réutilisés dans la tour à refroidissement liquide. Les gaz non-condensables sont employés dans le réacteur de pyrolyse comme gaz vecteur et comme combustible pour fluidiser et chauffer le lit.



Représentation schématique du procédé pilote utilisé par Dynamotive

## Performance

### Nombre d'heures de fonctionnement

En 1997, Dynamotive a construit un pilote de 0.5 tonnes/jour à Vancouver, qui a été adapté en 1998 pour une capacité de 2 tonnes/jour. Ce pilote aurait fonctionné pendant plus de 3000 heures. Dynamotive a achevé, en janvier 2001, la construction d'un nouveau pilote de 10 tonnes/jour avec une capacité de production de 6 000 litres d'huile de pyrolyse par jour.

### Bilan matière – Rendement

Selon la matière première employée, les rendements matière sont les suivants : 60-75 % massique d'huile de pyrolyse, 10-15 % de charbon solide et 10-15 % de gaz non-condensable.

## Qualité des huiles

La qualité des huiles obtenues à partir de différentes matières premières est donnée dans le tableau ci-après :

	Balle de riz	Pin/Sapin 53% bois + 47% écorce	Pin/Sapin 100% bois
Taux d'humidité (% masse)	2.1	3.5	2.4
Taux de cendre (% masse)	2.9	2.6	0.42.
PH	2.6	2.4	2.3
Eau (% masse)	20.8	23.4	23.3
Lignine (% masse)	23.5	24.9	24.7
Solides (% masse)	< 0.10	< 0.10	< 0.10
Cendres (% masse)	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Densité (kg/l)	1.20	1.19	1.20
PCI (MJ/kg)	15.4	16.4	16.6
Viscosité à 20°C (cSt)	57	78	73
à 80°C (cSt)	4.0	4.4	4.3
Composition des huiles :			
Eau	23.3	24.3	20.8
Lignine	24.7	24.9	23.5
Cellobiosan	2.3	1.9	-
Glyoxal	2.3	1.9	2.2
Hydroxy- acétaldéhyde	9.4	10.2	10.2
Levoglucofan	7.3	6.3	3.0
Formaldéhyde	3.4	3.0	3.4
Acide formique	4.6	3.7	5.7
Acide acétique	4.5	4.2	6.6
Ethanol	6.6	4.8	5.8

## Expertise technique

Dynamotive qui est associé à l'équipe de RTI constitue un ensemble très solide. Le réacteur a bénéficié de l'expérience très complète de l'unité de la compagnie espagnole Union Fenosa puisque RTI en avait conçu le principe. Le procédé en lui-même n'est pas particulièrement innovant, l'ensemble est simplement bien conçu. L'équipe RTI à l'origine du procédé est en effet impliquée dans la pyrolyse rapide depuis ses origines et a également été avant la création de la société ENSYM à l'origine de la première génération de ce procédé. Dynamotive constitue certainement aujourd'hui le constructeur le plus solide au niveau international.

<b>PYROVAC</b>	
<b>Type de procédé</b> : pyrolyse sous pression réduite	
<b>Localisation</b> : Sainte-Foy, Québec	<b>État actuel</b> : commercial
Contact : C. Roy 333 rue Franquet, Saint-Foy, Québec, Canada, G1P 4C7 Tel: 418 652 2298 Fax : 418 652 2275 email : croy@pyrovac.com	<b>Capacité</b> : 3500 kg/h <b>Année</b> : 1988
<b>Financements</b> : privés	
<b>Source</b> :	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Development of a novel vacuum pyrolysis reactor with improved heat transfer potential, C. Roy, J. Yang, D. Blanchette, L. Korving, B. De Caumia, Developments in thermochemical biomass conversion, A. V. Bridgwater, D. G. B. Boocock, Blackie Academic &amp; Professional, 1997, pages 351-367.</li> <li>- Pyne newsletter, issue 10, dec 2000</li> <li>- www.pyrovac.com</li> <li>- Plaquettes commerciales</li> </ul>	

Le procédé développé par Pyrovac est basé sur le principe de la pyrolyse sous vide développé par l'université de Laval. Elle a lieu à une température d'environ 500 °C et à une pression totale inférieure à 15 kPa.

### Description de la technologie

#### Matière première, type d'alimentation

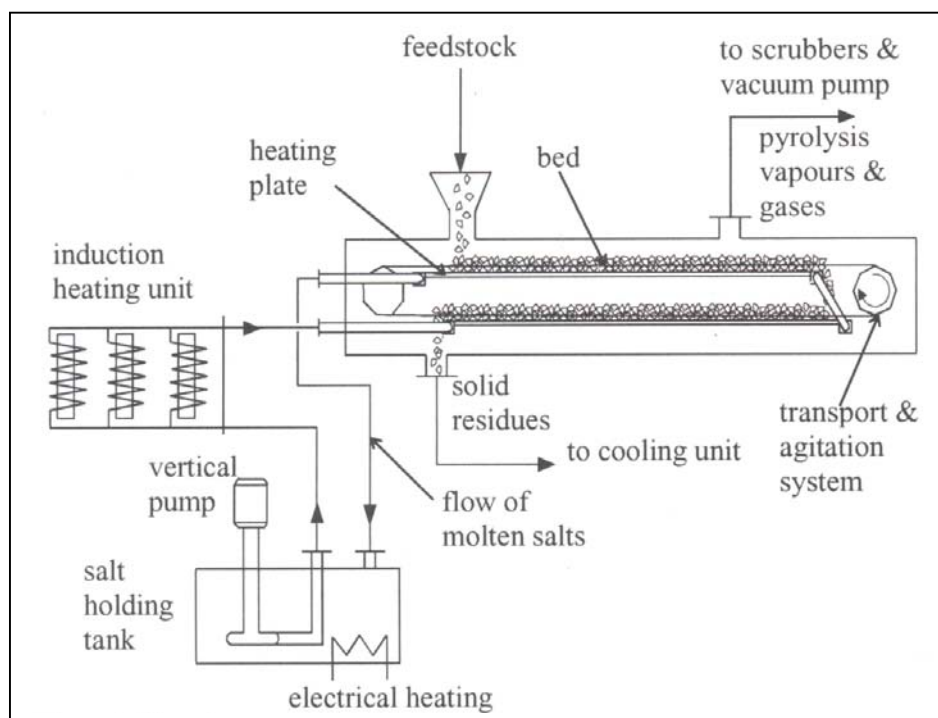
Le procédé Pyrovac permet de valoriser la biomasse, mais il a surtout été conçu pour traiter certains déchets industriels (pneus usagés, résidus pétroliers, déchets biomédicaux, ordures ménagères,...). La matière première solide doit tout d'abord être séchée (taux d'humidité < 15% en masse) et broyée avant d'être introduite dans le réacteur par un système d'alimentation sous vide (15 kPa).

#### Procédé de pyrolyse

La matière première est transportée dans le réacteur sur des plateaux horizontaux chauffés par un fluide caloporteur à base de sels fondus (voir figure ci dessous). Ces derniers tirent leur énergie des gaz incondensables qui sont brûlés sur place. La température du réacteur est maintenue à 500°C. Lorsqu'elles sont chauffées, les matières présentes dans le réacteur se décomposent sous forme de vapeurs qui sont rapidement retirées du réacteur au moyen d'une pompe à vide.

Ces vapeurs sont dirigées vers deux tours de condensation dans lesquelles les huiles lourdes et légères sont récupérées. Les huiles légères sont séparées de la phase aqueuse qui est traitée avant rejet. Les gaz incondensables sont alors dirigés vers un brûleur à gaz et servent à chauffer les sels fondus. Le résidu solide

(charbon) est refroidi et récupéré à la sortie du réacteur.



Représentation schématique du réacteur de pyrolyse utilisé par Pyrovac

### Performances

Plusieurs pilotes de pyrolyse sous vide ont été développés par Pyrovac, de l'échelle pilote d'une capacité de 100 kg/h jusqu'à l'échelle de démonstration industrielle d'une capacité de 3500 kg/h. La dernière unité installée à Jonquières est équipée d'un réacteur de pyrolyse qui fonctionne en continu avec une capacité de 3,5 t/h. Ce réacteur atteint une longueur de 16,3 mètres et est équipé d'un système de pompage permettant de mettre sous vide toutes les composantes du procédé, de l'alimentation à la sortie des produits.

### Bilan matière – Energie

Le tableau ci après présente quelques résultats obtenus à partir du procédé.

	Bois (15% humide)	Pneus usagés
Huile de pyrolyse	30.7%	55%
Charbon	29.2%	25% + 9% d'acier
Gaz de pyrolyse	20.5%	6%
Taux d'humidité des huiles	15.7%	n.d.

## **Analyses Critiques**

Malgré un nombre important de publications, il n'a pas été possible de collecter des informations consistantes sur :

- les techniques utilisées pour faire circuler le lit de sel fondu
- la qualité et le pouvoir calorifique des huiles obtenues avec les bilans correspondants
- le nombre d'heures de fonctionnement du pilote

L'avantage incontestable du procédé vient du vide qui est maintenu dans le réacteur et qui permet un séjour très court des vapeurs à la température de réaction, évitant les réactions secondaires de craquage. Par contre, le système de chauffage par bain de sel fondu semble très complexe pour ce type d'installation et de nature à occasionner des coûts de fonctionnement très élevés. Les qualités du procédé sont très largement mises en avant dans toutes les documentations fournies par Pyrovac (fonctionne avec tout type de biomasse et de déchets, très bons rendements, les huiles obtenues sont de qualité homogène, possibilité de dépolluer des sols en les pyrolysant, etc...), mais comme aucunes précisions techniques ne sont réellement données, il est difficile d'apprécier les résultats par rapport à d'autres procédés.

## **Informations complémentaires**

Pyrovac essaie de développer de nouvelles applications pour leurs huiles de pyrolyse comme la plupart des industriels fournisseurs de procédés dans ce domaine afin d'améliorer la faisabilité économique de leurs unités. Il ont entre autre breveté deux produits dans le but de les commercialiser : le POSB et le BiophenMC. Le POSB est fabriqué à partir des huiles de bois issues de la pyrolyse d'écorces et sert à la protection et la préservation du bois car il serait efficace contre les moisissures, les taches et les champignons s'attaquant au bois. Le POSB permettait donc d'augmenter la durabilité de l'OSB, un panneau structural employé dans l'industrie de la construction. Le BiophenMC est proposé en substitut des phénols d'origine pétrolière. Il pourrait être utilisé pour la fabrication des résines de type phénol-formaldéhyde (PF). Ces résines sont employées dans l'industrie des panneaux et des contreplaqués.

<b>Ensyn</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lit fluidisé circulant	
<b>Localisation :</b> Ottawa, Canada	<b>Etat actuel :</b> commercial
Contact : Mr I. Barnette Tel: 613-248-2257 Fax: 613-248-2232 Ensyn Technologies Inc. Corporate Offices and Engineering, 2 Gurdwara Road Suite 210, Ottawa, Ontario, Canada K2E 1A2 Email : <a href="mailto:IBarnett@Ensyn.com">IBarnett@Ensyn.com</a>	<b>Capacité :</b> 40 t/j <b>Année :</b> 1980
<b>Financements :</b>	
Source : – The thermal Biomass Conversion and Utilisation, Biomass Information System, A. Bridgwater, AIR1-92-8006-GB Pyne newsletter, issue 10, dec 2000 – <a href="http://www.ensyn.com">www.ensyn.com</a> – Plaquettes commerciales	

Ensyn commercialise un procédé de pyrolyse rapide en un lit fluidisé circulant. La technologie utilisée, appelée RTP™, a été développée au début des années 1980 à l'Université occidentale d'Ontario (University of Western Ontario).

### Description de la technologie

#### Matière première type d'alimentation

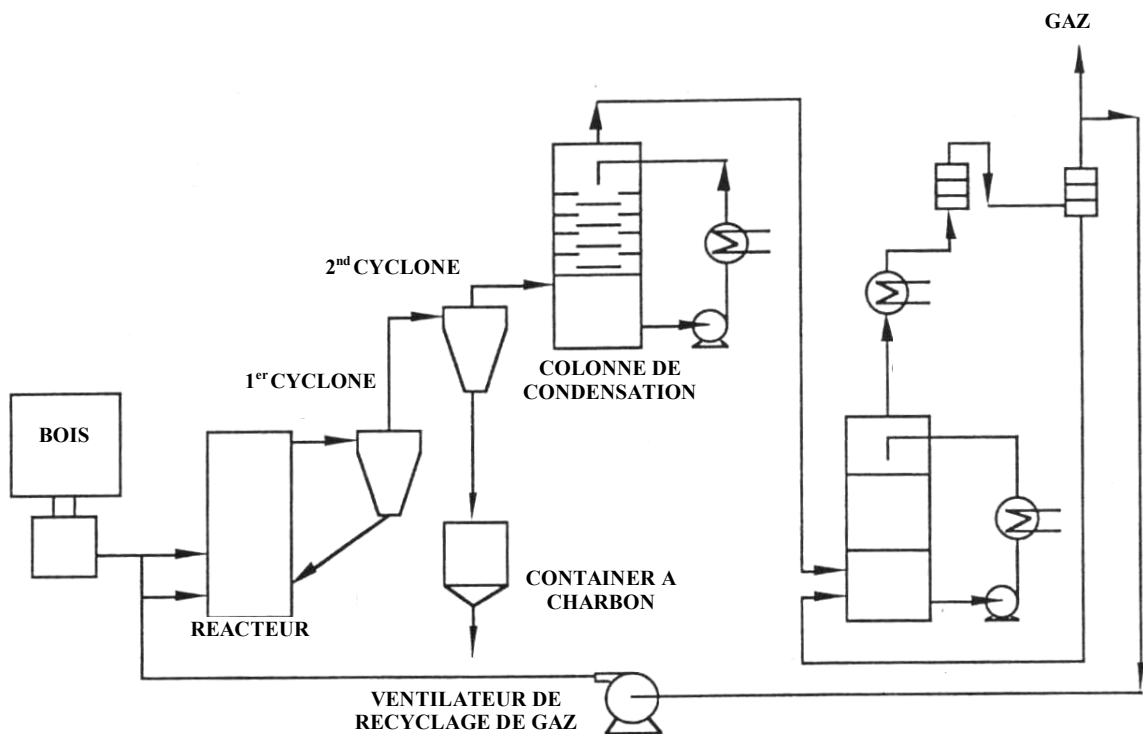
Ensyn recommande d'utiliser essentiellement du bois comme matière première ( résineux ou feuillus, et des écorces). Des études seraient menées pour utiliser d'autre type de biomasse, telle que la balle de riz dans le but d'obtenir de nouveaux produits chimiques naturels. La matière première doit naturellement être conditionnée avant d'être introduite dans le réacteur de pyrolyse pour avoir une taille inférieure à 6 mm et un taux d'humidité inférieur à 10%.

#### Procédé de pyrolyse

Le cœur de l'installation comporte un réacteur à lit fluidisé circulant dans lequel la biomasse est introduite au niveau du lit de sable maintenu à une température voisine de 500°C. Les produits de la réaction et une partie du lit sont évacués du réacteur et passent dans deux cyclones pour séparer dans un premier temps le sable et ensuite le charbon. Puis les vapeurs et les gaz sont rapidement refroidis avant d'être eux-mêmes séparés dans un cyclone. Le sable est renvoyé vers le lit fluidisé alors que le charbon sera brûlé pour réchauffer ce dernier. Les temps de séjour obtenus pour les vapeurs chaudes sont optimisés afin de tendre vers des temps de séjour de l'ordre de cent milli-secondes ce qui permettrait d'isoler des intermédiaires de pyrolyse thermiquement instables.



De manière générale des temps de séjours courts sont appliqués aux vapeurs pour la production de composés chimiques alors que des temps de séjours plus longs, permettant une décomposition plus complète des dérivés de la lignine, sont recommandés par Ensyn pour la production de carburant. Des recherches sont actuellement menées pour essayer de limiter les taux de particules dans les huiles: charbons et cendres, par filtration à haute température. Le schéma de procédé est donné ci –après.



Représentation schématique d'une unité commerciale RTP II de 100 kg/h développée par Ensyn

## Performance

Plusieurs installations ont été vendues par Ensyn et auraient ainsi accumulées plusieurs milliers d'heures. Cependant les plus grosses installations concernées sont américaines et sont utilisées pour la production d'additif alimentaire (sauce pour barbecue). Seule une infime fraction des huiles est ainsi valorisée, le reste est directement brûlé en chaudière pour satisfaire aux besoins électrique et thermique de l'usine. Les quelques installations qui ont été mises en place à des fins énergétiques sont semble-t'il européennes l'une étant installée au VTT en Finlande (quelques dizaines de kg/h), l'autre à ENEL en Italie (650 kg/h). Si l'installation du VTT est actuellement en fonctionnement, elle a largement bénéficiée du savoir faire de ces dernières et de nombreuses améliorations ont été nécessaires avant de rendre l'installation opérationnelle. C'est sur cette unité qu'ont lieu les essais de filtration à chaud. L'installation Italienne n'a jamais fonctionné pour des raisons techniques autant que politiques. Un nouveau contrat européen a été signé avec le promoteur afin de remettre cette unité en fonctionnement. De cette installation, il devrait être possible de préciser les possibilités offertes à la pyrolyse.

## Bilan matière

Le rendement moyen en huile est de 75% en masse. La composition moyenne de ces huiles est donnée dans le tableau ci-après.

Propriétés physiques	Valeurs moyennes	Intervalle de valeurs
Pouvoir calorifique des huiles produites	17 MJ/kg	15-19 MJ/kg
Pouvoir calorifique en absence d'eau	23.1 MJ/kg	22.1-24.3 MJ/kg
Densité	1.18	1.16 - 1.22
Viscosité à 25 °	45 cp	
Viscosité cinématique à 25 °c à 40°C	233 cSt 134 cSt	
Acidité	pH de 2.5	2.1 < pH < 3.4
Teneur en eau	22 % massique	14-31 %
Point éclair	55°C	51-58
Analyse élémentaire		
C	56.4 %	55.3-63.5
H	6.2 %	5.2-7.7
O	37.1 %	39.43-28.98
N	0.2 %	0.07-0.39
S	<0.01 %	0.00-0.05
Cendre	0.1 %	0.04-0.25
Solubilité		
Hexane	1%	
Toluène	6%	
Acétone/ Acide Acétique	99.86	

## Analyse critique

Ensyn est aujourd'hui la seule entreprise qui dispose d'unités industrielles de référence de pyrolyse rapide et

aurait actuellement quatre installations commerciales, trois dans le Wisconsin et une à Ottawa, Ontario. Cependant ces installations n'ont jamais pu être visitées. La plus grosse de ces installations a été construite dans le Wisconsin par Ensyn en 1996 et fonctionnerait jusqu'à 75 tonnes de bois vert par jour (équivalent à 40 tonnes de bois séché). Elle ne produit de l'électricité et de la chaleur qu'à partir des résidus de distillation. Les solutions mises en place n'ont vraisemblablement rien de très spécifiques. Pour les autres unités, aucune information autre que commerciale n'est disponible. Les problèmes rencontrés sur l'unité de Pise et les modifications importantes réalisées par le VTT sur leur pilote laisse supposer que cette technologie est loin d'avoir atteint le niveau de maturité escompté dès lors que la production d'huile doit être maximisée en qualité et en quantité. Le problème principal rencontré (sans qu'il ait jamais été réellement mentionné) concerne le fort taux de solide dans les vapeurs (observation sur le site de Pise). Cette entreprise a bénéficié d'un soutien important du gouvernement Canadien.

### **Informations complémentaires**

Ensyn travaille également avec des entreprises pétrolières sur le traitement et la valorisation dans leurs déchets pétroliers lourds et les bitumes pour les convertir en huiles légères.

<b>Wellman</b>	
<b>Type de procédé</b> : Lit fluidisé double avec chauffage indirect	
<b>Localisation</b> : Oldbury, Grande bretagne	<b>Etat actuel</b> : R&D
<b>Contact</b> : Mr R. McLellan    Tel : 44 (0)121 601 3000 Fax : 44 (0)121 601 3123 Wellman Process Engineering Limited Furnace Green, Dudley Road Oldbury B693 DL UK Email : wellman.process@dial.pipex.com	<b>Capacité</b> : 250 kg/h <b>Année</b> : 1997
<b>Financements</b> : Union européenne dans le cadre du programme JOULE	
<b>Source</b> : – Pyne newsletter, issue 10, dec 2000 – Pyne newsletter, issue 7, mars 1999 – <a href="http://www.nf-2000.org/secure/Ec/S872.htm">http://www.nf-2000.org/secure/Ec/S872.htm</a>	

Wellman Process Engineering Limited (WPL) est une des cinq sociétés qui appartiennent au groupe Wellman, compagnie britannique (Oldbury dans le West Midlands) d'ingénierie, ayant des applications mondiales sur les marchés industriels, commerciaux et militaires.

WPL a une expérience passée dans la gazéification de charbon (gazogène contre courant) et s'est impliquée depuis 1997 dans un projet (JOR3-CT97-0197) financé par le programme européen JOULE, pour le développement d'un procédé de pyrolyse rapide avec pour objectif la production de chaleur et d'électricité. Le projet est mené dans le cadre d'un consortium avec l'université d'Aston, l'institut de la chimie du bois de Hambourg (Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Allemagne), BTG (Biomass Technology Group BV Hollande), KARA Energy Systems (Hollande) et Ormrod Diesels (Grande Bretagne). Le pilote a été fabriqué et assemblé dans les locaux de WPL. L'objectif du projet est de démontrer qu'il est possible, dans un premier temps, de produire des huiles de pyrolyse de bonne qualité avec un procédé fiable, pour, dans un deuxième temps, tester leurs utilisations :

- dans une chaudière pour produire de la chaleur,
- dans un moteur pour produire de l'électricité.

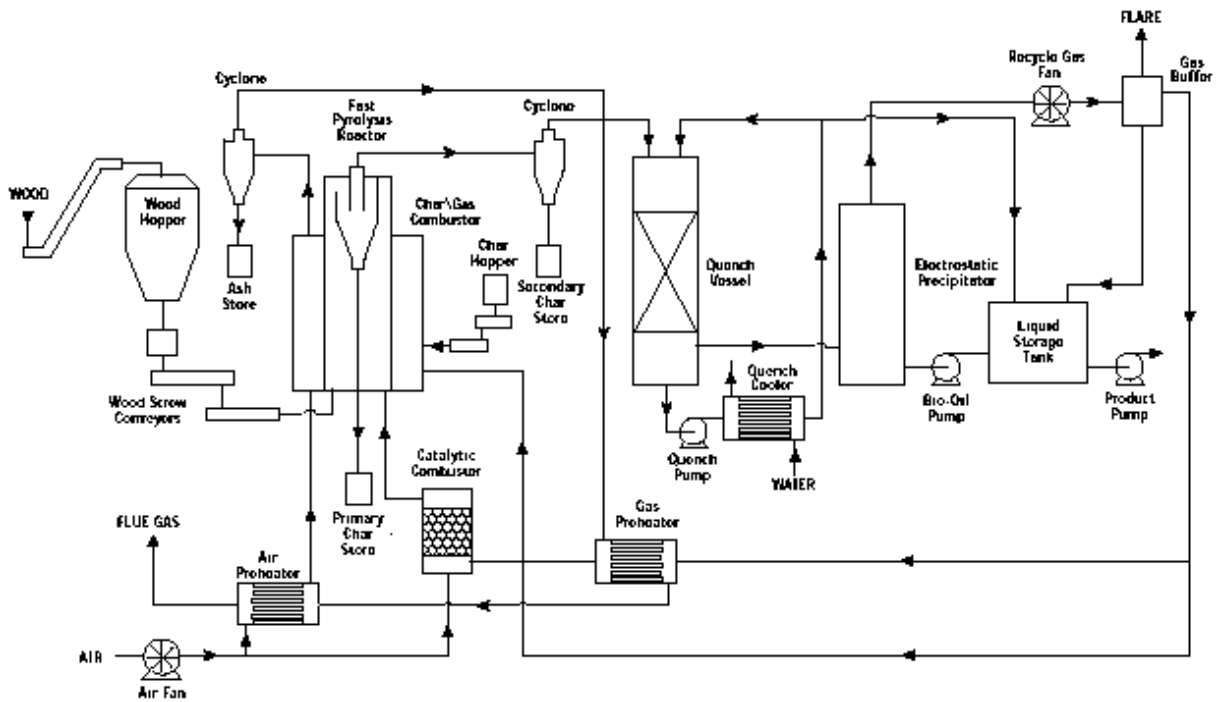
### Description de la technologie

### Matière première type d'alimentation

La matière première utilisée est du bois, essentiellement de résineux conditionné pour avoir une taille de 1 à 2 mm et une humidité faible (15-20 %). Le réacteur pilote est dimensionné pour fonctionner avec une alimentation en bois de 250 kg/h.

### **Procédé de pyrolyse**

L'installation est constituée d'un réacteur principal de pyrolyse de type lit fluidisé bouillonnant chauffé extérieurement à une température de fonctionnement de l'ordre de 500°C. Le bois, convoyé par une vis sans fin équipée d'un système de refroidissement à eau entre dans le réacteur via un système de sas assurant l'étanchéité. Ce réacteur est encastré dans un deuxième lit fluidisé formant un anneau entourant le réacteur de pyrolyse et dans lequel est réalisée la combustion du charbon. La chaleur nécessaire à la pyrolyse est ainsi fournie par la combustion du charbon sans contact direct entre les gaz de combustion et la matière première en réaction. En sortie de lit fluidisé, deux cyclones séparent les fines de charbon des produits de pyrolyse bruts. Les vapeurs sont ensuite condensées par contact direct avec des liquides de pyrolyse froids re-circulants. Deux échangeurs électrostatiques connectés en série permettent de parachever la récupération des liquides de pyrolyse présents sous forme d'aérosol. Les gaz résiduels sont oxydés sur un lit catalytique et sont utilisés, une fois comprimés, comme médiateur de fluidisation du lit du réacteur de pyrolyse limitant ainsi la dilution des vapeurs par de l'azote de combustion. La photo illustre le schéma de principe de l'installation donné ci-après.



Représentation schématique du procédé de pyrolyse rapide à lit fluidisé de 250 kg/h développé par Wellman.

### Performance

Aucunes informations ne laissent présumer que l'installation aurait fonctionné correctement jusqu'à maintenant. Dans un rapport de juillet 2001, il est prévu de lancer une période d'essai de 170 heures pour produire environ 20 tonnes d'huile.



### **Bilan matière**

A l'origine du projet, les rendements espérés étaient de l'ordre de 75% (185 kg/h) avec un taux de gaz et de charbon de 12 à 14%. A notre connaissance aucunes données sur les rendements observés et sur les qualités des huiles ne sont disponibles.

### **Analyse technique**

L'installation ne semble pas être encore opérationnelle, il est prévu en parallèle du développement du réacteur de pyrolyse de tester la chaudière (100 kW<sub>th</sub>) et le moteur (250 kW<sub>e</sub> dual) avec des huiles produites par un autre pyrolyseur à cône rotatif.

### **Informations complémentaires**

Lors d'une visite de l'unité, il apparaissait assez clairement que l'installation n'avait fonctionné qu'un petit nombre d'heures, voire pas du tout avec de la biomasse. Depuis il semblerait que l'installation soit arrêtée en attente d'une autorisation qui doit être délivrée par le gouvernement anglais. Il serait également prévu de changer le réacteur de pyrolyse et de le remplacer par un nouveau de conception différente, ce qui laisse présumer que les résultats obtenus jusqu'à présent n'ont pas été excellents.

## Fiche projet pyrolyse n°1

<b>Union Eléctrica Fenosa</b>	
<b>Type de procédé :</b> lit fluidisé	
<b>Localisation :</b> Meirama, Galicie en Espagne	<b>Etat actuel :</b> arrêtée
<b>Contact :</b> Mr A. Cuevas Capitán Haya 51, ES - 28020 Madrid Tel : 34-1-567 60 00 Fax : 34-1-570 24 27	<b>Capacité :</b> 200 kg/h <b>Année :</b> 1986
<b>Financements :</b> Union Electrica Fenosa et Union Européenne dans le cadre de plusieurs projets s'inscrivant dans les programmes AIR, JOULE et RENA.	
<b>Source :</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– Union Fenosa fast pyrolysis developments, A. Cuevas, L. Rebollo, C. Reinoso, D. S. Scott, Bio-Oil production &amp; utilisation, proceeding of the 2<sup>nd</sup> Workshop on Thermal Biomass Processing, A.V. Bridgwater &amp; E. N. Hogan , CPL Press, p 82-83 , 1996</li><li>– Pyne newsletter, issue 6, sept 1998</li><li>– Developpements in thermochemical biomass conversion, IEA Bioenergy, A. V. Bridgwater &amp; D. G. B. Boocock, Blackie Academic &amp; Professional, vol. 1, p433, 1997</li><li>– Pyne , Minutes of first meeting, 29-31 mai 1995, Solihull, Appendix 20</li></ul>	

Union Electrica Fenosa est une compagnie espagnole productrice d'électricité qui alimente 16% du réseau national dans le centre et le nord-ouest du pays, soit environ 2 000 millions de kWh par an pour 80 000 km<sup>2</sup>. La production de 5500 MW est divisée entre des usines hydroélectriques (35 %), des centrales à charbon, lignite et pétrole (50 %) et des centrales nucléaires (15 %). Union Fenosa Ingeniera est une des filiales de Union Electrica Fenosa qui a entrepris de construire en 1989 un pilote de pyrolyse rapide dans le but de produire des huiles utilisables comme carburant dans les moteurs pour la production d'électricité décentralisée. La Galice est en effet une région disposant de ressources en biomasse très importantes. Après un examen approfondi des différentes technologies disponibles à cette époque, un accord a été signé avec l'université canadienne de Waterloo pour le procédé de pyrolyse flash qu'elle avait développé ( WFPP : Waterloo Flash Ppyrolysis Process).

### Description de la technologie

#### Matière première – type d'alimentation

La matière première utilisée est essentiellement du bois d'eucalyptus qui est broyé puis séché par l'intermédiaire d'un brûleur au propane dans le cadre du pilote, pour des raisons de simplicité de fonctionnement. D'autres biomasses ont également été testées. Un cyclone en sortie de séchoir élimine les fines avant rejets dans

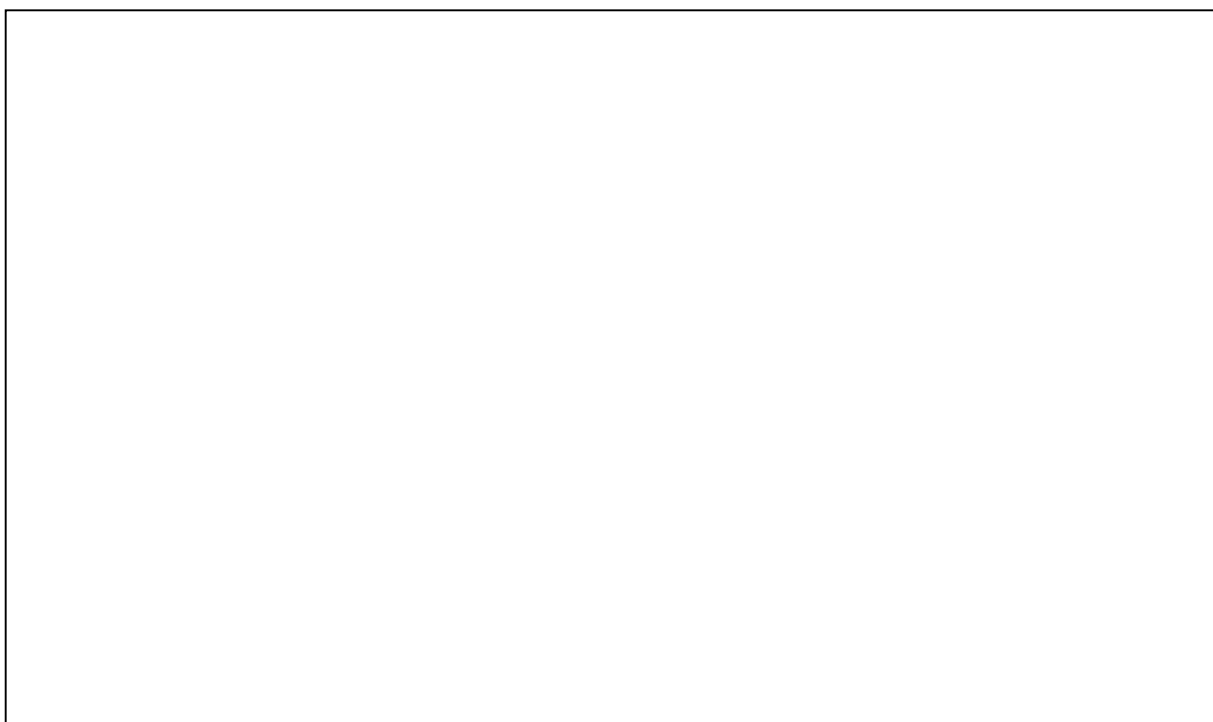


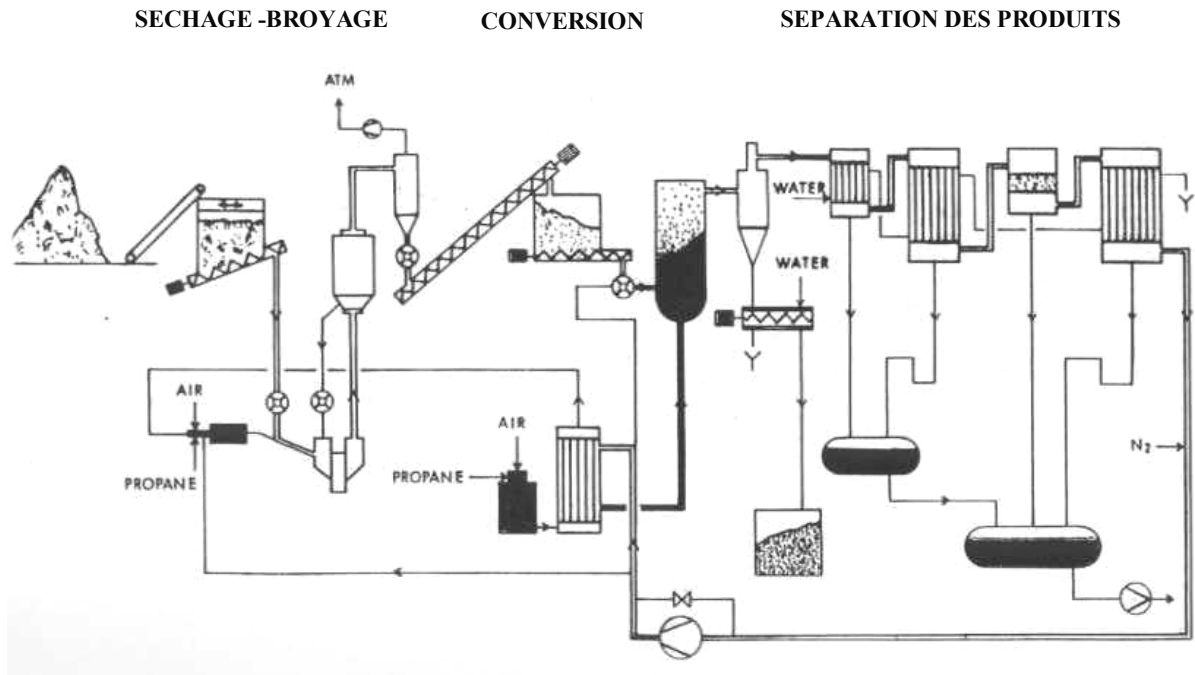
l'atmosphère. La matière première séchée est stockée dans un silo étanche avant d'alimenter le pyrolyseur. Les caractéristiques types du combustible sont données dans le tableau ci-après.

Matière première brute	taux d'humidité entre 30 et 45 % 300-360 kg/h
Matière première conditionnée	taux d'humidité entre 8 et 10 % granulométrie inférieure à 3 mm 200 kg/h

### **Procédé de pyrolyse**

Le pyrolyseur est un lit fluidisé. La fluidisation est assurée par un mélange de gaz de pyrolyse et d'azote. Ce mélange est chauffé par un brûleur propane avant de fluidiser le lit. La température du lit est d'environ 500°C, la pression dans le réacteur est de 50 kPa et le temps de résidences de la matière première est compris entre 0.5 et 1 secondes. Le charbon formé est séparé des gaz de pyrolyse par un cyclone situé en sortie de réacteur. Ils sont containérisés pour le stockage. Les vapeurs et les aérosols sont condensés par l'intermédiaire de quatre échangeurs installés en série afin d'optimiser au maximum les rendements en huile. Tous les liquides recueillis sont mélangés avant d'être stockés. Le schéma de principe de l'installation est donné ci-après. Cette installation est à l'origine du procédé Dynamotive.





Représentation schématique de l'unité de pyrolyse de 200 kg/h utilisée par Union Electrica Fenosa

### Performances

Cette installation est la plus complète de l'Union Européenne à ce jour, en ce sens que de nombreux tests y ont été réalisés et que de nombreuses matières premières ont été testées. Les huiles produites ont servi de matière première à de nombreux travaux notamment en catalyse, l'objectif principal, à l'époque, étant l'obtention de carburant de substitution. De nombreuses études ont également été menées sur l'utilisation des huiles de pyrolyses en combustion notamment, avec l'équipe du VTT : combustion sous pression d'azote, à 80°C pour réduire la viscosité et après filtration (20-25 microns) pour réduire la teneur en charbon.

### Bilan matière - Energie

Les rendements obtenus sur l'installation en fonction des conditions opératoires et de la matière première sont compris entre 65 -75 % pour les huiles, entre 10 – 15 % pour les charbons et 10 - 18 % pour les gaz non condensables.

### Qualité des huiles

Les caractéristiques des huiles sont reportées dans le tableau suivant :

Propriétés physiques	Valeurs
Pouvoir calorifique des huiles produites	16.5 - 17.6 MJ/kg
Densité	1.21 - 1.26
Viscosité à 25 °C	400 - 1200 cp

à 50 °C	55 – 150 cp
pH	1.95 – 2.60
Volatiles (102°C)	26 – 35 %
Teneur en eau	215 – 25 %
Teneur en Cendres	0.01 – 0.14 %
Particules de carbones (1.6 µm)	0.5 – 0.8 %
Solubilité dans l'eau	75 – 70 %

### Analyse critique

La construction a commencé en 1990 et fut livré par l'université de Waterloo en octobre 1992. En 1993 l'installation a fonctionné convenablement à 160 kg/h de bois sec. L'installation n'a pas posé de problèmes particuliers lors de son fonctionnement au delà des problèmes de démarrages et de modifications notamment sur la partie réception, stockage, des huiles, travaux classiques à réaliser pour ce type d'installation. L'arrêt de l'installation est intervenu aux environs de 1999, une fois les programmes de recherche terminés et à la suite d'un changement de politique générale de Union Fenosa qui a décidé d'arrêter les programmes biomasse. L'équipe qui a mis au point l'unité de Galice est également celle qui travaille en collaboration avec Dynamotive. L'expérience acquise a donc été capitalisée.

## Fiche Projet Pyrolyse n°2

<b>ENEL</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lit fluidisé circulant	
<b>Localisation :</b> Bastardo, Italie	<b>Etat actuel :</b> non opérationnel
<b>Contact :</b> Mr G. Neri ENEL production Via A Pisano 120, 56122 Pisa - Italie Tel : 39 050 53 5815 Fax : 39 050 53 5815 Email : <a href="mailto:nerig@pte.enel.it">nerig@pte.enel.it</a>	<b>Capacité :</b> 625 kg/h <b>Année :</b> 1998
ENEL, ARUSIA, la région de Umbria et l'Union Européenne ont financé quatre projets concernant ce pilote.	
<b>Source :</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Pyne newsletter, issu 11, may 2001</li><li>- Biomass gasification &amp; Pyrolyse, State of the art and future prospects ; T. Bridgwater &amp; M. Kaltschnitt, cpl press, juillet 1997</li><li>- Developpements in thermochemical biomass conversion, IEA Bioenergy, A. V. Bridgwater &amp; D. G. B. Boocock, Blackie Academic &amp; Professional, vol. 1, p433, 1997</li></ul>	

Enel (Office national d'énergie électrique) est une entreprise publique italienne qui a été fondée en 1963 et privatisée en partie (31,74% du capital ) en 1999 quand le secteur électrique italien a été libéralisé. Depuis les années 90, Enel a élargi ses activités en recherche et développement dans le domaine des énergies renouvelables et dispose actuellement, connectés au réseau électrique italien de 30 centrales géothermiques (580 MW), 273 centrales hydroélectriques (970 MW), 4 parcs éoliens (25 MW) et 3 installations photovoltaïques (3.5 MW).

ENEL fait également beaucoup de recherches dans le domaine de la combustion de diverses matières premières comme le gaz naturel, le pétrole, le charbon et de la biomasse. Dans le cadre de ses recherches, un projet pilote d'une unité de pyrolyse pour la production d'énergie a vu le jour à proximité de la ville de Bastardo. Ce projet en partenariat avec l'entreprise ARUSIA, a été financé par plusieurs contrats européens et par la région de Umbria.

L'unité de pyrolyse, de type lit fluidisé circulant, a été achetée à l'entreprise Ensyn (voir fiche constructeur n° 4). Les autres éléments du pilote ont été développés et construits par Enel et ARUSIA.

### Description de la technologie

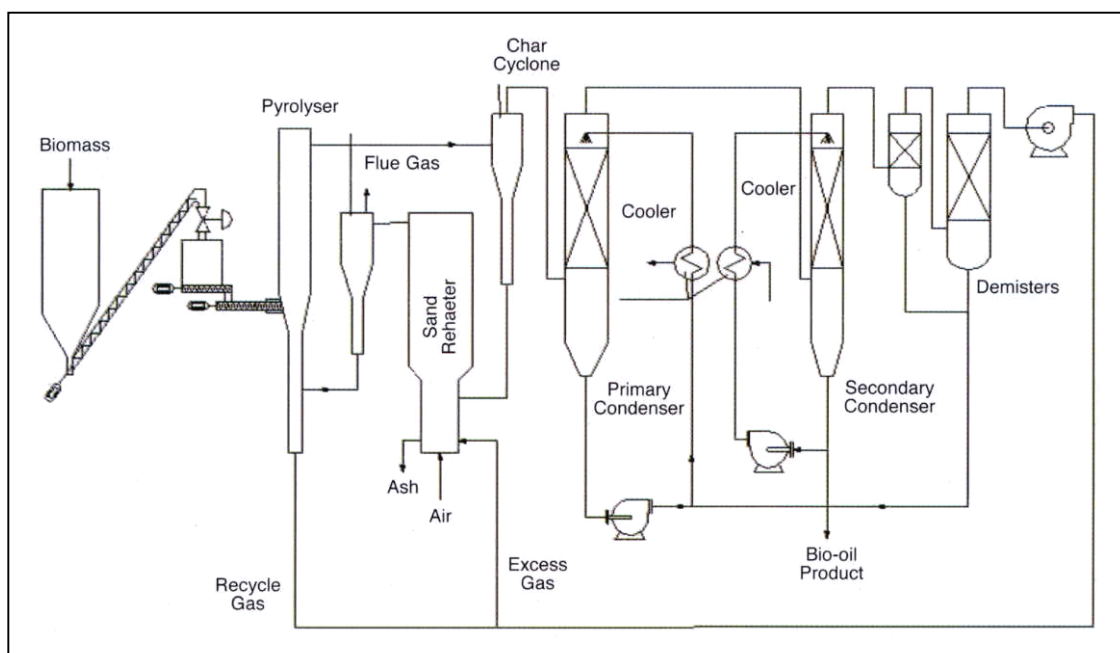
#### Matière première - type d'alimentation

La matière première pour être utilisable dans le réacteur RTP de Ensyn doit avoir un taux d'humidité inférieur à

10 % et une granulométrie inférieure à 6 mm. C'est pour cela que la matière première utilisée est essentiellement de la sciure de bois de feuillus. Celle-ci est préalablement séchée dans un séchoir solaire développé par l'entreprise ARUSIA. La matière première est transportée à l'usine par des camions, à partir desquels elle est transférée pneumatiquement dans un silo de stockage, le biomasse est alors envoyée à un silo d'alimentation, d'une capacité suffisante pour 5 heures de fonctionnement. Le système d'alimentation en sciure est conservé sous atmosphère d'azote pour éviter de possibles explosions.

### Procédé de pyrolyse

Un cyclone situé en sortie de réacteur de pyrolyse permet de séparer le sable et le charbon des gaz de pyrolyses. Le sable du lit est réchauffé dans un réacteur de combustion, dans lequel la chaleur est fournie par la combustion en présence d'air, du charbon et d'une partie des gaz non condensables. La température atteinte dans ce réacteur est proche de 760°C. Un cyclone en sortie de réacteur de combustion permet de purger le sable réchauffé des fines de charbons, celles-ci sont directement réintroduites dans le réacteur de combustion. Un système approprié de vannes permet de faire circuler les solides depuis les cyclones vers les deux réacteurs de pyrolyse et de combustion. La fraction gazeuse provenant du réacteur de pyrolyse est envoyée dans deux colonnes de refroidissement. Les liquides condensés sont récupérés au bas des colonnes et sont stockés dans un container. Près de 70 % des liquides recueillis se condensent dès la première colonne. Cette première fraction doit être filtrée avant d'être mélangée à la seconde. Les gaz non condensables passent dans un devésiculateur puis un filtre avant d'être utilisés pour fluidiser le lit ou pour être brûlé avec le charbon.



Représentation schématique de l'unité de pyrolyse de 625 kg/h développée par ENEL

### Performances

Après sa construction, en 1998 le pilote n'a fonctionné qu'occasionnellement pendant un an. Il est maintenant arrêté depuis 2 ans. Le pilote devrait cependant être redémarré dans le cadre d'un cinquième financement

européen pour un projet nommé PYROHEAT et en collaboration avec les entreprises finnoises VTT et Fortum, la compagnie italienne CCT et toujours l'entreprise ARUSIA.

### **Bilan matière - Energie**

Selon les seules données accessibles, le pilote pourrait produire 400 kh/h (64%) d'huile de pyrolyse avec une teneur en eau moyenne de 25 %.

### **Qualité des huiles**

Aucunes données concernant la qualité des huiles produites ne sont disponibles dans les publications et brochures concernant le projet Enel.

### **Analyse critique**

La technologie proposée par Ensyn n'est pas satisfaisante pour la production continue d'huile de bonne qualité et avec un niveau élevé de rendement. En effet, de nombreux problèmes techniques sont intervenus sur l'installation (condensation et obturation des tuyauteries, séparation des solides, ...) Ces problèmes ont été sous estimés car il ne se posaient pas aux USA.

### **Informations complémentaires**

L'objectif du nouveau projet PYROHEAT est de réussir à produire 100 tonnes d'huile pour tester les performances de deux types de chaudières commerciales allant de quelques centaines de kilowatts à quelques mégawatts. Des modifications vont être faites sur le pilote, comme l'ajout d'un second cyclone en sortie de réacteur pour améliorer l'épuration des solides dans les gaz et selon Enel réduire le taux d'eau dans les huiles.

## **ANNEXE 2**

### **Constructeurs de gazéifieurs**

#### **Fiches techniques**

<b>PROCEDE BIOFLOW FOSTER WHEELER</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lit fluidisé circulant à pression atmosphérique ou sous pression	
<b>Localisation :</b> Varnamo IGCC (Suède) Lathi Co-combustion (Finlande),	<b>Etat actuel :</b> Commercial
<b>Contact :</b> Ragnar Lundqvist Foster Wheeler Energia Oy- Helsinki Office P.O. Box 45 - Nuijamiestentie 3 - FIN-00401 Helsinki -FINLANDE <b>Tél :</b> 358-10-39311 <b>Fax :</b> 358-10-393-616	<b>Capacité :</b> 6 Mwe et 9 MWth pour unité de Varnamo en IGCC <b>Année :</b> 1993
<b>Financements :</b>	
<b>Source :</b> [1] "Värnamo demonstration programme – final report" K. Stahl, M. Neergaard, J. Nieminen, 1 <sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, 5-9 juin 2000, Espagne. Biomass CFB Gasifier-Demonstration Project : Kymijärvi Power Station at Lathi, Finland <b>Site :</b> <a href="http://www.fwc.com/">http://www.fwc.com/</a>	

Le procédé Bioflow de gazéification de bois est issu de l'expérience acquise par Foster Wheeler dans le domaine de la combustion du charbon dans des lits fluidisés sous pression et dans le domaine de la filtration par filtres céramiques – procédé PCFB Pyroflow. La technologie Pyroflow a été adaptée dans un premier temps pour la gazéification du bois à pression atmosphérique en vue d'une connexion sur une chaudière (projet Lathi entre autre), puis pour le développement d'une unité de gazéification à lit fluidisé sous pression en cycle combiné IGCC (Varnamo). Ce nouveau procédé a été baptisé Bioflow.

### Description de la technologie

Au travers du projet Värnamo, le procédé Bioflow est le premier système mettant en œuvre à une échelle de démonstration un gazogène à lit fluidisé circulant sous pression couplé à une turbine à gaz et une turbine à vapeur. L'installation de Värnamo comprend :

- le séchage du bois pour atteindre des taux d'humidité compris entre 10 et 20 %
- la gazéification sous pression (20 bars) entre 950-1000 °C avec de l'air comme agent oxydant
- le craquage des goudrons dans le même réacteur à l'aide de dolomie comme catalyseur
- le refroidissement des gaz jusqu'à 350°C
- la filtration des gaz dans des filtres céramiques puis métalliques
- la turbine à gaz d'une puissance de 4.1 MWe
- la chaudière à vapeur avec surchauffeur et turbine à vapeur pour la production d'électricité complémentaire (2 MWe) et de chaleur (6MWth).



Le schéma de principe de l'installation est représenté sur la figure 1.

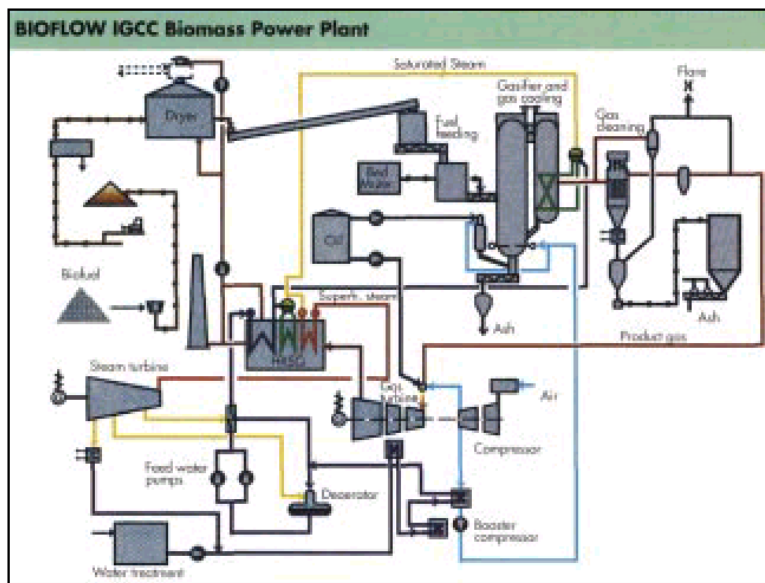


Figure 1 : Principe de l'installation de Värnamo

### **Matière première, type d'alimentation**

La matière première est constituée de divers déchets de bois et plaquettes humides. Ceux-ci sont initialement séchés à l'aide d'un sécheur tambour rotatif, puis broyés et conditionnée sous forme de pellet. Le combustible ainsi préparé est de taille homogène (1 cm) avec une teneur en humidité voisine de 15%. Il est alors introduit dans une trémie ou sas étanche et amenée à une pression imposée par le compresseur de la turbine à gaz. La phase de pressurisation étant réalisée, les pellets sont transportés au réacteur de gazéification (en partie basse) par vis d'alimentation. L'alimentation s'effectue juste au dessus de la grille de fluidisation, alors que l'air, après compression est totalement injecté au niveau inférieur du gazogène sous la grille. Le débit d'alimentation donné par le constructeur est d'environ 4 t/h.

### **Procédé de gazéification**

Le lit fluidisé circulant sous pression est constitué du réacteur de gazéification proprement dit et d'un cyclone haute température pour la séparation des particules solides (cendres, carbone et sable/dolomie) et du gaz de gazéification. La partie solide est réinjecté dans le bas du réacteur où le carbone restant est brûlé. La chaleur de combustion ainsi obtenue est utilisée comme source d'énergie pour la gazéification. L'ensemble réacteur et cyclone est entièrement revêtu intérieurement de réfractaire pour la tenue en température. Une particularité du cyclone réside dans le fait que le gaz de gazéification ainsi que les particules solides sont récupérées dans la partie inférieure du cyclone limitant ainsi selon le constructeur le volume d'occupation de l'installation et la tuyauterie nécessaire. Les pressions et températures de fonctionnement sont typiquement de 20 atmosphères et de 950-1000°C pour assurer à la fois un taux de conversion élevé et un craquage des goudrons. L'agent oxydant employé est l'air.

### **Systeme d'epuration des gaz**

Les goudrons obtenus durant la gazéification sont traités dans un premier temps in situ dans le réacteur par craquage catalytique. Pour cela, le fluide caloporteur utilisé dans le lit fluidisé qui est la dolomie joue également le rôle de catalyseur pour le craquage. Les gaz de gazéification obtenus sont alors séparés des particules solide au niveau du cyclone, puis refroidis au travers d'échangeurs situés en partie inférieure du même cyclone. La température atteinte alors par les gaz est de l'ordre de 350-400°C. Ces derniers sont alors dirigés vers un système de filtre à chaud : filtres céramiques de type Schumacher dans un premier temps, puis métalliques en fin de programme, pour assurer la filtration des fines avant injection du gaz dans la turbine à gaz.

### **Production chaleur et/ou électricité**

La production d'électricité est assurée dans un premier temps par l'injection du gaz épuré dans la turbine à gaz de type Typhoon de ABB Alstom Gas Turbines. Celle-ci génère une puissance électrique de 4,2 MWe après avoir subi quelques modification au niveau de la partie combustion pour tenir compte du faible pouvoir calorifique du gaz (5 MJ/Nm<sup>3</sup>). Après combustion des gaz, une partie de la chaleur des fumées est récupérée via des échangeurs thermiques pour le surchauffage de vapeur (40 bars, 450°C) et la production d'énergie électrique supplémentaire dans une turbine à vapeur (Turbinenfabrik Nadrowski GmbH). La puissance électrique supplémentaire produite est de 1,8 MWe.

### **Performance**

#### **Nombre d'heure de fonctionnement**

La durée totale de fonctionnement annoncée par Foster Wheeler est de 8500 heures pour le réacteur de gazéification dont 3600 en condition de couplage complète [1].

#### **Qualités des gaz**

Les caractéristiques moyennes des gaz de l'installation de Värnamo sont données dans le tableau ci-après :

CH <sub>4</sub> (% v/v, b.s)	5.8 - 7.5
H <sub>2</sub> (% v/v, b.s)	9.5-12
CO (% v/v, b.s)	16-19
CxHy (% v/v, b.s)	-
CO <sub>2</sub> (% v/v, b.s)	14.4 – 17.5
N <sub>2</sub> (% v/v, b.s)	48 – 52
Benzène g/Nm <sup>3</sup>	5 -9
Goudrons légers g/Nm <sup>3</sup>	1.5 –3.7
Goudrons lourds g/Nm <sup>3</sup>	0.5 -0.7
PCI MJ/Nm <sup>3</sup>	5.3 – 6.3

\* les goudrons légers : composés dont les poids moléculaires sont compris entre 79 et 200 g/mole.

## Rendement énergétique

Les données mesurées sur l'installation de Varnamo sont données dans le tableau suivant :

Débit combustible kg/h	3276
PCI combustible 40% bois 60 % écorces MJ/kg	16.5
Energie combustible entrant MWpci	15
Facteur de charge %	77
Production électrique TAG MWh	3.25
Production électrique vapeur MWh	1.36
Production électrique total MWh	4.61
Consommation auxiliaires MWh	0.39
Rendement électrique (15°C %)	28.1
Rendement électrique calculé (0 °C , 100 % charge) %	31.8
Production thermique MWh	11.3
Rendement global (à 15 °C) %	75
Rendement global calculé (0 °C , 100 % charge) %	81

## Expertise technique

### Critique technique

L'unité de Värnamo représente la première démonstration de la gazéification de bois en cycle combiné. A ce titre, elle a apporté une certaine crédibilité à la filière et suggère également des pistes et des choix technologiques intéressants à développer. Les problèmes rencontrés ont été nombreux et ont concerné dans un premiers temps, l'alimentation sous pression du réacteur pour enfin porter pratiquement exclusivement sur la qualité des gaz (goudrons, alcalin, particules). L'installation est arrêtée à ce jour pour des raisons de coût de fonctionnement. Il s'agit en effet d'une installation pilote de R&D. EDF qui a participé au financement des essais aux côtés de SYDKRAFT qui était propriétaire de l'unité, dispose de toutes les informations pratiques ce qui est d'un grand intérêt.

### Avantages / Inconvénients du procédé

Avantage :

- Forte puissance possible par lit fluidisé
- Système circulant qui autorise une souplesse du procédé durant l'alimentation
- Craquage catalytique à haute température in situ dans le réacteur (à démontrer en condition industrielle pour le recyclage de la dolomie)
- Gazéification sous pression supprimant l'étape de compression des gaz pour un couplage TAG
- Filtration à chaud par nouvelle technologie filtre métalliques (350°C)
- gazéification à l'air

Inconvénient :

- Faible granulométrie de la biomasse propre aux lits fluidisés
- Gazéification sous pression qui induit des coûts élevés
- Faible PCI du gaz obtenu du fait de la gazéification à l'air

<b>PROCEDE TPS BIG-CC atmospheric-pressure Biomass InteGrated Combined-Cycle</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lit Fluidisé circulant à pression atmosphérique	
<b>Localisation :</b> Grève (Italie), Selby, Yorkshire (Angleterre), Bahia (Brésil, en cours)	<b>Etat actuel :</b> commercial
<b>Contact :</b> Erik RENSFELT - Processer AB Studsvik - 61182 Nyköping - Angleterre <b>Tel :</b> 46 155 22 13 00 <b>Fax :</b> 46 155 26 30 52 <b>E-mail :</b> <a href="mailto:erik.rensfelt@tps.se">erik.rensfelt@tps.se</a> <b>Site Web :</b> <a href="http://www.tps.se">http://www.tps.se</a>	<b>Capacité :</b> 15 – 75 MWth <b>Année :</b> 1991 - 2002
<b>Financements :</b>	
<b>Source :</b> [1] Fluidised Bed Deliveries – TPS Reference List on internet site : <a href="http://www.tps.se">www</a> . [2] "Electricity production from solid waste fuels using advanced gasification technology", M. Morris, Swana's wastecon 1998/ISWA World Congress, 26-29 October 1998. North Carolina, USA. [3] "Atmospheric CFB gasification – The Grève plant and beyond", E.K.W. Rensfelt, International conference on gasification and pyrolysis of biomass, 9-11 April 1997, Germany. [4] "Update on project ARBRE : wood gasification plant utilising short rotation coppice and forestry residues", E. Rensfelt, D. Everard, Seminar on Power production from biomass III, 14-17 September 1998, Finland. [5] "Update on the progress of the Brazilian wood BIG-GT demonstration project", L. Waldheim, E. Carpentieri, Special Biomass Session, ASME Turbo Expo 98, 2-5 Juin 1998, USA [6] <a href="http://www.btgworld.com/gi/">http://www.btgworld.com/gi/</a>	

La société TPS est spécialisée dans le développement et la commercialisation de chaudières à lit fluidisé. Une liste de référence fournie par ce constructeur fait état de la commercialisation de plusieurs chaudières biomasse à lit fluidisé circulant dans des domaines de puissance comprises entre 1 et 180 MWth [1]. En 1984-1985, TPS s'est lancé dans le développement de la gazéification de biomasse par lit fluidisé circulant avec la construction d'un pilote de 2 MWth en Suède. Ce pilote a été complété à partir de 1988 par la mise en place d'une unité de craquage catalytique des goudrons, et le couplage à un moteur diesel [2].

Depuis cette date, trois projets de démonstration sont en cours de réalisation à différents niveaux. Il s'agit du projet Grève-in-Chianti en Italie qui a débuté en 1991 (deux lits fluidisés de 15 MWth chacun) [3], du projet Arable Biomass Renewable Energy (ARBRE) en Angleterre (26 MWth) [4] qui devrait être réceptionné en fin 2001 avec 1 an de retard, et du projet Biomass Integrated Gasification – Gas Turbine (BIG GT) au Brésil (75 MWth) [5], ce dernier rencontrant beaucoup de difficultés. Ces projets sont basés sur la technologie intitulée BIG-CC technology. Seule la partie traitement de gaz et production d'électricité varient entre le projet Grève qui utilise une turbine à vapeur et les deux projets plus récents prévoyant l'utilisation d'une turbine à gaz.

### Matière première, type d'alimentation

Des déchets banals sous forme de pellets sont utilisés pour le projet implanté à Grève (200 tonnes/jour). La granulométrie maximale acceptée est de 150 mm de long [6]. Dans le cadre des projets de démonstration en cours, les TCR de saule et la bagasse seront employés. Aucune donnée précise n'a été trouvée sur la caractéristiques de la biomasse utilisée en terme de composition, de granulométrie, d'humidité, etc... Dans tous les cas, le système d'alimentation prévu par TPS se fera en partie basse du lit fluidisé, juste au dessus de la grille de fluidisation. Le combustible serait introduit seul ou en mélange avec le sable si nécessaire. L'introduction serait assurée par vis d'alimentation.

### Procédé de gazéification

Un schéma de principe de la technologie BIG-CC est présenté en figure ci-dessous. Ce procédé comprend une unité de préparation et de séchage de bois, un réacteur de gazéification à lit fluidisé circulant à pression atmosphérique travaillant à une température de 850-900°C, un second réacteur de type lit fluidisé pour le craquage catalytique des goudrons, puis le refroidissement et la purification des gaz obtenus par filtration et épuration à l'aide de cyclones. Le gaz serait ensuite dirigé vers un compresseur étagé avant d'être introduit dans une turbine à gaz pour y être brûlé. Parallèlement à cela, l'énergie thermique contenue dans les fumées de combustion serait partiellement récupérée via des échangeurs pour la production d'électricité complémentaire à partir d'une turbine vapeur. L'agent oxydant employé est de l'air qui est introduit en plusieurs points du réacteur. L'air primaire est admis directement sous la grille de fluidisation, l'air secondaire sur plusieurs niveaux au dessus de la grille.

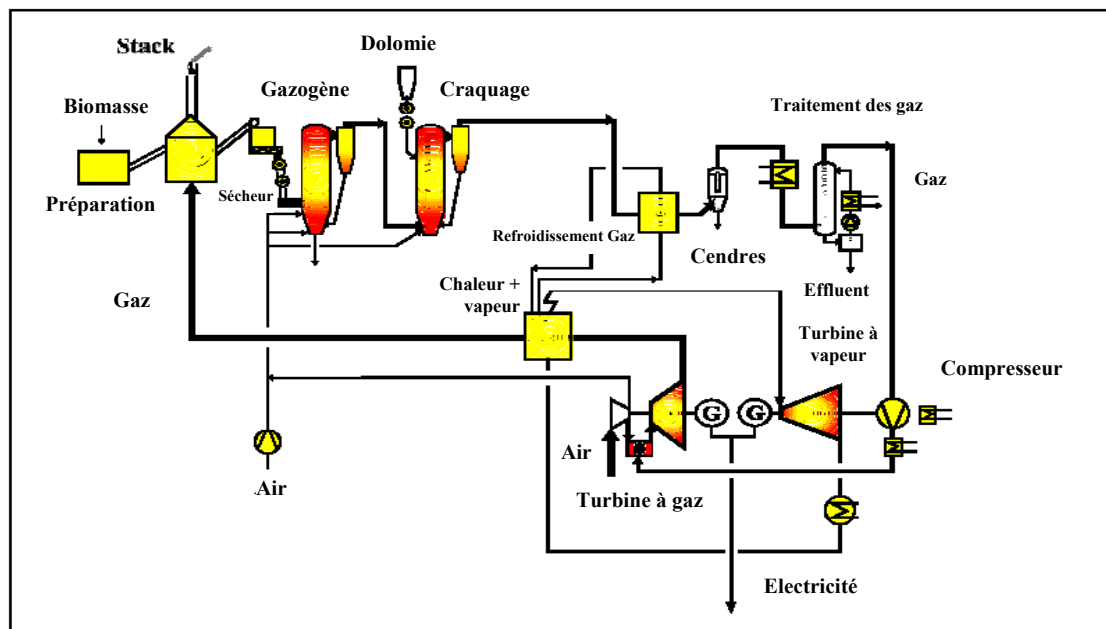


Schéma de principe de la technologie BIG-CC

### **Systeme d'epuration des gaz**

L'epuration des gaz n'est envisagee que pour l'utilisation de la turbine a gaz. L' unite de traitement serait situee juste apres le lit fluidise. Le traitement des gaz de gazification sera realise en plusieurs etapes en sortie du gazogene. Les goudrons de gazification subiront un craquage catalytique dans un lit fluidise circulant a 900°C a pression atmospherique. Le catalyseur qui sera employe par TPS est la dolomie (chaux) pour laquelle des essais sur l' unite pilote ont ete realises. Les gaz ainsi traites seront ensuite refroidis au travers d' echangeurs thermiques avant de subir une filtration a temperature moderee (200°C environ) sur des filtres conventionnels de type cyclone et filtres a manche. Un lavage humide completera ensuite le depoussierage des gaz avant compression de ces derniers dans la chambre de combustion associee a la turbine a gaz.

### **Production chaleur et/ou electricite**

#### **Projet Grève**

La production d'electricite est assuree via une turbine a vapeur d' une capacite de 6.7 MWe. Dans cette configuration, TPS a choisi une configuration ou seul le depoussierage des gaz de gazification est realise en sortie du gazogene. Les gaz de combustion issus de la chaudiere sont quant a eux nettoyes par un systeme de depoussierage (technologie Teller de Research-Cottrell) avant d' etre diriges vers la cheminee.

#### **Projet ARBRE**

European Gas Turbine (EGT) devrait fournir la turbine a gaz de type Typhoon. Cette turbine sera modifiee en vue de pouvoir utiliser des gaz a faible pouvoir calorifique comme ceux issus de la gazification escomptee de 4-7 MJ/Nm<sup>3</sup>. La puissance electrique produite sera de 8 MWe.

#### **Projet Brésil**

La turbine a gaz LM2500 commercialisee par General Electric a ete choisie pour ce projet. Cette turbine sera modifiee pour tenir compte du faible PCI des gaz de gazification, et la puissance electrique generatee alors serait egale a 30 MWe.

### **Performances**

Seule l' installation de Grève en Italie a ete construite et testee par TPS. Ce constructeur precise que depuis 1993 plus de 6200 MWth a ete produit par cette installation sans pour autant indiquer le rendement electrique net atteint dans sa configuration finale. Les deux autres projets qui sont en cours de realisation n' ont pas encore atteint la phase de test. Les objectifs annonces par TPS en terme de rendement electrique net sont respectivement de 30 % pour le projet ARBRE [4] et de 40 % pour le projet Bresilien [5].

### **Bilan matiere – Energie**

Le tableau 1 indique les principales caracteristiques des gaz produits sur l' installation de Grève en Italie. Il convient de remarquer que le pouvoir calorifique avance ne correspond pas aux caracteristiques du gaz.

	DIB (T= 850°C)
Débit d'alimentation solide (t/j)	200
Humidité (%)	-
HHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )	7,4
Efficacité % (gaz froid)	-
Cendres (kg/h)	-
Particule (g/Nm <sup>3</sup> )	48
Gaz (Nm <sup>3</sup> /h)	4.5
Goudrons (g/Nm <sup>3</sup> )	84

Composition des gaz	
H <sub>2</sub> O (% v/v, b.s)	9.5
CH <sub>4</sub> (% v/v, b.s)	6.5
N <sub>2</sub> (% v/v, b.s)	45.8
H <sub>2</sub> (% v/v, b.s)	8.6
CO (% v/v, b.s)	8.8
CO <sub>2</sub> (% v/v, b.s)	15.65
CxHy (% v/v, b.s)	4.9
O <sub>2</sub> (% v/v, b.s)	-
H <sub>2</sub> S (ppm, b.s)	48.6

Tableau 1 : Données sur l'installation de Grève [3]

### Analyse critique

Les principaux avantages du procédé sont liés à ceux des lits fluidisés circulants avec une bonne maîtrise du procédé compte tenu des antécédents chaudière de la société. TPS constitue, à n'en pas douter, une des sociétés les plus avancées dans le domaine de la gazéification de la biomasse. Le craquage catalytique à température modérée en lit fluidisé reste à démontrer à l'échelle industrielle. La principale limite de l'installation concerne son couplage à une turbine avec une unité de gazéification à pression atmosphérique qui nécessite une étape de compression des gaz avant injection dans une turbine à gaz et une concentration en particules et goudrons élevés respectivement 48 et 84 g/Nm<sup>3</sup>.

### Coûts

Dans le cadre du projet Brésilien, TPS fournit une estimation de coûts d'investissement et de production en fonction de la maturité du procédé, installation de démonstration et installation commerciale (tableau 2). Ces chiffres sont très sous estimés notamment pour l'unité de démonstration.

Coût d'investissement (Euro/kW)		
Investissement	Unité de démonstration	Unité commerciale
Préparation de la matière première	200	100
Gazéification	1 300	600
Unité de production électrique	1 000	800
<b>Total</b>	<b>2 500</b>	<b>1 500</b>

Tableau 2 : Estimation des coûts d'investissement pour le projet Brésilien

### Informations complémentaires

#### Contact des clients

Projet Grève-in-Chianty, Ansaldo Aerimpianti : S.A.F.I Servizi Ambientali Area – Fiorentina S.P.A. –

Tél : +39 055 644655

Projet ARBRE: Mr Keith Pitcher Tél : +44-113-2343234 Fax : +44-113-231270

e-mail : [keith.pitcher@first-renewables.com](mailto:keith.pitcher@first-renewables.com)

Projet Brésilien : Banque mondiale, Swedish Technical Development Board (Maintenant 'Statens Myndigheten', STEM)

<b>PROCEDE BATTELLE/FERCO</b>	
<b>Type de procédé</b> : réacteurs de gazéification et de combustion à lits fluidisés	
<b>Localisation</b> : Columbus (Ohio, USA)	<b>Etat actuel</b> : transfert de licence à FERCO
<b>Contact</b> : Mark A. Paisley - Corp 3500 Parkway Lane, Ste 440 - Norcross, GA <b>Tel</b> : 770-662-7800 <b>Fax</b> : 770-662-7807	<b>Capacité</b> : 5 MWth <b>Année</b> : 1980
<b>Financements</b> : US Department of Energy	
<b>Source</b> : - Biomass, A Growth Opportunity In Green Energy And Value-Added Products, Proceedings of the 4 <sup>th</sup> Biomass Conference of the Americas, R. P. Overend and E. Chornet, Pergamon, Volume 2, p 1061-1064. - A survey of biomass gasification 2001, T. B. Reed and S. Gaur, 2 <sup>nd</sup> edition,	

Battelle est un centre de recherche (750 chercheurs) qui travaille dans de très nombreux domaines et plus particulièrement dans l'énergie et l'environnement et qui assure la tutelle ou la co-tutelle des principaux laboratoires de recherche sur l'énergie et notamment le NREL. Battelle a entrepris des recherches assez nombreuses sur la pyrolyse et la gazéification de la biomasse à partir de la fin des années 70 et est à l'origine du projet industriel FERCO / Battelle, à Burlington (Vermont, USA).

### Description de la technologie

#### Matière première, type d'alimentation

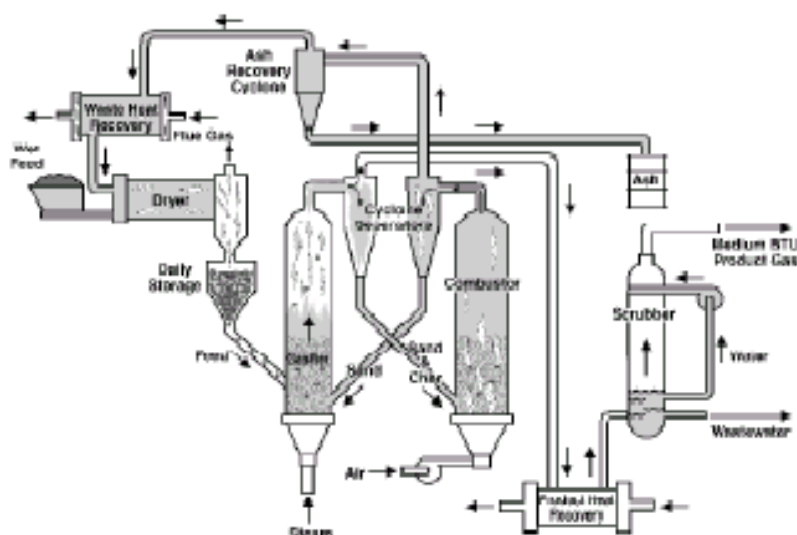
Biomasse sèche : bois, plantes herbacées, RDF. La nature de la biomasse n'influence pas les performances du système. Cependant pour que le rendement soit maximal, la biomasse doit être introduite sous forme de morceaux de petites tailles avec un taux d'humidité inférieur à 38%. Le système de transport et d'alimentation en biomasse est pneumatique.

#### Procédé de gazéification

Le principe du procédé Battelle est basé sur le partage des étapes de gazéification dans deux lits fluidisés circulants couplés comme illustré dans figure ci après :

1. Un premier réacteur de gazéification fonctionne à une température comprise entre 600 et 1000°C en utilisant la vapeur comme agent réducteur. La biomasse est convertie en gaz à moyen pouvoir calorifique riche en goudrons (18-22 MJ/Nm<sup>3</sup>) et en charbon. Le charbon sous forme de fines particules, 20 % en masse, et le sable sont extraits du réacteur et séparés au moyen d'un ensemble de cyclones. Les gaz produits sont refroidis et nettoyés dans une tour de lavage. Les goudron condensés (0.05 kg/kg de biomasse) sont séparés des eaux de lavage et collectés pour être brûlés en phase de démarrage du réacteur.





2 - Charbon et sable sont dirigés vers le second réacteur dans lequel intervient la combustion du charbon en présence d'air (température de 1200°C) afin de fournir la chaleur nécessaire à la réaction endothermique de gazéification. Le transfert de chaleur est assuré par le sable qui circule ainsi entre les deux réacteurs à l'aide d'une L-valve fonctionnant avec de l'azote. Les gaz de combustions débarrassés du sable sont utilisés pour le séchage de la matière première.

### Production chaleur et/ou électricité

Dans sa première version, le procédé de gazéification était couplé à une chaudière et brûlé pour produire de l'électricité. L'idée de départ consistant à disposer d'une solution qui permette un couplage avec des unités gaz ou fuel-oil tout en offrant de meilleurs rendements qu'avec les solutions biomasse conventionnelles à grille et des émissions contrôlées.

### Performance

#### Bilan matière – Energie

Les résultats de la première unité du Vermont sont donnés dans le tableau ci dessous.

	<b>Gazéification</b>
Biomasse	Plaquettes de bois,
Produit principal (Rdt) :	Gaz combustible (75%)
1 <sup>er</sup> sous-produit (Rdt) :	Charbon (20%)
2 <sup>em</sup> sous-produit (Rdt) :	Goudron (5%)
Alimentation en biomasse	1000 kg/h
Type de réacteur	Double lit fluidisé circulant
Pression	atmosphérique
Température gazéification	600 – 1000°C
Agent de gazéification	vapeur
Consommation d'air (combustion charbon)	0.08 kg/kg de bois sec
Consommation de vapeur	0.31 kg/kg de bois sec

<b>Composition des gaz</b>	<b>% volume</b>
H <sub>2</sub>	17.5
CO	50.0
CO <sub>2</sub>	9.4
CH <sub>4</sub>	15.5
C <sub>2</sub> <sup>+</sup>	7,1
Production spécifique	0,8 Nm <sup>3</sup> /kg
Température gaz sortie	820°C
PCI	18,5 MJ/Nm <sup>3</sup>

### Expertise technique

#### Analyse Critique

L'installation a parfaitement fonctionné en combustion et a démontré sa faisabilité technique. Cependant, la forte concentration en goudrons dans le gaz a toujours posé des problèmes et est à l'origine aujourd'hui des difficultés que rencontre FERCO dans le démarrage de l'unité de démonstration en cycle combiné.

<b>PROCEDE LURGI</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lit Fluidisé circulant à pression atmosphérique	
<b>Localisation :</b> Ratingen GERMANY	<b>Etat actuel :</b> commercial
<b>Contact :</b> Greil Claus - Lurgi Envirotherm GmbH, Berliner Strasse 93, 40880 Ratingen, GERMANY <b>Tel :</b> +49 21 02 92 21 40 <b>Fax :</b> +49 21 02 92 24 00 <b>E-mail :</b> <a href="mailto:claus_greil@lurgi.de">claus_greil@lurgi.de</a> <b>Site web :</b> <a href="http://www.Lurgi.com">http://www.Lurgi.com</a>	<b>Capacité :</b> 100 MWth <b>Année :</b> 1983
<b>Financements :</b>	
<b>Source :</b> [1] "The realisation of a biomass-fuelled IGCC plant in Italy", H.J. de Lange, P. Barbucci, 1 <sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, 5-9 juin 2000, Espagne. [2] Energy and electricity form biomass, forestry and agricultural waste -1 <sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, 5-9 juin 2000, Espagne.	

LURGI a mis en place un lit fluidisé circulant pilote de 1,7 MWth depuis 1983. Cette unité a fonctionné plus de 6000 h pour des séries de tests sur différents combustibles.

### Description de la technologie

#### Matière première, type d'alimentation

Les matières premières testées sont les écorces, le bois, les herbes, les plaquettes de TCR, ... et différents déchets plus ou moins contaminés tels que le bois de démolition, les plastiques,... ainsi que des combustibles plus conventionnels : lignite, tourbe.... Le mode de préparation est adapté à chaque matière première, aucune innovation particulière n'est à noter à ce niveau.

#### Procédé de gazéification

Le lit fluidisé circulant est assez classique, il comprend un réacteur, un cyclone de séparation des solides et une jambe de retour de solide dans le lit équipé d'un système de siphon. Les vitesses de fluidisation sont comprises en 5 et 8 m/s permettant un entraînement de la quasi intégralité des solides et un bon contact gaz/solide. Le réacteur travaille à pression atmosphérique (1.3 bars) à une température comprise entre 800 et 950°C. L'agent oxydant et l'air qui est distribué en air primaire sous la grille et en air secondaire au dessus du niveau de l'alimentation en combustible.

#### Système d'épuration des gaz

La seule installation actuellement équipée de système de traitement de gaz est l'unité de Hollande. La matière première (plaquette de bois) est gazéifiée à 850°C directement sans séchage préalable. En sortie de gazéifieur, le gaz est refroidi à 230°C. La chaleur récupérée permet la production de vapeur surchauffée (55 bars). Les gaz

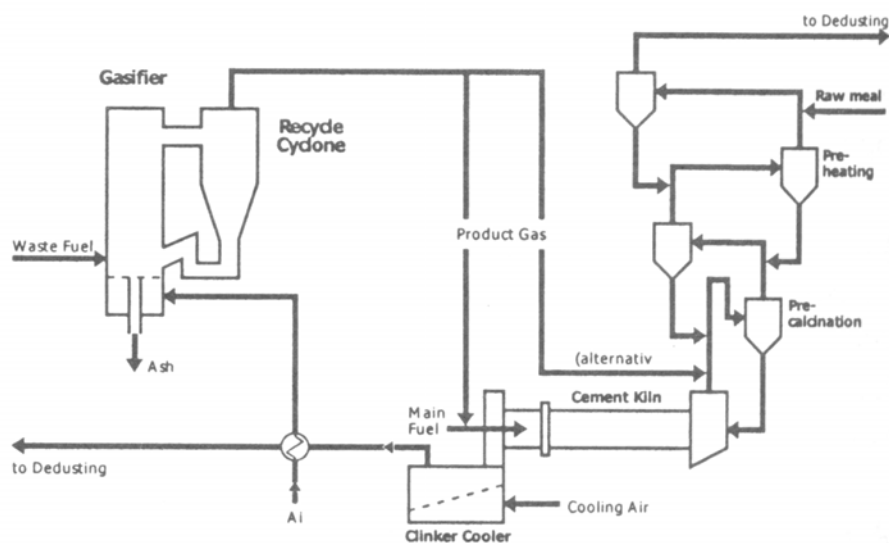
sont filtrés en filtre à manche pour atteindre un niveau de poussières inférieur à  $5 \text{ mg/Nm}^3$ . Le gaz est ensuite dirigé vers un laveur au niveau duquel il est débarrassé de l'ammoniaque. Le gaz est alors réchauffé pour être envoyé à l'unité de génération électrique. Le système décrit ne fait pas mention des goudrons. Il est probable que cet aspect ait été totalement sous-estimé sur cette unité (aucune information n'a été collectée à ce sujet).

Un projet en cycle combiné BIOELETRICA est en cours de montage. Les technologies de nettoyage retenues y seraient assez classiques. Les gaz seraient refroidis, dans un premier temps, à une température intermédiaire acceptable pour une filtration ultérieure dans un filtre à manche, sans pour autant débiter la condensation des goudrons. Après cela, le gaz nettoyé des particules solides serait lavé et refroidi dans une tour de lavage. Avant d'être injecté dans le compresseur, le gaz subirait un dernier lavage en forçant le contact des gaz avec une huile pour supprimer les goudrons. Les goudrons ainsi récupérés seraient séparés des huiles de lavages et injectés dans un brûleur dédié. Les fumées de combustion seraient alors réinjectées dans le réacteur de gazéification. De la même manière, les poussières récupérées au niveau du filtre à manche seraient dirigées vers un brûleur spécifique. Les fumées de combustion seraient également réinjectées dans le réacteur de gazéification après avoir été refroidies par échange thermique indirect avec l'air de gazéification.

### Production chaleur et/ou électricité

La majorité des installations en fonctionnement aujourd'hui sont des installations fonctionnant en combustion :

- 27 MWth à Pölo en Autriche (1987), unité fonctionnant aux écorces. Après un dépoussiérage sommaire, les gaz sont envoyés dans un four à chaux tournant. L'unité est aujourd'hui arrêtée pour raison économique.
- 100 MWth en Allemagne pour alimenter un four de cimenterie ( voir figure ci dessous). Le combustible est constitué de lignites cendreuses, de bois et autres résidus. L'unité fournissant 40% des besoins de la cimenterie sans traitement de gaz particulier avant combustion. Une partie des gaz produits ont également été testés dans une chaudière à charbon qui était présente sur le site.
- Une unité de 85 MWth équipée d'une unité de traitement de gaz ( $\text{HCl}$ ,  $\text{NH}_3$ ) a été construite en Hollande et alimenterait une unité de production d'électricité.



## Performances

### Bilan matière – Energie

Le tableau ci-dessous présente la composition moyenne des gaz de gazéification obtenus sur la pilote à partir de bois.

	(T= 800 – 950 °C)	Composition des gaz	
Débit d'alimentation solide (t/j)		H <sub>2</sub> O (% v/v)	7
Humidité (%)	-	CH <sub>4</sub> (% v/v)	4
HHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )	6,5	N <sub>2</sub> (% v/v)	42
Efficacité % (gaz froid)	-	H <sub>2</sub> (% v/v)	13
Cendres (kg/h)	-	CO (% v/v)	22
Particule (g/Nm <sup>3</sup> )	40 - 60	CO <sub>2</sub> (% v/v)	12
Gaz (Nm <sup>3</sup> /h)	-	CxHy (% v/v)	-
Goudrons (g/Nm <sup>3</sup> )		O <sub>2</sub> (% v/v)	-
		H <sub>2</sub> S (ppm,)	

### Expertise technique

#### Critique technique

Le procédé de gazéification à lit fluidisé circulant à pression atmosphérique nécessite un nettoyage poussé et une compression des gaz avant l'entrée en turbine à gaz. Les solutions adoptées pour cela sont très classiques et n'ont pas vraiment prouvé leur efficacité au moins sur de petites unités. Le traitement des goudrons est en effet basé uniquement sur des successions de lavage et de filtration alors que les températures de gazéification sont moyennes (900°C maximum) conduisant à une production de goudrons significative. Les résultats de l'unité Bioelettrica seront à ce niveau fort intéressants.

Le traitement des effluents liquides (goudrons) et solides (particules après le filtre à manche) par combustion puis réinjection des fumées dans le réacteur de gazéification semble être une solution difficile complexe.

#### Avantages / Inconvénients du procédé

Les avantages du procédé sont ceux des LFC avec quelques années d'expérience en co-gazéification. Par contre, il semblerait qu'il y ait une sous estimation des problèmes relatifs au traitement des gaz. De même, la température de gazéification est limitée (<900°C) ce qui induit une efficacité de conversion diminuée avec une qualité des gaz moyenne. Enfin, la gazéification à pression atmosphérique nécessite une étape de compression des gaz avant injection dans une turbine à gaz. En conclusion, il s'agit d'un système de traitement basé sur des choix techniques simples mais dont le couplage est complexe. La faisabilité technique est à démontrer et sera très intéressante.

<b>BABCOCK WILCOXVØLUND</b>	
<b>Type de procédé :</b> lit fixe à contre-courant	
<b>Localisation :</b> Kolding, Danemark	<b>État actuel :</b> Commercial
<b>Contact :</b> O.Kristensen      Centre Centervej 2, DK 6000 Kolding <b>Tél :</b> 45.75.56.8874 <b>Fax :</b> 45.75.56.8873	<b>Capacité :</b> 4,8 MW <b>Année :</b> 1980
<b>Financements :</b> Babcock & Wilcox Vølund	
<b>Source :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– A survey of biomass gasification 2001, T. Reed, S. Gaur, The national Renewable Energy Laboratory and The Biomass Energy Foundation, 2<sup>nd</sup> Edition</li> <li>– <a href="http://www.btgworld.com/gi">www.btgworld.com/gi</a></li> <li>– <a href="http://www.volund.dk">www.volund.dk</a></li> <li>– <a href="http://www.dfait-maeci.gc.ca/francais/geo/europe/Den_envf.htm">www.dfait-maeci.gc.ca/francais/geo/europe/Den_envf.htm</a></li> </ul>	

L'entreprise danoise Vølund Ecology Systems est à l'origine une propriété de la compagnie Ansaldo, en Italie. Cette dernière a récemment été achetée par Babcock & Wilcox International Investments, une filiale de la compagnie américaine McDermott (New Orleans). L'entreprise qui a maintenant pris le nom « Babcock & Wilcox Vølund » s'intéresse essentiellement à la production d'énergie à partir de biomasse et de déchets, par incinération et gazéification.

Les ministères de l'Environnement et de l'Énergie du Danemark ont fixé des objectifs pour le recyclage des quelques 9 millions de tonnes de déchets produits chaque année par les ménages et l'industrie danoise. Les municipalités danoises peuvent confier l'élimination des déchets à des soustraitants privés, ce qui génère tout un nouveau marché pour de nouvelles technologies de recyclage et de nouveaux circuits de vente et de distribution de produits recyclés. Près de 80% des déchets domestiques non recyclables sont incinérés et Babcock & Wilcox Vølund est la principale entreprise au Danemark fournissant des installations de production d'énergie à partir de déchets. 70% du travail de R&D effectué au centre de Babcock Wilcox et Vølund concerne la gazéification de biomasse et de déchets. L'objectif principal est aujourd'hui de faire fonctionner des moteurs à gaz en utilisant le gaz produit par les gazogènes contre-courants développés par Vølund.

### **Description de la technologie**

#### **Matière première, type d'alimentation**

L'essentiel de la matière première gazéifiée est constitué de plaquettes de bois :

Taille de 1-8 cm

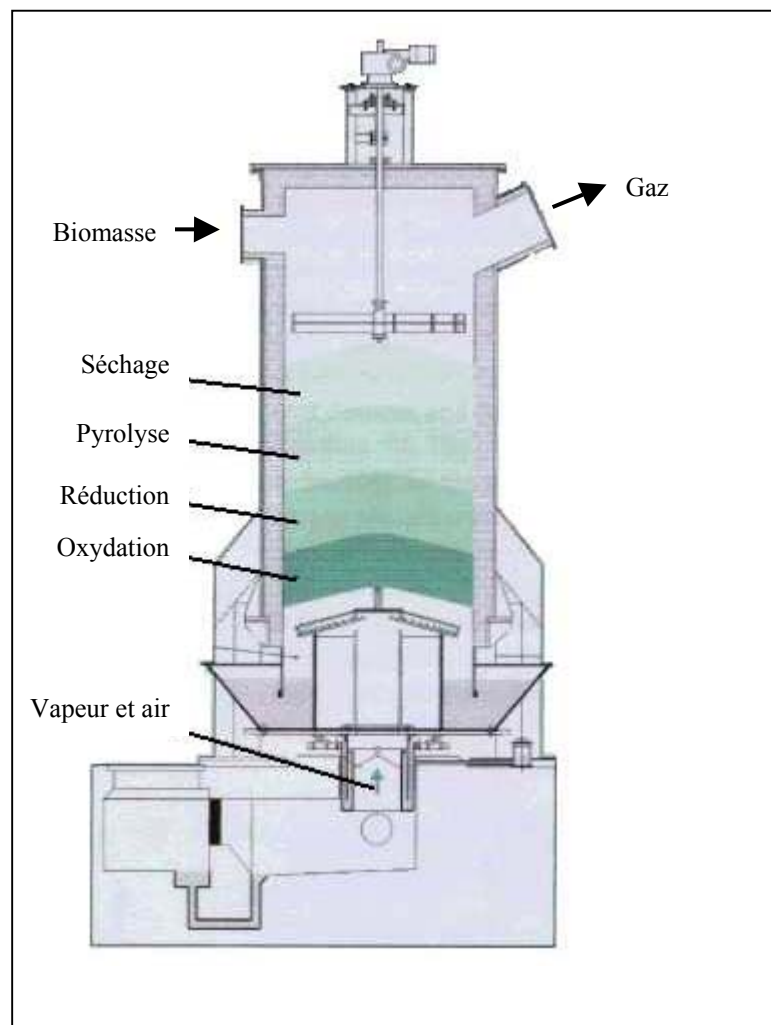
Taux d'humidité de 30-55 %

Taux de cendre de 5%

Des recherches sur la gazéification à partir de paille seraient en cours, appuyées sur l'expérience acquise par Vølund qui a beaucoup travaillé sur la production d'énergie par combustion de pailles. Des essais ont été menés sur un gazogène pilote de 1 MW (Kyndby). Un nouveau système d'alimentation a été breveté. La paille stockée sous forme de ballots est préalablement conditionnée avant d'être introduite dans le gazogène. Elle est d'abord hachée en morceaux de 5 cm et ensuite comprimée pour former des « bûches de pailles » de 50cm de long, 25cm de diamètre et avec une densité comprise entre 200 et 400 kg/m<sup>3</sup>.

### Procédé de gazéification

Le gazogène est de type lit fixe à contre-courant fonctionnant à pression atmosphérique. La matière première est introduite dans le gazogène par le dessus. L'arrivée d'air se situe dans la partie basse du réacteur et les gaz remontent vers le haut de celui-ci. Un agitateur, situé à 5 m du haut du réacteur, sert à homogénéiser la zone de pyrolyse du lit en biomasse sèche. L'agent oxydant utilisé pour la gazéification est un mélange d'air et de vapeur chauffé à 60°C. La base du réacteur est maintenue étanche par joint d'eau dans lequel tombent les cendres résiduelles.



Représentation schématique du réacteur de gazéification développé par Vølund

### **Systeme d'epuration des gaz**

Les gazogènes développés par Vølund étaient conçus pour alimenter en gaz des brûleurs de chaudières et la forte teneur en goudron des gaz ne posait pas de problèmes. Récemment, dans le cadre du projet Harboøre, Vølund a commencé à équiper une installation avec deux moteurs à gaz pour produire de l'électricité. De nombreuses études auraient été conduites concernant l'épuration des gaz et le craquage catalytique des goudrons. Les gaz seraient maintenant nettoyés à l'aide d'un système complexe d'épurateurs (scrubbers), d'échangeurs thermiques et de filtres électrostatiques avant d'être envoyés dans les moteurs.

### **Production chaleur et/ou électricité**

Vølund a installé sa première installation commerciale en 1994 à Harboøre au Danemark. Cette installation de 4 MW, a été utilisée pour alimenter thermiquement une chaufferie capable de couvrir 95% de la demande en chaleur de la ville de Harboøre. Cette installation a été améliorée et pourvue en mars 2000 d'un dispositif de purification de gaz et de deux moteurs à gaz pour la production de l'électricité pour fournir 1500 kWe en production de pointe, et 100 kWe en fonctionnement de routine et 3200kWt

### **Performance**

#### **Nombre d'heures de fonctionnement**

En 1989 Vølund a installé un gazogène pilote de 1 MW à Kyndby, qui aurait fonctionné 1200 h avant 1992 pour gazéifier, séparément, 100 tonnes de paille et 40 tonnes de bois. L'installation de Harboøre aurait fonctionné plus de 12 000 h en régime thermique avant avril 1997 et fonctionnerait actuellement en cogénération.

#### **Bilan énergétique et qualité des gaz**

Seules des données concernant le pilote Kyndby sont accessibles. Elle sont résumées dans le tableau ci-après pour une moyenne obtenue à partir de bois ou de paille, sans qu'une différence soit faite.

Matière première	Paille ou bois
Alimentation	500 kg/h
Puissance en entrée	1.25 MWth
Pression dans le réacteur	1 bar
Température dans le réacteur	1000°C
Agent oxydant	Air/Vapeur
Quantité de gaz obtenue	1.81-2.55 kg/kg de matière première
Quantité d'agent oxydant	0.98-1.86 kg/kg de matière première
Quantité de cendres	0.05 kg/kg de matière première
Taux de conversion	20-30%

Les données concernant les bilans énergétiques obtenus lors de la gazéification de paille sont présentées dans le tableau ci-après.

	Energie	Pourcentage
<b>En entrée</b>		
Paille	704 kW	99.8 %
Air	1.2 kW	0.2 %
Total	705.2 kW	100 %
<b>En sortie</b>		
Energie dans le gaz	213.0 kW	30.2 %
Energie dans les goudrons	267.0 kW	37.8 %
Chaleur sensible	20.0 kW	2.9 %
Carbone dans les cendres	109.0 kW	15.4 %
Perte de chaleur	58.0 kW	8.3 %
Total	667 kW	94.6 %
Efficacité des gaz bruts		71 %
Efficacité des gaz chauds		33.1 %
Efficacité des gaz froids		30.2 %

Les données sur la qualité des gaz en sortie de gazogène sont regroupées dans le tableau suivant :

CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	O	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O condensée	Taux de goudrons	PCI
11.6%	14.7%	4%	4.4%	1%	64.3%	170-240 g/Nm <sup>3</sup>	30-200 g/Nm <sup>3</sup>	2.6-5 MJ/Nm <sup>3</sup>

## Expertise technique

### Critique technique

Les goudrons produits pendant le procédé ne passent pas, comme dans un gazogène de type co-courant, au travers de la zones chaudes du foyer où a lieu la combustion et ne sont par conséquent pas craqués. Jusqu'à 40% de l'énergie provenant du bois peut être perdu dans ces goudrons. Leur élimination est actuellement le principal problème de Volund pour l'alimentation des moteurs. Volund a orienté ses recherches dans le domaine du craquage catalytique. Les résultats obtenus auraient démontré qu'il faut avoir un mélange de gaz de composition bien spécifique pour avoir une conversion maximale des goudrons. Les tests en laboratoire auraient permis d'obtenir des taux de conversion supérieurs à 90%. Le procédé de craquage développé en laboratoire permettrait cependant d'obtenir des taux de conversion sur les gaz produits par le gazogène inférieur à 70%. Par contre, ces gazogènes ont l'avantage d'être facile à utiliser et étant à contre courant ils fonctionnent avec des matières premières humides. En effet, la biomasse utilisée peut avoir de forte teneur en eau, puisque qu'elle est séchée dans le réacteur dans la partie supérieure du lit fixe.

### Coûts

L'installation pilote de Kyndby aurait coûté en 1989 entre 4 et 4.5 millions de francs. Aucune donnée n'est disponible concernant l'installation de Harboøre.



<b>GEB -UCL</b> <b>Groupe Energie Biomasse - Université Catholique de Louvain</b>	
<b>Type de procédé :</b> lit fixe co-courant	
<b>Localisation :</b> Louvain la Neuve, Belgique	<b>Etat actuel :</b> pilote
<b>Contact :</b> F. Bourgois 2 place du Levant, B 1348 - Louvain la Neuve Tel : 32-10-47-8398 Fax : 32.10.45.2692 e-mail : bourgois@term.uci.ac.be	<b>Capacité :</b> 500 kWth <b>Année :</b> 1998
<b>Financements :</b> – Gouvernement Wallon (Energie, Agriculture, Environnement) & Electrabel – Université catholique de Louvain	
<b>Source :</b> – Carbon Dioxide LCA in three SRC power production systems, I. Sintzoff, 10th European Conference; Biomass for Energy and Industry, proceedings of the International Conference Wurzburg, Germany, 8-11 June 1998, pp. 1211-14. – www.term.ucl.ac.be/geb – www.xylowatt.com – www.gasifiers.org	

Les procédés développés par GEB-UCL sont basés sur le concept de la cogénération par gazéification en procédé à lit fixe co-courant.

### Description de la technologie

#### Matière première/ type d'alimentation

GEB -UCL utilise diverses matières premières pour alimenter les gazogènes : taillis à courte rotation, écorce, charbon de bois, plaquettes de bois, sciure. Cependant, les plaquettes de taillis à courte rotation sont la source de biomasse la plus utilisée. Dans tous les cas la matière première doit être séchée et conditionnée pour respecter les critères suivants :

- humidité inférieure à 20 %
- taille de 2-10cm
- cendre inférieur à 10% du poids sec
- densité 250 Kg/m<sup>3</sup>

L'alimentation du gazogène est automatique et de type semi-continu : le gazogène est rempli par l'intermédiaire d'un sas d'une capacité de +/- 100 l à un intervalle de +/- 15 minutes.

#### Procédé de gazéification

Les gazogènes, conçus par le groupe GEB sont du type lit fixe co-courant, sans particularités spécifiques. Ils sont

équipés d'une alimentation continue par sas, d'un allumage automatique et d'un préchauffage de l'air de gazéification. Les cendres sont récupérées dans un container situé sous le foyer de gazéification.

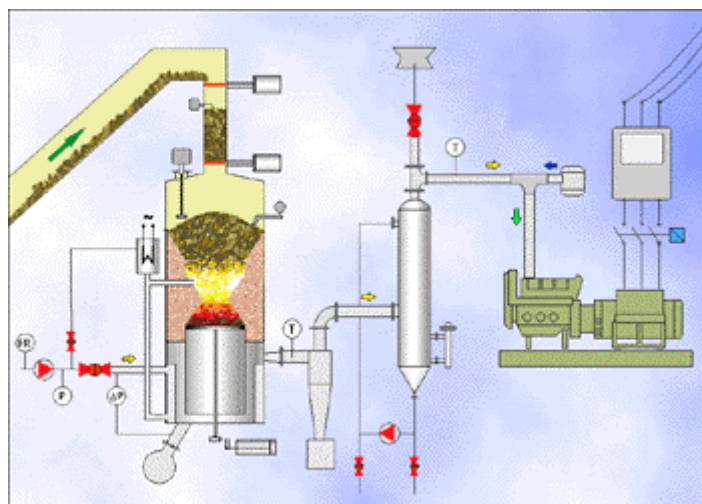
### **Système d'épuration des gaz**

Le gaz produit est épuré par cyclonnage à chaud pour les particules, suivi d'un lavage humide pour les goudrons et les particules résiduelles (cyclone - venturi scrubber - bubblejet scrubber - condenseur) et d'un filtre à cartouche de sécurité.

### **Production chaleur et/ou électricité**

Le gaz produit est valorisé dans un groupe de cogénération produisant de l'électricité et de la chaleur. L'électricité peut être consommée localement ou envoyée sur le réseau. La chaleur produite peut être utilisée dans un processus industriel, pour le chauffage de locaux ou la production d'eau chaude sanitaire. GEB-UCL a développé deux types d'installations de cogénération avec des gazogènes couplés à des moteurs à gaz ou dual diesel-gaz.

- La version Tcr-GAZEL d'une puissance de 150 kWe + chaleur.
- Une nouvelle version appelée REGAL d'une puissance de 300 kWe et 550 kWth est en préparation.



Représentation schématique de l'installation Tcr-GAZEL développée par GEB-UCL

### **Performance**

#### **Nombre d'heures de fonctionnement**

L'installation complète Tcr-GAZEL a tourné pendant seulement 400h. Cependant le nombre de cycles de démarrage/arrêt est supérieur à 200, or les démarrages sont généralement difficiles à gérer dans les installations et sont les périodes où la production de goudrons est importante. C'est souvent entre les périodes de fonctionnement que les goudrons se figent et bloquent l'utilisation de l'installation. Ce phénomène n'aurait pas encore été rencontré sur l'installation ce qui est positif.

### **Bilan matière – Energie**

Le rendement du gazogène Ttcr-GAZEL est de l'ordre de 75 % et le rendement du groupe moteur est de 37% soit un rendement électrique PCI maximum de 27%.

- Le rendement global attendu de la version REGAL est de 75 % (25 % électrique, 50% chaleur).

### **Qualité des gaz**

Les caractéristiques des gaz produits sont données dans le tableau suivant:

CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	PCI gaz sec	Goudron
25 %	2.5 %	10 %	14 %	50.5 %	5300 kJ/ Nm <sup>3</sup>	< 5 mg/Nm <sup>3</sup>

### **Analyse critique**

L'équipement est entièrement automatisée (démarrage, alimentation en bois, gestion de la puissance, sécurité, ...) exceptée la vidange des cendres et goudrons ce qui le rend très attractif dans un contexte européen mais qui complexifie significativement l'installation. L'UCL dispose d'une unité expérimentale « Centrale GAZEL » installée dans une ferme à 30 km de Bruxelles qui est testée en condition réelle d'utilisation. Le travail réalisé est sérieux et devrait permettre d'apporter quelques améliorations sensibles en vue de l'industrialisation des procédés basés sur le co-courant.

### **Coûts**

Le coût actuel d'une installation de cogénération de 300 kWe est estimé à 3000 EUR/kWe.

### **Informations complémentaires**

GEB-UCL fait actuellement des recherches pour utiliser des déchets de bois (bois de démolition, bois verni,...) comme matière première. La politique suivie chez GEB-UCL est la cogénération par gazéification à petite échelle, pour pouvoir développer des installations de petites tailles délivrant de l'électricité et de la chaleur pour des unités locales. Dans le but de commercialiser ces installations, le laboratoire GEB-UCL a créé la société commerciale : Xylowatt qui n'a rien à voir avec la société suisse du même nom.

<b>AEW (Associated Engineering Works)</b>	
<b>Type de procédé :</b> lit fixe à co-courant	
<b>Localisation :</b> Pradesh, Inde	<b>Etat actuel :</b> Commercial
<b>Contact :</b> G.M Satyanarayana Gamini Compround, Box 17 Tanuku 534 211, Andhra Pradesh <b>Tel :</b> 91.8819.22950 <b>Fax :</b> 91.8819.24801 <b>E.Mail :</b> aewgamini@rediffmail.com	<b>Capacité :</b> 5 à 500 KW th <b>Année :</b> 1990
<b>Financements :</b> entreprise privée	
<b>Source :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- A survey of biomass gasification 2001, T. B. Reed and S. Gaur, 2<sup>nd</sup> edition</li> <li>- Contacte par E-mail avec Mr G.M Satyanarayana</li> <li>- Plaquettes commerciales de AEW</li> <li>- <a href="http://aew.aewgasifiers.com/">http://aew.aewgasifiers.com/</a></li> </ul>	

Plusieurs constructeurs indiens sont apparus sur le marché sur les quelques dernières années. La technologie proposé est toujours la même, dérivée d'un design de réacteurs à charbon de bois. Les matériels proposés ont su soigner leur image en proposant des solutions avec plate-forme multi-fonctionnelle adaptées au besoin du milieu rural comme l'illustre le photo ci-après. Ce sont des systèmes compacts, qui offrent sur le même battit un ensemble électrogène avec petite moto pompe, moulin, brûleurs, pilon, ... un ensemble au demeurant fort attractif, mais pas forcément transférable, compte tenu de la spécificité de la demande rurale. Par contre ces solutions sont très compétitives en terme de prix. Le nombre de références toujours difficile à vérifier.

### Description de la technologie

#### Matière première

Les gazogènes sont conçus pour fonctionner avec des plaquettes de bois (taux d'humidité < 20%) et sont vendus pour être adaptables à d'autre type de biomasse comme la balle de riz et la coque de noix de coco.

#### Type d'alimentation

L'alimentation se fait par le dessus. Les gazogènes à bois sont équipés d'une trappe permettant de fermer le réacteur pendant la gazéification alors que les gazogènes à balle de riz sont à ciel ouvert du type chinois et alimentés en continu par un silo ou par une vis sans fin.

#### Procédé de gazéification

Les gazogènes sont à lit fixe à co-courant et ne présentent aucune particularité. Ceux fonctionnant au bois sont équipés d'un foyer conique alors que ceux fonctionnant à la balle de riz ont un large foyer cylindrique et droit.

### **Systeme d'épuration des gaz**

Les gaz sont d'abord refroidis puis lavés dans des douches à eau. Les goudrons restants sont ensuite évacués par centrifugation des gaz.

### **Production chaleur et/ou électricité**

Les différentes puissances des gazogènes de AEW varient de 20 à 250 kWth pour le bois et 200 à 500 kWth pour la balle de riz. Les deux type de gazéificateurs sont proposés pour les deux utilisations : thermique et électrique. Les différentes installations de productions d'électricité vendues par AEW fonctionnent avec des moteurs dual fonctionnant à 70 % avec les gaz de gazéification et a 30 % avec du diesel. AEW a développé le concept d'une petite unité de gazéification mixte capable de fournir de l'électricité (5 kW), de faire fonctionner une pompe (18 l/s), une décortiqueuse de riz (400 kg/h) et un moulin (200 kg/h). Cette unité qui fonctionne en mode dual diesel/gaz permet d'alimenter en énergie et en machine des zones isolées sans connections avec un réseau électrique. Elle est en cours de test au Cameroun en collaboration CIRAD et ERA, uen ONG camerounaise.



Unité de gazéification mixte avec alternateur, pompe d'irrigation, décortiqueuses et moulin.

### **Performance**

Les différentes informations qu'il est possible d'obtenir de la part de AEW ne donnent pas de renseignements sur les nombres d'heures de fonctionnement des projets pilotes, ni sur la qualité des gaz obtenus, et ni sur les quantités de cendres et de goudrons produits.

### **Analyse critique**

Les limites de la technologie sont les mêmes que pour les unités DASAG vis à vis de l'humidité du combustible.

### **Coûts**

Le prix des différentes installations proposées par AEW varient de 200 à 500 Euro/kWe et environs 100 Euro/kWth départ. AEW fourni une très longue liste de clients en Inde.

<b>MARTEZO - TOUILLET</b>	
<b>Type de procédé :</b> lit fixe à co-courant	
<b>Localisation :</b> Poitiers, France	<b>Etat actuel :</b> Recherche
<b>Contact :</b> Melle Touillet 237, route de Paris B.P. 419 86010 POITIERS Cedex FRANCE <b>Tel :</b> (33) 05 49 37 02 03 <b>Fax :</b> (33) 05 49 37 39 79	<b>Capacité :</b> 250 kW <sub>e</sub> <b>Année :</b> 70s
<b>Financements :</b> Ets Touillet	
<b>Source :</b> – M Boillot, Gazogènes Martezo- Touillet : compte rendu d'essais, EDF DER P52 D84/84/46 Août 1984 – <a href="http://www.martezo.fr">www.martezo.fr</a>	

Les Etablissement Touillet, concessionnaire Mercedes à Poitiers, développent depuis une quarantaine d'années un gazéifieur, sous la dénomination de Martezo. Il s'agit d'un gazogène en lit fixe à co-courant avec rétreint au niveau de la zone de gazéification. Plusieurs models sont proposés de 70 à 450 kW mais les essais menés sur ce dernier type n'ont jamais été validés.

### Description de la technologie

#### Matière première/ type d'alimentation

Diverses matières premières pour alimenter les gazéifieurs ont été testées. Cependant, les plaquettes de bois constituent l'approvisionnement recommandé et le plus utilisé. Dans tous les cas la matière première doit être séchée et conditionnée pour respecter les critères suivants :

- humidité inférieure à 20 %
- taille de 4-10cm
- cendre inférieure à 10% du poids sec

L'alimentation du gazogène est manuelle mais elle peut être automatique et de type semi-continu. Le combustible est chargé par le sas situé au sommet de l'appareil et s'écoule par gravité jusqu'au foyer.

#### Procédé de gazéification

Les gazéifieurs conçus par les Etablissement Touillet sont du type lit fixe à co-courant, sans particularités spécifiques. Le foyer est construit en matière réfractaire et présente un rétrécissement au niveau duquel l'air est introduit par aspiration. Une tuyère munie de buses distribue l'air de gazéification autour du foyer. Les gaz sortants du foyer passent dans une double enveloppe et les cendres sont récupérées dans le cendrier situé sous la grille du foyer de gazéification.

### **Systeme d'epuration des gaz**

Le circuit de traitement des gaz est compose de 4 elements :

- un condenseur destine a retenir la plus grande partie de la vapeur d'eau,
- un lavage humide par barbotage pour eliminer les goudrons et les particules,
- un filtre liège pour completer l'elimination des goudrons,
- un filtre a cartouche de securite constitue de 4 rouleaux de papier.

### **Production chaleur et/ou electricite**

Le gaz produit est valorise dans un groupe moteur soit en dual-fuel soit en allumage commande. Les moteurs equipants les ensembles Martezo sont de marque Mercedes ou Caterpillar. Sur certaines installations la chaleur produite par le groupe (echappement et refroidissement) est recuperee pour etre utilisee dans un processus industriel, pour le chauffage de locaux ou la production d'eau chaude sanitaire.



Présentation schématique de l'installation Martezo

### **Performance**

#### **Nombre d'heures de fonctionnement**

Les Etablissements Martezo ont vendu plusieurs unités de gazéification dans de nombreux pays et de nombreux contextes. La fiche projet jointe fera état de l'unité Raud qui totalise plus de 20000 heures de fonctionnement, il est vrai dans des conditions bien spécifiques.

#### **Bilan matière – Energie**

Le rendement du gazogène est de l'ordre de 70 % et le rendement du groupe moteur est de 30 % soit un rendement électrique PCI maximum de 21%. Ces chiffres varient en fonction de la matière première et des conditions de fonctionnement. Le tableau ci-après présente les résultats obtenus lors de tests réalisés par EDF sur des unités Martezo.

<b>Gazéifieur</b>	<b>Martezo 1200</b>	<b>Martezo 100</b>
Moteur	Mercedes 118kW	Mercedes 118 kW
Combustible	Epicéa	Bois densifier
Débit combustible (kg/h)	65	75
Humidité combustible (%)	7.6	13.3
PCI combustible (MJ/kg)	17.17	15.33
Débit gaz moteur Nm <sup>3</sup> /h	190	174
PCI gaz sec (MJ/ Nm <sup>3</sup> )	4.69	4.99
Durée du test (h)	3	2
Air gazéification/air stœchiométrique	0.4	0.35
Puissance moteur (kWe)	67.4	58.3
Rendement gazéification (gaz sec/ bois humide ) (%)	74.1	66.4
Rendement moteur (%)	29.3	27.4
Rendement total (bois humide) (%)	21.7	18.2
Consommation spécifique	0.96	1.29

### Qualité des gaz

Les caractéristiques des gaz produits lors de ces tests sont données dans le tableau suivant:

% gaz sec	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Martezo 1200	17.2	0.9	12.2	17.5	46.9
Martezo 100	17.3	2.5	13.4	13.4	45.2

### Analyse critique

Lorsque le combustible est convenablement conditionné (humidité de l'ordre de 15 % et calibré en grosses plaquettes forestières) l'ensemble Martezo donne de bons résultats comme le prouve les quelques installations qui ont fonctionné plusieurs années (Scierie Raud, Ets Briollet, Scierie Gautier). Cependant le gazéifieur supporte mal les variations d'humidité et le taux de goudrons dans les gaz devient vite un problème dans ce cas. Il convient alors d'augmenter le système de traitement des gaz. C'est la solution qui avait été retenue par Mr Gautier en RCI. Les modifications apportées aux moteurs sont satisfaisantes.

### Coûts

Le coût des installations constitue indiscutablement le point faible des unités Martezo. La démarche commerciale adoptée et la très grande confidentialité qui ont conduit les établissements à travailler en interne ont, à notre sens, limité le développement et l'expansion de l'activité des Ets Touillet.

### Informations complémentaires

Une fiche projet est jointe à la présente.



<b>IISc/DASAG/Xylowatt (Indian Institute of Science -Dasad Energy Engineering ltd)</b>	
<b>Type de procédé :</b> lit fixe à tirage inversé	
<b>Localisation :</b> Seuzach, Suisse	<b>Etat actuel :</b> Commercial
<b>Contact :</b> H.Sharan et Birchstrasse 6, 8472 - Seuzach H. Mukunda, <b>Tél :</b> 41.52.335.3500 <b>Fax :</b> 41.52.335.1442	<b>Capacité :</b> 330 kWth en entré <b>Année :</b> 1996
<b>Financements :</b> – DASAG – L'entreprise Xylowatt et l'état Suisse – Le ministère de l'énergie en Suisse. – Les ministères des Sciences et des nouvelles sources d'énergie (Ministry of New Energy Sources, MNES,) en Inde.	
<b>Source :</b> - Results of an Indo-Swiss programme for qualification, testing, of an 300 kW IISc-Dasag gasifier, H. Mukunda, P. Paul, S. Dasappa, U. Shrinivasa, H. Sharan, R. Beuhler, P. Hasler, H. Kaufmann, <a href="http://144.16.73.100/~mukunda/es_new.html">http://144.16.73.100/~mukunda/es_new.html</a> - Fixed bed gasification for electricity generation in Switzerland, R. Bühler, <a href="http://aero.iisc.ernet.in/~mukunda/8issue/fixedb.html">http://aero.iisc.ernet.in/~mukunda/8issue/fixedb.html</a> - <a href="http://www.desipower.com/new_page_24.htm">http://www.desipower.com/new_page_24.htm</a> - <a href="http://www.xylowatt.ch">http://www.xylowatt.ch</a>	

Les gazogènes développés par IISc-DASAG sont tous du type lit fixe à co-courant. IISc-DASAG est un travail de coopération dans le domaine de la gazéification entre deux Instituts de recherches Suisse et Indien : le CCC (Competence Center de Châtel St Denis) et le IISc (Indian Institut of Science de Bangalore). Dasag est une entreprise privée Suisse qui bénéficie des techniques développées par le CCC. De cette coopération Indo-suisse découle tout un travail de R & D dans le domaine de la production d'énergie à partir de gazéification de biomasse qui a débouché sur la création de deux sociétés privé : Xylowatt en Suisse et Desi en Inde.

### Description de la technologie

#### Matière première, type d'alimentation

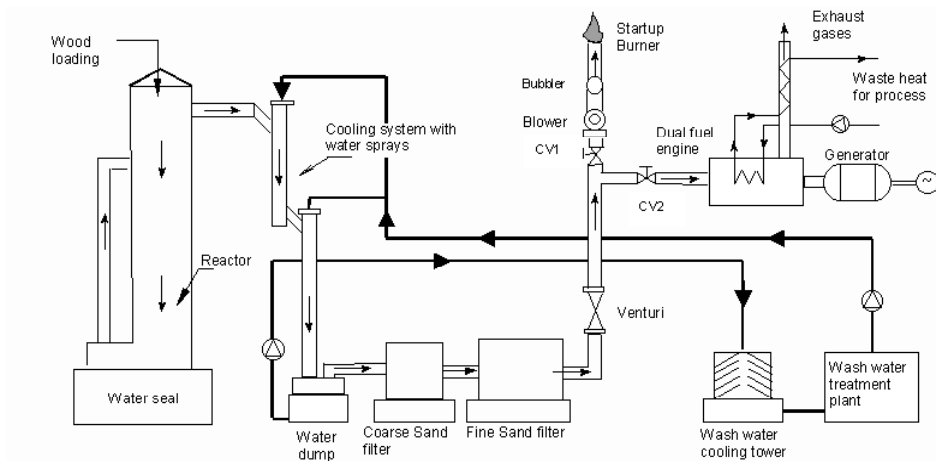
La matière première utilisée est exclusivement du bois sous forme de plaquettes de 2-5 cm, avec un taux d'humidité inférieur à 20%, un taux de cendre proche de 2% et une densité supérieur à 250 kg/m<sup>3</sup>. Les gazogènes sont alimentés par le haut au moyen d'une vis d'archimède.

#### Procédé de gazéification

Les gazogènes sont de type lit fixe à co-courant et ne présentent pas de particularité si ce n'est le mode de

décendrage qui est une adaptation de système de gazéification de charbon de bois. En effet, les cendres produites sont évacuées par le bas du réacteur dans un container contenant de l'eau. L'agent oxydant est l'oxygène de l'air. L'alimentation en air puis la circulation du gaz généré est assurée par un ventilateur extracteur ou par le moteur.

Lors du démarrage de l'installation, le gaz est brûlé dans une torchère durant une quinzaine de minutes avant d'être utilisé comme combustible dans le moteur à gaz. Le schéma de principe de l'installation est donné ci-après.



Représentation schématique de l'installation IISc-DASAG

### Système d'épuration des gaz

Les gaz d'une température de 550°C, à la sortie du réacteur, sont refroidis dans un échangeur de chaleur. Ils subissent ensuite divers traitements pour les purifier : lavage à l'eau, filtration sur sable, séchage et filtration sur papier.

### Production chaleur et/ou électricité

Les gazogènes sont utilisés pour produire de l'électricité, avec des moteurs dual en Inde et des moteurs fonctionnant seulement au gaz en Suisse.

### Performances

#### Nombre d'heures de fonctionnement

Deux projets pilotes ont démarré en parallèle en 1996, un au centre de l'Inde à Orchha et l'autre en Suisse à Châtel St Denis. L'installation Suisse aurait fonctionné 700 heures et celle en Inde 9000 Heures.

#### Bilan matière – Energie

Il est très difficile d'obtenir des indications très précises sur IISc-DASAG. En effet les sources de renseignement sont nombreuses entre les différents instituts et sociétés basées en Suisse et en Inde et les informations techniques ne sont pas toujours très cohérentes.

Les informations recueillies présentent les résultats suivants : avec des gazogènes d'une puissance de 330 kWthPCI en entrée, les installations fonctionneraient avec un rendement thermique de 75% et un rendement électrique supérieur à 25 %. En effet l'installation en Suisse fournirait 60 kWe alors que celle en Inde fournirait avec le même gazéifieur entre 60 et 100 kWe.

### Qualité des gaz

Les données sur la qualité des gaz en sortie de gazogène sont regroupées dans le tableau suivant :

CO %	CO <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	H <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> O %	N <sub>2</sub> %	goudrons mg/Nm <sup>3</sup>	poussières mg/Nm <sup>3</sup>	PCI MJ/Nm <sup>3</sup>
18	15	2	18	15	34	300	50	4-5

### Analyse critique

Les données techniques sur les installations de gazéification sont toujours très succinctes et bien souvent négligées au profit d'informations concernant de nombreux projets de développement pour la production d'énergie en Inde toujours difficile à vérifier.

Les installations sont, d'une manière générale, plutôt bien conçues et compactes. La principale critique technique du procédé concerne le système de décendrage qui apparaît comme particulièrement inadapté à la biomasse. En effet, le bas du réacteur est immergé dans l'eau afin de permettre l'évacuation des cendres et l'étanchéité. Ce principe provoque l'évaporation d'une partie de l'eau, qui dans les phases transitoires va se condenser sur différentes parties froides, y compris sur la biomasse et pendant la gazéification faire chuter la température et accroître le taux de goudrons. Ce principe intéressant dans le cas de la gazéification du charbon de bois est particulièrement néfaste avec la biomasse, surtout si cette dernière est légèrement plus humide que le minimum requis.

### Coûts

Les valeurs annoncées en terme de coût d'investissement sont de l'ordre de 2500 US\$ kWe

### Informations complémentaires

L'installation est complétée d'une mini-station de traitement d'eau permettant à l'eau de lavage de tourner en circuit fermé. Elle est décantée, purifiée, puis refroidie avant d'être réutilisée. Le surplus d'eau provenant de la condensation de l'eau contenue dans le gaz (humidité du bois) est évacué dans le réseau d'eaux usées. Le moteur utilisé en Suisse est équipé d'un catalyseur ; les émissions moteur sont en dessous des valeurs fixées par les normes de l'OPAIRE.

<b>THOMAS KOCH ENERGI</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lit fixe à co-courant et pression atmosphérique	
<b>Localisation :</b> Gadstrup au Danemark	<b>Etat actuel :</b> pilote
<b>Contact :</b> thomas Koch - Stationsvej 4 DK-4621 Gadstrup - Denmark <b>Tél :</b> 45.46.19.15.54 <b>Fax :</b> 45.46.19.15.38 <b>Email :</b> tk@tke.dk	<b>Capacité :</b> 250 kWth <b>Année :</b> 2000
<b>Financements :</b> Union européenne 5ème PCRD	
<b>Source :</b> Cirad-Forêt (P.Girard )	

### L'objectif

Le projet Drygas a pour objectif d'étudier la faisabilité d'un nouveau système d'épuration des gaz de gazéification pour de petites installations de cogénération inférieure à 1 MWe. Ce projet débuta en avril 2000 pour une période de 22 mois, et réunit un organisme technique danois dK-Teknik, une PME danoise TKE et un centre de R&D français le CIRAD. Ce projet est soutenu financièrement par l'union européenne dans le cadre du 5ième PCRD.

L'unité pilote d'une capacité de 500 kWth PCI comprend :

- un réacteur de gazéification déjà existant de type lit étagé à co-courant avec l'air comme agent gazéifiant,
- deux unités de traitement de particules solides à haute température : un multicyclone et un filtre céramique,
- une unité originale de traitement des goudrons à sec au moyen d'un échangeur 3 fluides,
- un moteur thermique classique de marque Nissan délivrant 75 kWe,

Ainsi, un pilote complet de production d'électricité et de chaleur à partir de la gazéification de bois a été développé pour de faibles puissances. Il est actuellement installé au sein de la société TKE et est en cours de test.

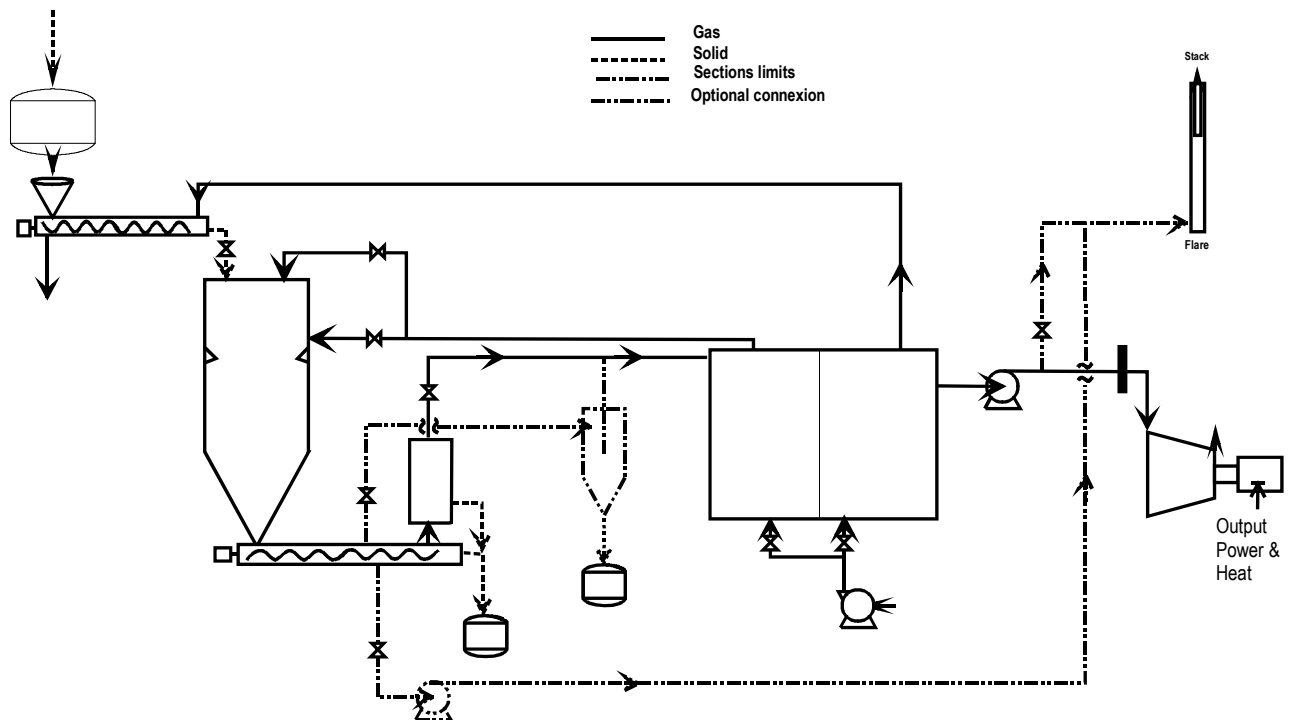
### Matière première

La matière première utilisée est constituée de plaquettes forestières. Les copeaux de dimension approximative 20x20x20 mm proviennent à la fois de feuillus et de résineux. Ils sont dans un premier temps séchés pour être ramenés à une teneur d'humidité de 20%. Déchargés dans une trémie, les copeaux sont introduits dans le réacteur par une vis d'alimentation réglée à 50 kg/h environ.

### Le réacteur de gazéification

Le réacteur est de type lit étagé à co-courant et fonctionne avec air comme agent gazéifiant. La pression de travail est la pression atmosphérique. Sa conception et sa construction a été complètement assurée par TKE et la température de gazéification est comprise entre 800 et 1100 °C. Le réacteur est constitué de deux zones, une première zone de pyrolyse située en partie supérieure et une zone de gazéification du charbon dans la partie basse. Le charbon formé s'écoule par gravité dans cette deuxième zone. Les gaz de pyrolyse sont brûlés entre ces deux zones avant d'être injectés sur le charbon pour la gazéification. L'apport d'air est ainsi étagé entre les différentes zones de réaction. Les cendres sont récupérées en partie basse du réacteur et dirigées vers un bac de

récupération à l'aide d'une vis d'extraction. Les gaz, également évacués en partie basse sont dirigés vers une unité de filtration à chaud. Le schéma de principe de l'installation est donné ci-après.



### Le traitement du gaz

Deux unités de filtration à chaud ont été développées et seront utilisées individuellement : un multicyclone et un filtre céramique. Le principal intérêt du filtre multicyclone par rapport à un cyclone classique est de diminuer la perte de charge occasionnée tout en maintenant son efficacité constante. Le filtre céramique haute température présente quant à lui l'intérêt d'assurer un traitement efficace pour la suppression des particules. Son principal inconvénient est la perte de charge très élevée qu'il occasionne. Cette technologie étant, de plus, en cours de développement et de nombreuses améliorations sont encore à espérer. Ces deux unités de traitement des poussières ont été montées en parallèle afin de tester leur efficacité comparée.

Un autre aspect innovant du projet concerne le traitement des goudrons. Le principe du procédé consiste à utiliser un échangeur thermique tubulaire divisé en deux parties égales. Le premier module refroidit les gaz issus du réacteur de 700°C à environ 450°C tout en préchauffant l'air de gazéification. Dans le second module, le gaz est refroidi jusqu'à environ 150°C afin d'assurer la condensation des goudrons. Pour cela un second fluide froid est employé (air ou eau). La principale innovation du procédé de traitement des goudrons réside dans le fait que l'échangeur pourrait fonctionner de façon continu en condensant les goudrons et en s'autonettoyant par combustion interne grâce à un design particulier de l'échangeur. L'atout majeur étant alors une épuration à sec sans rejet d'effluents liquides. Les gaz chargés après craquage sont envoyés vers le gazéifieur.

### Le moteur thermique

Le moteur thermique utilisé est un classique moteur Nissan V6-24 soupapes de 3 l de cylindrée dont le carburateur a été modifié pour tenir compte du faible pouvoir calorifique du gaz. Ce moteur est couplé à un alternateur asynchrone délivrant jusqu'à 75 kWe.

### **Expertise technique**

Le principal intérêt de ce projet est de tester un nouveau procédé de nettoyage des gaz permettant à de faibles coûts et une robustesse élevée de produire chaleur et électricité à partir de la gazéification de bois. Les résultats issus de ce projet permettront d'envisager la technologie de CHP pour de faible puissance à partir de la gazéification de bois. 600 heures de fonctionnement en continu ont été opérées avec un suivi constant des paramètres de fonctionnement de l'installation afin de préciser les performances de l'installation et tout particulièrement du traitement des gaz.

<b>INSTITUTE OF GAS TECHNOLOGY (IGT)</b>	
<b>Type de procédé :</b> gazéification en lit fluidisé sous pression à l'oxygène	
<b>Localisation :</b> Chicago (USA)	<b>Etat actuel :</b> l'ensemble des activités seraient arrêtées
<b>Contact :</b> Dr Suresh Babu - 1700 So. Mount Prospect Road Des Plaines, IL 60018-1807 <b>Tél :</b> 847-768-0509 <b>Fax :</b> 847-768-0516 <b>E.mail :</b> babu@gastechnology.org	<b>Capacité :</b> 11t/j <b>Année :</b> 1979
<b>Financements :</b>	
<b>Source :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bridgwater, A.V. and Evans, G. D., « An Assessment of Thermochemical Conversion Systems for Processing Biomass and Refuse », Report, Energy Technology Support(ETSU),ETSU B/T1/00207/REP, 1993</li> <li>- <a href="http://www.clu-in.org/PRODUCTS/SITE/complete/igtbed.htm">http://www.clu-in.org/PRODUCTS/SITE/complete/igtbed.htm</a></li> <li>- A survey of biomass gasification 2001, T. B. Reed and S. Gaur, 2<sup>nd</sup> edition,</li> </ul>	

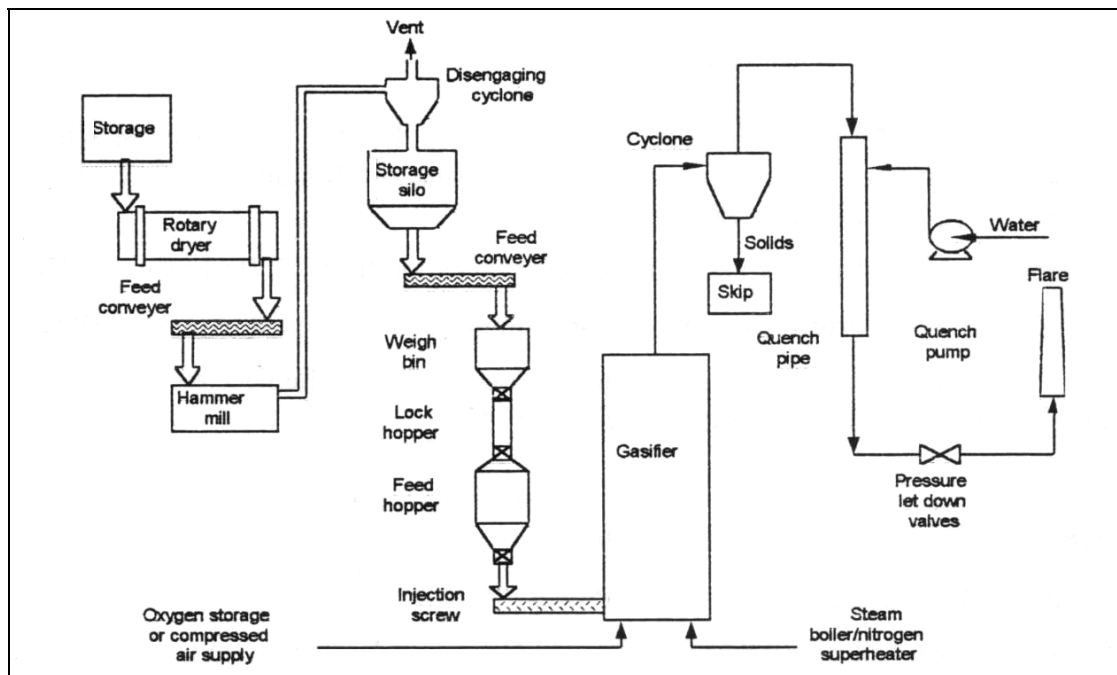
Le procédé de gazéification mis au point par l'IGT, appelé RENUGAS, a été développé en 1979. Il s'agit d'un procédé de gazéification en lit fluidisé sous pression sur la base de leur procédé de gazéification du charbon. Ce procédé a été mis en œuvre par Westinghouse dans le cadre du projet Hawaii abandonné en 1999 et en cours de démantèlement.

#### **Matière première et alimentation**

La matière première principalement utilisée est du bois qui est d'abord réduit en taille à l'aide d'un broyeur à marteaux (entre 1 et 38 mm), elle est séchée dans un séchoir rotatif pour être ensuite triée et stockée dans un silo contenant la biomasse nécessaire pour 24 H. Le taux d'humidité du bois est compris entre 5 et 15%, est la teneur en cendres entre 0.5 et 5%. Des tests avec de la paille, de la bagasse et d'autres produits ont été menés. Un système vibrant est utilisé pour prévenir les problèmes de voutage dans les silos. Depuis les silos, la biomasse est transportée à l'aide d'un tapis d'alimentation dans un compartiment de chargement situé au-dessus d'un sas pendulaire. Sous l'effet du poids le clapet du sas s'ouvre pour alimenter en biomasse un compartiment pressurisé avec de l'azote afin d'obtenir les mêmes conditions de pressions que dans le réacteur de gazéification (dans la version commerciale il est prévu de pressuriser ce compartiment avec les gaz de combustion). Dès que le compartiment est pressurisé une vanne guillotine s'ouvre et la biomasse tombe dans un silo tampon qui alimente la chambre de gazéification à l'aide de trois visseuses doseuses. Ce système d'alimentation de biomasse permet de régler les problèmes d'engorgements en faisant tourner les vis sans fin en sens inverse. Dans la version commerciale, il est prévu de calorifuger les vis d'alimentation pour éviter que des phénomènes de pyrolyses s'y produisent.

## Procédé de gazéification

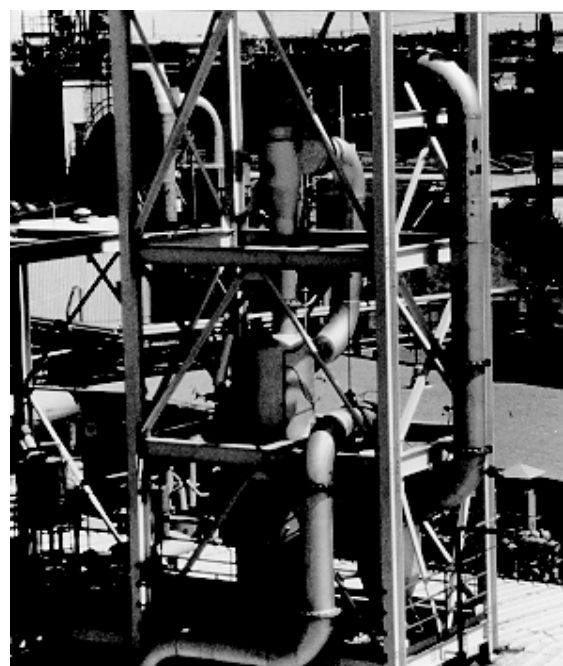
Le réacteur de gazéification est prévu pour opérer de manière adiabatique dans des conditions de températures et de pressions allant jusqu'à 982°C et 33 bars avec une capacité maximale de 455 kg/h de biomasse. L'agent oxydant est un mélange d'oxygène et de vapeur d'eau (0.27 kg de O<sub>2</sub> et de 0.64 kg de vapeur par kg de matière première anhydre). Le réacteur de gazéification a un diamètre de 30 cm et une hauteur de 6.7 m. Le diamètre du réacteur augmente au niveau de la région libre au-dessus du lit (le franc-bord) afin de diminuer la vitesse locale des gaz pour augmenter le temps de séjour et donc le craquage des goudrons. La température dans le réacteur de gazéification est contrôlée par les taux de vapeur d'eau et d'oxygène.



Représentation schématique du procédé de gazéification RUNGAS développé par IGT

Le lit est constitué d'un oxyde d'aluminium dont la forte densité empêche qu'une partie du lit soit entraînée avec le flux de gaz. De plus, ce matériau réduit la taille des particules de biomasse par attrition et assure un bon transfert thermique. En sortie de réacteur, le gaz produit passe dans un cyclone pressurisé pour en extraire les solides. Les particules collectées sont stockées dans une benne fixe. Les gaz sont ensuite brûlés en torchère.

Vue de l'installation de gazéification





## Performance

### Bilan matière

Procédé	Gazéification
Biomasse	Bois
Alimentation – maximale	455 kg/h
– minimale	136 kg/h
Produit principal :	Gaz combustible moyen PCI
Rendement :	2.47 kg/kg de bois
Utilisation :	Combustible
Pression dans le réacteur de gazéification	Jusqu'à 33 bars
Température dans le réacteur de gazéification	816°C
Consommation d'oxygène	0.27 kg/kg bois sec
Consommation de vapeur	0.64 kg/kg bois sec

### Rendement énergétique

Le rendement PCI global serait de 75%. Cependant la qualité des gaz est assez aléatoire et les gaz contiendraient 30g de goudrons/ kg de biomasse sèche ce qui représenterait une émission de 13.7 kg/h de goudrons avec un PCI de 46 MJ/kg en fonctionnement en nominal.

### Qualité des gaz

La composition et la qualité moyennes des gaz obtenus sont données dans le tableau suivant :

Composition des gaz	% volume
H <sub>2</sub>	25.3
CO	16.0
CO <sub>2</sub>	39.4
CH <sub>4</sub>	117.8
C <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1.5
T° des gaz en sortie	816°C
Débit de gaz	335 Nm <sup>3</sup> /h
Potentiel énergétique	12.97 MJ/Nm <sup>3</sup>
Taux de particules	0.03 kg/kg matière première anhydre
Taux goudrons	0.02-0.03 kg/kg matière première anhydre

### Analyse critique

Les problèmes rencontrés ont été nombreux allant de la durée de vie des joints d'étanchéité au niveau du sas pendulaire qui diminue la pression dans le système et donc la réactivité de la biomasse au problème de

l'élimination des goudrons. Ils ont conduit à l'arrêt prématuré du pilote de Hawaii.

## **ANNEXE 3**

### **Projets de gazéification**

#### **Fiches techniques**

<b>Projet BURLINGTON - USA</b>	
<b>Type de procédé :</b> Réacteurs de gazéification et de combustion à lits fluidisés basés sur le procédé Batelle/FERCO	
<b>Localisation :</b> Burlington (Vermont, USA)	<b>Etat actuel :</b> début des essais à l'échelle industrielle 1998.
<b>Contact :</b> John Irving - McNeil Station, Burlington V <b>Tel :</b> 802 865 7482 <b>Fax :</b> 802 885 7481 <b>E.Mail :</b> Jirving@aol.com Mark A. Paisley - Corp, 3500 Parkway, Lane, Ste 440 - Norcross, GA  <b>Tel :</b> 614 424 495 8 <b>Fax :</b> 614 424 3321	<b>Capacité :</b> 40 MWth <b>Année :</b> 1998
<b>Financements :</b> US Departement of Energy	
<b>Source :</b> - Biomass, A Growth Opportunity In Green Energy And Value-Added Products, Proceedings of the 4 <sup>th</sup> Biomass Conference of the Americas, R. P. Overend and E. Chornet, Pergamon, Volume 2, p 1061-1064. - A survey of biomass gasification 2001, T. B. Reed and S. Gaur, 2 <sup>nd</sup> edition	

### Description de la technologie

La technologie de gazéification FERCO qui a été mise en place à la centrale de Burlington est issue des recherches de Batelle (voir fiche procédé). A la suite des premiers travaux entrepris qui ont démontré la faisabilité sur le pilote, une unité industrielle de 7t/h de biomasse anhydre a été construite et réceptionnée en 1997 sur le site de la centrale thermique McNeil du Burlington Electric Department dans le Vermont et qui disposait déjà d'une unité biomasse classique de 50 MW.

La première étape du projet consistait à alimenter en gaz les chaudières existantes sur le site puis dans un deuxième temps d'installer un système de traitement et de compression des gaz pour alimenter une turbine à gaz. L'unité de gazéification est un ensemble de 34 m de haut sur une emprise au sol de 10.5 x 14.5 m auquel s'ajoute un bâtiment pour le laveur d'une surface d'environ 100 m<sup>3</sup> (Photo ci après). Un séchoir équipe l'unité, il fonctionne en récupération de chaleur sur l'unité.

La période de test de l'unité a commencé début 1998 alors que le fonctionnement nominal n'a été atteint qu'en août 1999. Si quelques difficultés de fonctionnement peuvent être imputées à des aspects organisationnels typiques de la centrale, des problèmes ont été rencontrés à plusieurs niveaux et ce, de façon assez classique pour des installations biomasse :

- manutention de la biomasse dont on sous-estime toujours la complexité,

- faible efficacité de la séparation gaz/solides dans les cyclones avec des conséquences sur la re-circulation du sable entre les réacteurs,
- lavage des gaz défectueux, qui pour l'essentiel résultait d'une charge en solide trop importante du fait du mauvais fonctionnement des cyclones et qui aurait posé des problèmes de recyclage des goudrons, normalement directement ré-injectés dans le réacteur combustion .



Unité de Gazéification de Burlington (photo NREL)

Cette phase de lavage est assez surprenante pour une utilisation en combustion gaz. Elle est à l'origine des plus grosses difficultés de l'installation. La quantité de goudrons générée est en effet assez importante, ce qui n'est pas surprenant avec ce type de technologie qui va à l'opposé des schémas classiques. Avec ce procédé, le solide résiduel de la gazéification, un charbon, à priori exempt de matière volatile compte tenu des températures de réaction, est brûlé pour produire la chaleur nécessaire à la pyrolyse de biomasse à haute température 800°C sous vapeur d'eau. Les gaz générés sont nécessairement riches en composés organiques condensables notamment parce que la taille des particules (non précisée) reste élevée, il s'agirait de plaquettes forestières. Batelle développe et teste maintenant un catalyseur, DN-34, pour « craquer » les goudrons en phase gazeuse

Les tests réalisés ont démontré que la capacité de l'installation était très supérieure à la capacité de conception puisque des essais ont été réalisés à des débits, allant jusqu'à 14.6 t/h, ont été expérimentés.

A partir du second semestre 2000, après quelques modifications sur l'unité une étude paramétrique a été entreprise afin de déterminer les ratios optimum de fonctionnement, en fonction de l'humidité de la matière première, du débit de vapeur,... Un des objectifs de ce programme consistait également à effectuer 24h de fonctionnement continu à la capacité nominale, ce qui n'avait jamais été réalisé jusqu'à cette date.

Ces tests ont été réalisés et ont permis d'accumuler un peu plus de 200h sur l'unité avec un fonctionnement à pleine capacité, incluant un test d'endurance de 63h. Les résultats obtenus confirment les chiffres du pilote de Batelle avec l'obtention d'un gaz de 17.5 MJ/Nm<sup>3</sup> de PCI moyen. Le procédé a montré une grande souplesse vis à vis de l'humidité du combustible puisque le PCI du gaz obtenu serait constant pour des humidités de bois comprises entre 10 et 50%.

Plusieurs matières premières ont été testées, plaquettes forestières, sciures, granulés avec des résultats satisfaisants.

Aucune information particulière n'est donnée sur le couplage avec une turbine à gaz telle que prévu dans la phase 3 du projet, mais les retards importants accumulés jusqu'à ce jour laissent supposer que cette dernière tranche du programme initial n'est que très partiellement abordée à ce jour.

### **Expertise technique**

Aucune information n'est fournie sur les coûts de l'installation. Il s'agit réellement d'une unité pilote de R&D et de nombreuses modifications sont intervenues à ce jour pour permettre le fonctionnement de l'installation sur quelques centaines d'heures seulement.

Les plus grosses incertitudes qui existent à notre sens concernent le taux de goudron dans les gaz qui devrait poser de gros problèmes à la fois sur le plan pratique pour le couplage mais aussi pour le traitement des effluents. C'est une des raisons qui a conduit à l'échec du projet guyanais d'EDF.

<b>PROJET VÄRNAMO</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lit fluidisé circulant sous pression	
<b>Localisation :</b> Värnamo, Suède	<b>Etat actuel :</b> arrêtée
<b>Contact :</b> HANKALA Jari - S- 20509, Malmo, Sweden <b>Tél :</b> 358.10.39311 <b>Fax :</b> 358.10.393 – 7939 <b>Email :</b> jari_hankala@fwc.com	<b>Capacité :</b> 18 MW <b>Année :</b> 1996
<b>Financements :</b> Gouvernement suédois et Union européenne	
<b>Source :</b> Rapport final Union Européenne	

### L'objectif

Le projet Värnamo a pour objectif de démontrer la complète intégration d'une unité de gazéification de biomasse avec un cycle combiné. Ce projet est une démonstration et n'intègre pas de phase d'optimisation du procédé. Il projet a été le premier du genre mis en place dans ce domaine et son retour d'expérience est important. Le projet Värnamo a débuté en juin 1991 avec la décision de Sydkraft AB et Foster Wheeler Energy International de construire une installation de gazéification IGCC à Värnamo en Suède. La puissance retenue est de 6 MWe et 9 MWth avec une puissance d'entrée de 18 MW. Après une phase de construction, réception et pre-tests, un programme de démonstration et développement a été réalisé de 1996 à 2000 avec la collaboration d'autres compagnies dont EDF et Elkraft. Ce projet a été financé par le gouvernement suédois et par l'Union Européenne.

L'installation de Värnamo comprend :

- une unité de préparation du combustible solide avec séchage,
- un réacteur de gazéification à lit fluidisé circulant sous pression (18 bars) et avec l'air comme agent gazéifiant,
- un système de récupération d'énergie,
- une unité importante d'épuration des gaz avec cyclone, filtre céramique et filtre métallique,
- une turbine à gaz d'une capacité de 4.2 MWe,
- une turbine à vapeur d'une capacité de 1.8 MWe

### Matière première

Un certain nombre de combustibles solides ont été testés durant la période d'essai avec une attention particulière pour les combustibles à faible densité qui présentent un pouvoir calorifique par unité de volume relativement bas. Ainsi les combustibles tels que la paille, la sciure, les écorces de bois, les copeaux de saule ont été utilisés en plus des plaquettes de bois classiques. Ils ont subi au préalable une étape de densification en vue d'être utilisés sous forme de pellet. A souligner également l'utilisation de mélanges de déchets industriels banals (DIB) tels que carton, plastique, aluminium, etc... dans certains cas.

De façon générale, les combustibles testés ont montré un bon comportement par rapport à la gazéification, sans problème particulier de dépôts corrosifs ou d'agglomérats. Les écorces de bois ressortent comme étant un très bon combustible solide même utilisées en pleine charge. La qualité du gaz généré par ce combustible est compatible avec une étape de filtration et à son utilisation dans la turbine à gaz.

Malgré des concentrations en alcalins élevées, la gazéification de saule n'a pas posé de problème sur l'installation de Värnamo. Le seule véritable point négatif de ce combustible est la faible valeur du pouvoir calorifique du gaz produit.

En ce qui concerne la paille, également très chargée en alcalin et en cendres, celle-ci s'est comporté plutôt bien lors de la gazéification en mélange avec des écorces de bois. Les essais réalisés en pleine charge (100% de paille) ont mis en évidence une augmentation sensible de la production d' $H_2$  ce qui va plutôt dans le sens d'une compatibilité avec la turbine à gaz.

Avant leur introduction dans le silo de stockage situé en amont du réacteur, tous les combustibles sont séchés dans une unité spécifique. Ils sont ramenés à une teneur en humidité comprise entre 5 et 20% en fonction du combustible.

Après cette phase, les combustibles sont introduits dans une trémie étanche et mis sous pression. Ils sont introduits dans le bas du réacteur de gazéification au moyen d'une vis d'alimentation classique.

### **Le réacteur de gazéification**

Le réacteur de gazéification est de conception Foster Wheeler. Il s'agit d'un lit fluidisé circulant travaillant sous une pression de 18 bars. La température de gazéification est comprise entre 950 et 1000°C, et l'agent oxydant utilisé est l'air. Celui-ci est directement prélevé au niveau du compresseur de la turbine à gaz (environ 10% de l'air total comprimé). Le charbon récupéré au niveau du cyclone est ré-injecté en partie basse du réacteur de gazéification et est mis en contact avec l'air pour y être brûlé.

### **Le traitement des gaz**

Une particularité de l'installation réside dans le choix de l'agent fluidisant qui est aussi le catalyseur pour le craquage thermique des goudrons. Le MgO fut initialement utilisé puis remplacé par la dolomie pour des raisons de coût. Un effort de R&D est encore à réaliser dans ce domaine. Le gaz issu du cyclone est quant à lui ramené à une température de 350-400°C en passant dans un échangeur à tube. Il a été, dans un premier temps, nettoyé des particules et fines en passant dans un filtre céramique haute température (marque Schumacher GmbH). Ainsi les particules solides principalement des cendres sont récupérées au niveau de ce filtre et en partie inférieure du lit fluidisé. Ils sont refroidis et dépressurisés avant leur extraction. La faisabilité technique des filtres à céramique a été démontrée pendant plus de 1200 heures de fonctionnement. Cependant des problèmes sont ensuite apparus sur le système d'épuration avec la détérioration de deux filtres. Après remplacement de l'ensemble des filtres, le même problème est réapparu après seulement 350 heures de fonctionnement indiquant une fatigue mécanique accélérée plutôt qu'une attaque chimique.

Par mesure de sécurité, un système de filtre métallique fut alors installé et utilisé en remplacement (marque Mott corporation). Ce système a donné entière satisfaction en terme d'efficacité, de stabilité de la perte de charge et de la robustesse mécanique. 2500 heures de fonctionnement ont été réalisées dans cette configuration.



Le gaz épuré est alors injecté dans la chambre de combustion de la turbine à gaz en mélange avec l'air comprimé. Les fumées ainsi détendues génèrent 4.2 MWe. La turbine à gaz de conception ABB Alstom Gas Turbine a été modifiée pour tenir compte du faible PCI du gaz (5 MJ/Nm<sup>3</sup>). Les fumées sont alors récupérées au niveau d'un échangeur, générateur de vapeur. La vapeur produite est surchauffée (40 bars, 455°C) puis détendue dans la turbine à vapeur de marque TURbinefabrik Nadrowski GmbH pour fournir 1.8 MWe supplémentaire. Le rendement électrique net est alors de 32%.

### **Expertise technique**

Le projet Värnamo qui est le premier projet intégrant une unité de gazéification de biomasse couplée à une unité de production électrique à cycle combiné est intéressante à plus d'un titre. L'installation est une véritable unité pilote/semi industrielle modulable où la nature des combustibles a été étudiée, le craquage thermique et catalytique pris en compte au sein même du réacteur de gazéification et où une attention particulière a été donnée à l'épuration à chaud des gaz que ce soit par l'emploi de filtre céramique ou de filtre métallique.

Enfin, soulignons que cette installation est la seule aujourd'hui à avoir fonctionné avec du bois en cycle combiné avec une turbine à gaz et ceci pendant plus de 3600 heures.

Cependant, les problèmes sont nombreux: alimentation sous pression, qualité des gaz impropres au fonctionnement couplé, ... Elle n'en demande pas moins la faisabilité de la génération d'électricité à partir de la biomasse. L'installation est aujourd'hui arrêtée pour des raisons de coûts de fonctionnement. Il est vrai que la Suède est d'un des pays d'Europe où le kWe est le moins cher.

<b>Scierie Raud</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lit fixe a co-courant en cogénération (Martezo)	
<b>Localisation :</b> CAVIGNAC (Landes)	<b>Etat actuel :</b> En fonctionnement
<b>Contact :</b> Monsieur Raud 1 rue Tricolet Laruscade 33600 CAVIGNAC Tél : 05.57.68.62.04	<b>Capacité :</b> 100 KW <b>Année :</b> 1985
<b>Financements :</b> Privé, AFME	
<b>Source :</b> - Etienne Fels. Mise en place d'un suivi industriel de 2 unités gazo électrogène. Bilan technique et approche économique, mémoire de fin d'étude. CTFT septembre 1989	

La scierie Raud traite environ 7000 m<sup>3</sup>/an de pin maritime. Située à Laruscade dans un massif forestier, l'entreprise ne disposait pas de la puissance au niveau du réseau pour satisfaire à l'ensemble de ses besoins. C'est pourquoi le choix de Monsieur Raud s'est porté sur la gazéification qui lui permettait de valoriser ces déchets plutôt que de tirer une nouvelle ligne EDF. La puissance électrique installée est de 84 kW elle se décompose comme suit :

	kW
Scie de tête	30
Deligneuse	22
Dédoubluse	7.4
Dégoulineuse	3
Scie circulaire	1.3
Transfert	6.6
Divers	1.7
Séchoir	12

Un séchoir de type traditionnel à air chaud climatisé d'une capacité de 25 m<sup>3</sup> a été installé pour l'entreprise. Les besoins de séchage sont partiellement couverts par la récupération de chaleur sur l'ensemble gazo électrogène.

### **Description de la technologie**

Il s'agit d'un ensemble Martezo de 100 kVA avec un moteur à allumage commandé de marque Mercedes 6 cylindres. Un régulateur à membrane assure le mélange. L'alternateur de marque Leroy Sommer à une puissance affichée de 100 kVA. La chaîne de filtration comprend un ballon de dépôt de grosses particules, un barboteur, un filtre léger et un filtre papier. Le moteur a été équipé de système de récupération de chaleur :

- sur le système de refroidissement du moteur par simple préchauffage de l'air de séchage par le radiateur.

- sur l'échappement un échangeur permet de récupérer la chaleur sur les gaz.

Le combustible utilisé est constitué des déchets de l'entreprise séchés et calibrés - (15,3 MJ/kg à 20% d'humidité).

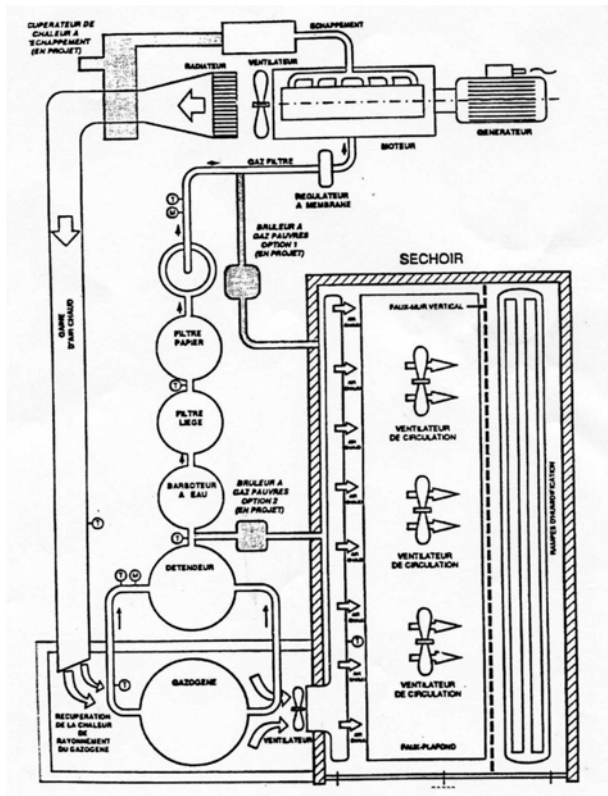


Schéma de principe de l'installation RAUD

### Analyse technique

Le rendement électrique de l'installation lors du test est de 10% qui résulte d'un surdimensionnement du groupe électrogène pour un fonctionnement en priorité. En effet, la scie de tête déséquilibre complètement l'installation dans la mesure où elle reporte 50% du besoin total et qu'elle a un facteur de charge de l'ordre de 40%. La production annuelle électrique est de 36MWh et la consommation de bois d'environ 88 t. Ce qui représente moins de 10% des déchets disponibles.

Le groupe électrogène fonctionne sans gros problème depuis 1985. Il est encore en fonctionnement à ce jour. La partie récupération de chaleur était par contre très inefficace, c'est ce qui avait amené Monsieur Raud à solliciter le Cirad pour étudier les possibilités d'installation d'un brûleur gaz en co-génération pendant les heures creuses.

<b>Harboøre</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lit fixe à contre-courant	
<b>Localisation :</b> Harboøre, Danemark	<b>Etat actuel :</b> en activité
Contact : Mr Knud E. Holm Babcock & Wilcox Vølund APS Falkevej 2 DK-6708 Esbjerg Danemark Tel : 45 76 14 34 00 Fax : 45 76 14 36 00	<b>Capacité :</b> 4.8 MW  <b>Année :</b> 1993
<b>Financements :</b> La municipalité de Harboøre et l'Agence pour l'Energie Danoise (Danish Energy Agency)	
<b>Source :</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Technical brochure n°116, Caddet renewable energy, Oxford, U.K.</li> <li>– A survey of biomass gasification 2001, T. Reed, S. Gaur, The national Renewable Energy Laboratory and The Biomass Energy Foundation, 2<sup>nd</sup> Edition</li> <li>– <a href="http://www.btgworld.com/gi/">www.btgworld.com/gi/</a></li> <li>– <a href="http://www.volund.dk">www.volund.dk</a></li> <li>– <a href="http://www.dfait-maeci.gc.ca/francais/geo/europe/Den_envf.htm">www.dfait-maeci.gc.ca/francais/geo/europe/Den_envf.htm</a></li> </ul>	

En 1992, la municipalité de Harboøre décide de financer la construction d'une chaufferie permettant d'alimenter environ 560 habitations à partir de biomasse. Le choix d'une unité combinant chaleur et énergie (CHP) a été fait bien qu'à l'époque aucune technologie ayant une efficacité acceptable n'était disponible à si grande échelle. Avec le support financier de l'Agence pour Energie Danoise (Danish Energy Agency), la compagnie Babcock & Wilcox Vølund offrait la possibilité de construire un gazogène à tirage direct pour le même prix qu'une chaufferie conventionnelle à combustion. Le gazogène de Harboøre de 4MW est basé sur l'expérience acquise par Babcock et Wilcox Vølund sur le gazogène de Kyndby, un pilote fonctionnant avec de la paille d'une capacité thermique de 1MW.

### Description de la technologie

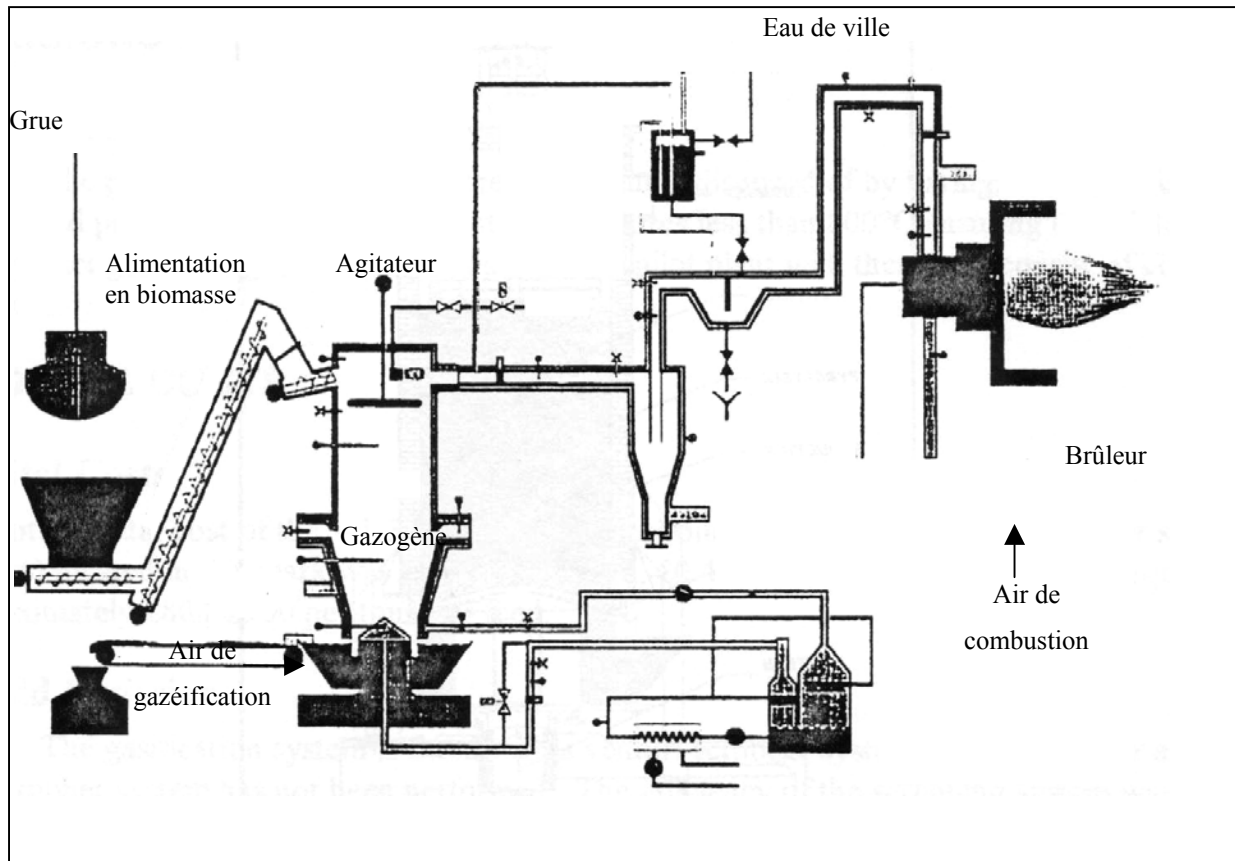
#### Matière première, type d'alimentation

Comme les plaquettes de bois provenant directement de forêt contiennent un taux d'humidité élevé, le choix d'une gazogène de type contre courant a été adopté.

#### Procédé de gazéification

Le gazogène de Harboøre comporte un réacteur vertical cylindrique avec une isolation interne en céramique. Dans le bas de celui-ci, se trouve une grille tournante qui laisse passer l'air nécessaire aux réactions chimiques ayant lieu dans le gazogène. Toutes les substances produites pendant le cheminement du bois dans le réacteur (séchage, pyrolyse, gazéification et combustion) ainsi que les goudrons sortent du gazogène par le haut à une température de 70°C. Le gaz est brûlé dans un brûleur de chaudière de 4 MW. Entre 1994 et 1996, divers problèmes techniques ont été identifiés et résolus. Dans les années qui ont suivi quelques modifications ont été faites pour optimiser le procédé, avec une ligne d'épuration des gaz pour pouvoir les utiliser dans un moteur pour

produire de l'électricité. Une chaudière au fioul permet l'approvisionnement supplémentaire en chaleur. Le gazogène est entièrement automatisé et fournit plus de 95% de la chaleur nécessaire pour le district de Harboøre. Le schéma de principe de l'installation est donné ci-après.



Représentation schématique de l'installation de gazéification de Harboøre

### Système d'épuration des gaz

Dans le but d'utiliser les gaz produits par le gazogène de Harboøre pour faire fonctionner des moteurs, tout un travail de recherche et développement concernant l'épuration des gaz a été financé à partir de 1997 par l'Agence Danoise en Energie. Aujourd'hui les gaz sont nettoyés à l'aide d'un système complexe d'épurateurs (scrubbers), d'échangeurs thermiques et de filtres électrostatiques avant d'être envoyés dans les moteurs. Le système d'épuration des gaz serait maintenant suffisamment performant pour faire fonctionner deux moteurs Jembacher de 648 kW chacun avec un rendement de 32%. Les quantités de goudrons produites posent cependant le problème de leur élimination.

### Production chaleur et/ou électricité

L'installation a été équipée en 2000 de deux moteurs à gaz fournissant une énergie électrique de 1,5 MW. Au cours de l'année 2000, l'installation aurait produit 15 000 MWth et 900 MWh électrique. Les deux moteurs auraient fonctionné 900 h, mais de manière limitée, à cause de la forte consommation de chaleur par la ville de Harboøre et le fait qu'il est nécessaire de se débarrasser des eaux utilisées pour l'épuration des gaz, celles-ci contiennent les goudrons. Elles seraient brûlées avec le gaz produit dans le brûleur de la chaudière. Le système

d'épuration des gaz fonctionne bien mais le traitement des eaux sales dans lesquelles sont condensés les goudrons limite le nombre d'heures de fonctionnement des moteurs.

### **Performance**

L'installation est opérationnelle, à partir de bois, depuis 1993 et fonctionnerait 8000 heures/an en combustion et de manière entièrement automatisée.

### **Bilan matière – Energie**

L'efficacité en sortie est de 4MW thermique, mais celle-ci peut être doublée, et en quelques minutes la capacité pourrait passer de 10 à 100%. La capacité minimum est de 0,6 MW dans des conditions de fonctionnement normales.

### **Qualité des gaz**

Aucunes données concernant la qualité des gaz ne sont disponibles dans la littérature.

### **Coûts**

Aucune donnée de coût n'a été trouvée.

<b>Projet Bioelettrica</b>	
<b>Type de procédé :</b> lit fluidisé circulant à pression atmosphérique	
<b>Localisation :</b> Pise, Italie	<b>Etat actuel :</b> en cours
<b>Contact :</b> Mr H.J. de Lange            Bioelettrica SpA Via C.Bastisti 47, 56125 PISE - ITALIE Tél : 39 050 535479 Fax : 39 050 535477 Email : delange@bioelettrica.it	<b>Capacité :</b> 14 MWe <b>Année :</b> 1996
<b>Financements :</b> Union européenne : programme Thermie	
<b>Source</b> [1] 'The realisation of a biomass-fuelled IGCC plant in Italy' – H.J. de Lange, P. Barbucci, 1 <sup>st</sup> World Conference on Biomass for Energy and Industry, Séville, Espagne 2000	

**L'objectif :**

Tout comme le projet Arbre, le projet Bioelettrica a pour objectif de démontrer la faisabilité technique et économique de la production d'énergie à partir de la biomasse en utilisant la technologie de gazéification IGCC. Ce projet réunit un partenariat européen composé de USF/ Smogless S.p.a (une division de US Filter), EDP-Electricidade de Portugal S.A, Energia Verde S.p.a, Lurgi Umwelt GmbH et Fumagalli Spa. Ce groupement réunit à la fois le fabricant, l'utilisateur final et le fournisseur de biomasse. Le site d'implantation retenu se situe près de Pise en Italie. Ce projet est en cours de relation et la phase de démarrage est prévue pour janvier 2002. La puissance envisagée est de 14 MWe net et de 41 MWth avec un rendement électrique estimé à 33%. Ce projet a reçu le soutien financier de l'Union Européenne dans le cadre du programme Thermie.

La future installation comprend :

- une unité de broyage et de séchage,
- un réacteur de gazéification de conception Lurgi à lit fluidisé circulant à pression atmosphérique et air,
- une unité de refroidissement,
- une unité de traitement et d'épuration des gaz ,
- une unité de destruction des effluents liquides générés par le procédé,
- une turbine à gaz fournie par Nuovo Pignone d'une capacité de 11 MWe,
- deux turbines à vapeur produisant un total de 3 MWe.

**Matière première**

La matière première envisagée est principalement des copeaux de bois issus de cultures énergétiques (TCR) tels que peuplier, châtaignier, ... D'autres types de combustibles ont également été envisagés pour les tests. Il s'agit de résidus agricoles ou autres tels que noyau d'olives, sciure, moue de raisin,.... En fonction de leur taille, le

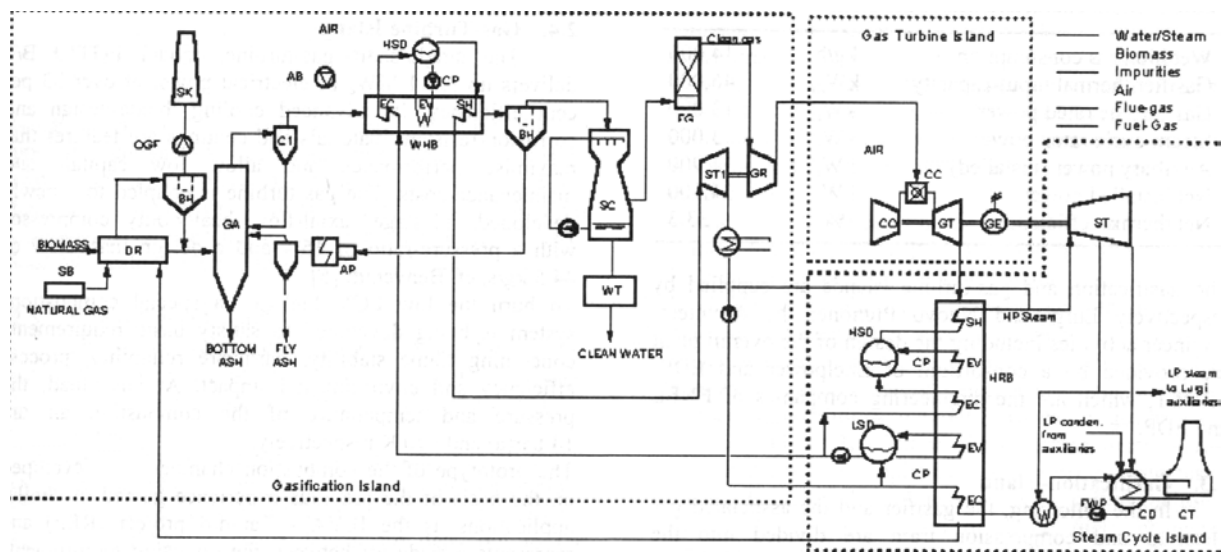
combustible sera préalablement broyé, puis mélangé aux résidus agricoles avant d'être séché dans un séchoir rotatif. Le séchage est réalisé par contact direct du combustible solide avec les fumées de combustion issues de la turbine à gaz. Le combustible séché est ensuite stocké dans un silo avant d'alimenter le réacteur de gazéification.

### Le réacteur de gazéification

Le réacteur est de type lit fluidisé circulant fonctionnant à pression atmosphérique avec de l'air comme agent gazéifiant. Il repose sur la principe de la technologie Lurgi. Les caractéristiques de l'installation sont les suivantes :

Consommation biomasse brute	14 t/h
Capacité thermique installée du gazéifieur	46 MWth
Capacité installée turbine à gaz	13 MWe
Capacité installée turbine vapeur	3 MWe
Capacité installée auxiliaire	1.9 MWe
Capacité installée nette	14.1 MWe
Rendement énergétique net	33.3 %

Un schéma de principe de l'installation est donnée ci-après.



### Le traitement du gaz

Le gaz produit par le réacteur de gazéification sera dans un premier temps refroidi à une température suffisamment basse pour pouvoir être dirigé vers un filtre à manche classique sans conduire à la condensation de goudrons. Ainsi, le gaz refroidi est épuré de ses fines et cendres dans le filtre à manche. Le gaz dépoussiéré est ensuite dirigé vers une unité spécifique d'épuration en goudron. Le système d'épuration qui est étagé devrait assurer la condensation des goudrons et aérosol et la récupération d'énergie. Les informations précises sur la technologie développée sont inexistantes.

Une estimation de la qualité des gaz a été fournie par le consortium et est donnée dans le tableau ci-dessous. [1]



Composition		Unité
CO	22	% vol.
H <sub>2</sub>	16	% vol.
CO <sub>2</sub>	13	% vol.
N <sub>2</sub>	44	% vol.
CH <sub>4</sub>	5	% vol.
PCI	6.4	MJ/Nm <sup>3</sup>

### **La turbine à gaz**

Le gaz est ensuite dirigé vers la turbine à gaz pour y être comprimé et brûlé. La turbine à gaz retenue est de type ARBRE délivrant jusqu'à 11 MWe avec un rendement électrique de 33 %. Le brûleur qui sera utilisé aura été modifié pour tenir compte du faible PCI du gaz comparé au PCI du gaz naturel.

### **La turbine à vapeur**

La turbine à vapeur, de type à condensation, sera alimentée par de la vapeur à 50 bars et 470°C. La puissance ainsi produite sera de 3 MWe avec un débit de 18 t/h.

### **Expertise technique**

De part sa structure, le projet Bioelettrica est similaire au projet Arbre en Angleterre. Les choix des réacteurs de gazéification sont identiques. La différence essentielle réside dans le choix technologique employé pour le traitement des gaz. Le projet Bioelettrica s'oriente vers une épuration des gaz par voie humide et basse température générant des effluents liquides à traiter. Peu d'informations ont pu être recueillies sur le traitement et cette solution technologique sera à évaluer dans le futur. Le principal intérêt apporté étant d'éviter des températures élevées de craquage thermique et des coûts d'achat pour les catalyseurs. Une étude comparative avec une solution de traitement des effluents serait à réaliser ultérieurement.

Enfin, la large gamme de combustibles solides envisagée, notamment les résidus issus de l'agro industrie, est un point important du projet. En effet, cette source de combustible peut représenter des tonnages significatifs et concentrées géographiquement de sorte que des coûts de mobilisation pourraient être réduits. Ceci est d'autant plus appréciables que ces coûts peuvent représenter jusqu'à 30 % du prix de revient du kWh.

Cependant il semblerait que ce projet soit abandonné sans que nous n'ayons plus d'informations disponibles à ce jour.

<b>Projet Greve in Chianti</b>	
<b>Type de procédé :</b> lit fluidisé circulant à pression atmosphérique - TPS	
<b>Localisation :</b> Greve in Chianti, Italie	<b>Etat actuel :</b> en fonctionnement
<b>Contact :</b> Aleandro Manetti Giuliano Cerofolini S.A.F.I Servizi Ambientali Area Via Lungo l'Ema 11, Bagno a Ripoli Tel : 055/6480.1 numero verde : 800-139300 Fax : 055/64.46.55	<b>Capacité :</b> 2 x 15 MWth <b>Année :</b> 1992
<b>Financements :</b> Union Européenne	
<b>Source</b> [1] Status of Gasification in countries participating in the IEA Bioenergy gasification activity – Report 2EWAB01.26 [2] Atmospheric CFB Gasification – The Greve plant and beyond - EKW Rensfelt - The international Conference on gasification and pyrolysis of biomass – Allemagne – 1997	

### L'objectif

En 1989, TPS a été contacté par Ansaldo Aerimpianty (Italie) pour concevoir deux réacteurs de gazéification d'une capacité totale de 30 MWth en PCI, à partir de déchets industriels banals. Le lieu d'implantation retenu est Greve in Chianti, près de Pise. Le schéma d'exploitation d'ensemble avait été fixé par le client de l'installation, à l'occurrence la société Servizi Ambientali Area Fiorentina (SAFI). Le démarrage de l'installation débuta en 1992.

Le projet Greve in Chianti met en œuvre :

- deux réacteurs de gazéification de type lit fluidisé circulant à pression atmosphérique et sous air (sans les réacteurs secondaires de crackage catalytique),
- une unité de traitement des particules solides contenues dans le gaz,
- une chaudière industrielle déjà existante,
- une cimenterie voisine.

La capacité totale de l'installation était fixée à 200 tonnes de déchets banals par jour. Les gaz produits sont brûlés dans une chaudière conventionnelle ou pour alimenter un four de cimenterie. Une vue de l'unité est donnée ci-après.

### Matière première

La matière première est constituée d'agglomérés de déchets de bois (refuse derived fuel) dont les dimensions peuvent atteindre jusqu'à 150 mm de long [1]. Elle est introduite au niveau de la partie inférieure du réacteur de gazéification.

### Le réacteur de gazéification

Le réacteur fonctionne à une pression proche de la pression atmosphérique et à une température de 850°C avec de l'air comme agent gazéifiant. Le procédé a l'avantage de la simplicité : pression atmosphérique et système de refroidissement. Cependant, le lit de dolomie présente encore quelques limites en terme d'efficacité d'élimination des goudrons. Le gaz produit par les deux réacteurs est traité au travers de séparateurs solides de type cyclone puis dirigés vers les brûleurs de la chaudière. Ainsi seul le traitement en particule est réalisé dans ce projet, avant la combustion du gaz. Parallèlement à ce circuit, une partie de ce gaz ainsi que les résidus solides, cendres, charbon et calcaire sont pour la désulfuration dirigés vers une cimenterie pour servir de combustible d'appoint.



Vue de l'unité de Grève in Chianti

Le débit moyen des gaz est de 4 500 Nm<sup>3</sup>/h, sa composition moyenne est donnée dans le tableau ci-dessous :

Composition		Unité
H <sub>2</sub> O	9.5	% vol.
CO	8.8	% vol.
H <sub>2</sub>	8.6	% vol.
CO <sub>2</sub>	15.7	% vol.
N <sub>2</sub>	45.8	% vol.
CH <sub>4</sub>	6.5	% vol.
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	4.9	% vol.
H <sub>2</sub> S	48.6	ppm
Particules	48.0	g/Nm <sup>3</sup>
Condensats	84.1	g/Nm <sup>3</sup>
PCI	7.4	MJ/Nm <sup>3</sup>

### **La chaudière**

La vapeur générée par une chaudière à condensation produit 6.7 MWe d'électricité. Les gaz de combustion issus de la chaudière subissent également un traitement de lavage à sec en 3 étapes en utilisant un procédé développé par Teller sans plus de précision.

### **Expertise technique**

Depuis 1993, l'installation de Greve in Chianti a produit plus de 6200 MWh d'électricité. De nombreux problèmes ont cependant été rencontrés au démarrage pendant les premières années d'exploitation. L'intérêt de ce projet a été de démontrer la faisabilité technique de la gazéification de déchets industriels banals en vue de produire un combustible gazeux pour des brûleurs de chaudières. Aucun traitement des goudrons n'est effectué et seule la séparation gaz-solide s'avère nécessaire. Le problème de la valorisation des effluents solides est également posé et aurait trouvé un élément de réponse par le biais de la cimenterie voisine, dans le cas de ce projet.

Malheureusement, aucune information n'est fournie sur les coûts de l'installation (mais les informations disponibles font toujours état de niveaux d'investissement élevés) et d'exploitation de cette unité jusqu'à aujourd'hui. Ces informations étant d'autant plus intéressantes qu'il s'agit de traitement de combustibles solides pour lesquels les coûts d'approvisionnement peuvent, en fonction des cas, être négatifs.

<b>Projet Lathi</b>	
<b>Type de procédé :</b> lit fluidisé circulant à pression atmosphérique	
<b>Localisation :</b> Lathi, Finlande	<b>Etat actuel :</b> en fonctionnement
<b>Contact :</b> KIVELÄ Matti - Lahden Lämpövoima Oy PO Box 24 FIN- 15101 LAHTI -FINLANDE Tél. : 358.10.39311 Fax : 358.10.393 – 7939 Email : matti.kivale@llv.fi	<b>Capacité :</b> 167 MWe et 240 MWth <b>Année :</b> 1998
<b>Financements :</b> Union européenne : programme Thermie	
<b>Source</b> Lathi gasification cofiring project, Lathi Finland <a href="http://www.westbioenergy.org/lessons/les19.htm">http://www.westbioenergy.org/lessons/les19.htm</a>	

**L'objectif**

L'objectif de ce projet est double. Il s'agit de démontrer à l'échelle commerciale la faisabilité technique de la gazéification directe de biomasse humide, et l'utilisation d'un gaz pauvre comme combustible d'appoint (15% de la demande en énergie) dans une chaudière à charbon pulvérisé. L'unité de gazéification fut connectée sur l'installation existante de Kymijärvi au sud de la Finlande. Celle-ci génère une capacité maximale de 167 MWe et 240 MWth pour le réseau de chaleur de la ville de Lathi. Ce projet fut soutenu financièrement par l'Union Européenne au travers du programme Thermie. Le lit fluidisé circulant d'une capacité de 45 MWth démarra en janvier 1998 à partir de déchets de recyclage constitués principalement de bois, de papier, de carton et d'un peu de plastique pour une durée de test d'un an qui s'acheva en janvier 1999 avec une disponibilité de 98%.

L'installation de Lathi est relativement simple puisqu'elle comprend :

- un système de préparation des combustibles,
- un réacteur de gazéification de type lit fluidisé circulant à pression atmosphérique Foster Wheeler utilisant l'air comme agent gazéifiant,
- un système de refroidissement des gaz avec récupération d'énergie,
- une chaudière à vapeur,

**Matière première**

Plusieurs combustibles ont été testés seuls ou en mélange dans le cadre de ce projet. On peut citer pour la biomasse les résidus de l'industrie forestière, et pour les déchets industriels des produits comme les pneumatiques, des plastiques, cartons, papier. Nous n'avons pas trouvé d'information spécifique sur la répartition par type des combustibles réellement utilisés durant les tests. Cependant, le tableau ci-dessous résume l'ensemble des combustibles disponibles et susceptibles d'alimenter l'unité [1].

Combustibles solides	% en masse	% d'humidité
Saule	10	45-55
Résidus forestiers	30	45-55
Résidus de l'industrie du bois	30	10-20
DIB	30	10-30

Une étude importante du procédé a été la préparation du combustible solide. Après une phase de broyage des différentes matières premières, une étape de séparation métal/matière carbonée est réalisée par action d'un champ magnétique. En fonction de leur nature, les produits obtenus sont alors stockés dans des silos avant d'être dirigés au moyen de banc convoyeur vers la vis d'alimentation du réacteur de gazéification. Aucune phase de séchage n'est réalisée sur le combustible avant son introduction dans le réacteur.

### Le réacteur de gazéification

Le réacteur de gazéification est de technologie Foster Wheeler. Il s'agit d'un lit fluidisé circulant à pression atmosphérique avec air comme agent gazéifiant. Le lit fluidisé ainsi que le cyclone de récupération des particules solides sont complètement revêtus de réfractaire. Une particularité du cyclone est sa conception originale pour l'évacuation des gaz. Ces derniers sont évacués en co-courant par rapport aux particules solides grâce à l'ajout d'un raccord central sur la partie inférieure du cyclone. Le schéma de principe du gazéifieur est donné ci-dessous.

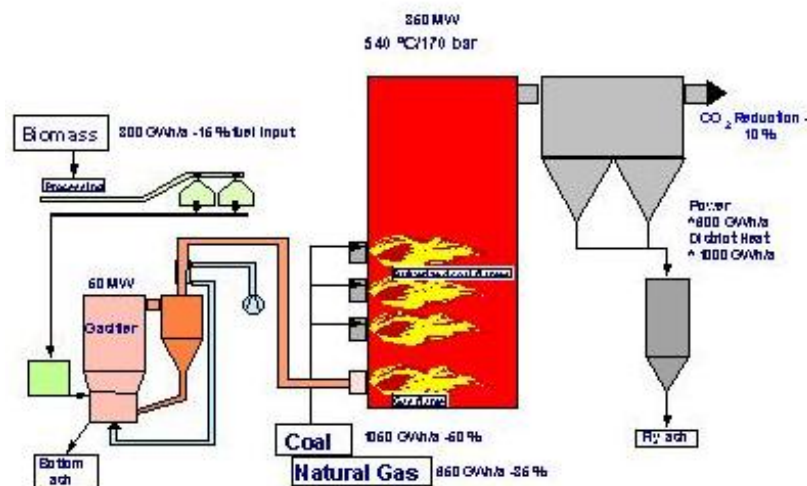


Schéma de principe du gazéifieur LATHI

La température du réacteur est typiquement comprise entre 800 et 1000°C en fonction de la nature de la matière première. La majeure partie du solide récupéré au niveau du cyclone est réinjecté dans la partie inférieure du lit fluidisé. Ce solide principalement composé de charbon et de cendres est brûlé en partie inférieure du lit. Les gaz de combustion constituent l'agent de fluidisation et fournissent une partie de l'énergie nécessaire à la pyrolyse gazéification. Le sable en re-circulation apporte l'énergie complémentaire nécessaire à la réaction et stabilise la température du réacteur. Les cendres obtenues durant la gazéification sont récupérées en partie inférieure du lit

fluidisé à l'aide d'une vis d'extraction refroidie à l'eau. Les gaz quant à eux sont récupérés en sortie du cyclone et refroidis au travers d'un échangeur avant d'être injectés dans deux brûleurs de la chaudière conçus spécifiquement pour des gaz à faible PCI. Le pouvoir calorifique du gaz est très faible puisqu'il peut atteindre 2.2 MJ/Nm<sup>3</sup> lorsque le combustible solide contient 50% d'humidité. L'énergie thermique récupérée au niveau de l'échangeur est utilisée pour le préchauffage de l'air de gazéification.

### **La chaudière**

Elle est de type Benson avec les caractéristiques suivantes : 125 kg/s de vapeur à 540°C/170 bars/540°C/40 bars. La puissance maximale disponible est alors de 167 MWe et 240 MWth. L'apport énergétique du gaz issu de la gazéification est estimé à 15 % environ.

### **Expertise technique**

Le principal intérêt de cette installation réside dans le fait que différentes matières premières ont été testées en gazéification, aussi bien la biomasse que des déchets industriels, et ceci avec des teneurs en humidité élevées puisqu'allant de 20 à 60 %. Plusieurs adaptations ont été réalisées au niveau du réacteur de gazéification pour tenir compte de l'hétérogénéité des différents combustibles solides. On peut citer les modifications apportées au niveau de la répartition de l'air de gazéification dans le lit fluidisé, ou la conception différente de la vis d'extraction des cendres. D'un point de vue pratique, la faisabilité technique de la gazéification de biomasse humide et de déchets a été démontrée dans le cas où l'application en aval est une combustion directe des gaz pour une chaudière. Cette faisabilité technique reste vraie même pour des gaz à très faible pouvoir calorifique. Ainsi, les résultats de ce projet peuvent dans un futur plus ou moins proche être utilisés comme base technique pour l'étude et le développement industriel de la gazéification de déchets industriels.

En terme d'environnement, lorsque la chaudière est en co-combustion par rapport à un fonctionnement tout charbon, il y aurait une diminution de 10 mg/MJ (5 à 10%), 20-25 mg/MJ et 15 mg/Nm<sup>3</sup> des émissions de Nox, SO<sub>2</sub> et particules respectivement, alors que les émissions de HCl augmenteraient de 5 mg/MJ.

Si l'unité de Lathi est souvent citée, il convient cependant de ne pas oublier qu'il existe environ 6 unités de gazéification fonctionnant à ce jour dans les papeteries finlandaises.

Les coûts d'investissement de cette installation ne sont pas connus avec précision, cependant le coût de ce type d'installation est dans la fourchette 450 à 700 euro/kW. Des modifications mineures sont à réaliser sur la chaudière et des perturbations possibles sur l'unité de gazéification n'affectent pas la chaudière.

### **Matière première :**

Résidus de l'industrie forestière, de l'industrie du bois,

Cultures énergétiques à courte rotation

Déchets industriels banals

<b>EVN (Energie Versorgung Nord)</b>	
<b>Type de procédé :</b> lit fixe à co-courant	
<b>Localisation :</b> Harrislee, Allemagne	<b>Etat actuel :</b> fonctionnerait
Contact : U.Rehling Energie Versorgung Nord GmbH & Co KG Am Oker 32 - 24955 Harrislee - Germany Tel.: +49-(0)461-707023-0 Fax: +49-(0)461-707023-16 email: info@evn.de	<b>Capacité :</b> 400 kWth +200 kWe <b>Année :</b> 1998
<b>Financement :</b> privé	
<b>Source :</b> – Anlagenbeschreibung der Holzvergasung im Biomasseheizwerk Domsland – Informationen und Projektbeschreibung Biomasse-Heizkraftwerk Domsland Eckernförde – Schleswig-Holstein – <a href="http://www.evn.de/deutsch/evn.htm">www.evn.de/deutsch/evn.htm</a>	

EVN est une entreprise privée qui travaille dans la production d'énergie par cogénération à partir de biomasse. Cette entreprise a déjà plusieurs années d'expérience dans la combustion et a développé récemment un gazogène dans le cadre du projet Allemand Domsland qui prévoit l'approvisionnement en chaleur et en électricité de 380 habitations à partir de biomasse. Ce projet est doté d'un capital de 9.15 millions de DM dont plus de la moitié (4.65 millions de DM) est d'origine privée, le reste étant constitué de subventions publiques provenant de divers ministères et de collectivités locales.

### Description de la technologie

#### Matière première, type d'alimentation

La matière première utilisée est composée uniquement de plaquettes de bois issus de déchets d'abatage d'exploitations forestière et agricole. Le ramassage, le conditionnement et la livraison du bois est assuré par un service mis en place pour tout le projet Domsland. Les plaquettes de bois sont livrées par camion et tracteur, et stockées directement dans des silos de stockage. Tout un système d'alimentation automatique, équipé de plusieurs grues, de silos intermédiaires et d'un séchoir, permet d'approvisionner le gazogène en matière première. Le séchoir est constitué de 8 chaînes à godets indépendantes, isolées par un carénages dans lequel circule de l'air chaud (30-45°C). Le taux d'humidité des plaquettes de bois doit être compris entre 12 et 22 % pour la gazéification. Depuis le silo de stockage jusqu'au réacteur, l'alimentation est entièrement automatisée.

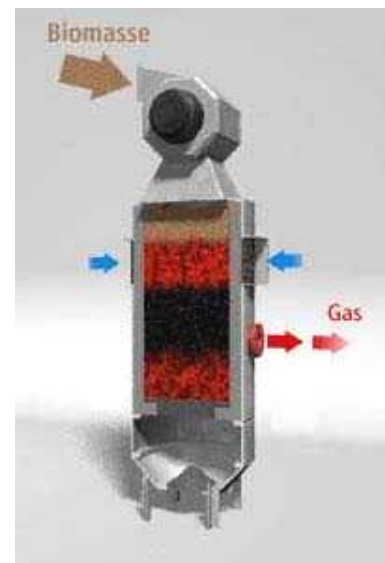
#### Procédé de gazéification

Le gazogène développé par EVN fonctionne selon le procédé en lit fixe à co-courant avec la particularité d'effectuer la gazéification complète de la biomasse en 2 étapes proche des procédés étagés. Le réacteur est



séparé en trois zones comme illustré en figure ci-après :

- la partie supérieure comporte un sas alvéolaire dans lequel le bois fini de sécher grâce à la chaleur fournie par les compartiments inférieurs (gradient de température allant de 40°C en entrée du sas jusqu'à 150°C en sortie).
- dans la partie centrale se déroule une première étape de gazéification à basse température (800°C). L'alimentation d'air (400-500 Nm<sup>3</sup>/h) se fait par dépression par l'intermédiaire de buses situées sur le côté du compartiment.
- le charbon obtenu en partie supérieure tombe au travers d'une grille dans le dernier compartiment. Celui-ci comporte également des grilles de plus en plus fines sur lesquelles le charbon est gazéifié. Les cendres résiduelles tombent dans un container situé à la base du gazogène.



### **Système d'épuration des gaz**

En sortie de réacteur, les gaz ont une température comprise entre 400-500°C. Un cyclone nettoie les gaz de la plus grande partie des poussières et des cendres, la poussière est précipitée et les gaz sont dirigés vers un échangeur à eau. L'eau chaude de l'échangeur sert à fournir la chaleur nécessaire à la tour de séchage. Les gaz sont par la suite "lavés", pour être débarrassés de fines particules de poussière et de goudron qui ont condensés lors du refroidissement des gaz. De l'eau est vaporisée à haute vitesse pour que les particules s'associent entre elles. L'eau de lavage est ensuite condensée et le goudron recueilli est sensé être ré-injecté dans le réacteur. Les gaz propres sont ensuite « séchés » par l'intermédiaire d'un dévésiculateur avant d'être utilisés dans le moteur. Le refroidissement des gaz de 400-500°C à 40-50 °C est à l'origine d'un vide partiel dans le réacteur qui permet l'alimentation en air et la circulation des gaz par dépression.

### **Production chaleur et/ou électricité**

Le gazogène est conçu pour alimenter une unité de cogénération avec un moteur à gaz .

### **Performance**

#### **Nombre d'heures de fonctionnement**

L'installation aurait fournie 6111 MWh/a en thermique et 1560MWh/a en électrique sur 7800 heures, ce qui signifierait qu'elle a fonctionné au nominal en électrique et à deux fois le nominal en thermique sur cette durée, ce qui est totalement exclu.

#### **Bilan matière – Energie**

L'absence de données à ce niveau confirmerait les doutes émis précédemment.

#### **Qualité des gaz**

La production en gaz serait de 500-600 Nm<sup>3</sup>/h. La composition des gaz obtenus est donnée dans le tableau ci-après.

CO (%)	H <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	Particules (mg /Nm <sup>3</sup> )
17-20	13-16	0.5-2	0.1-0.5	8-12	10

### Analyse critique

Le système d'alimentation en matière première est beaucoup trop compliqué pour une installation de cette taille même si elle se veut entièrement automatisée. Celle-ci fonctionne avec deux grues, des vis d'alimentation et huit chaînes à godets, qui implique une consommation électrique importante et diminue considérablement la rentabilité de l'installation. Le manque de données sur les bilans gaz, goudrons, cendres et charbon ainsi que la présentation de chiffres incohérents en matière de production électrique discrédite considérablement l'installation, même si le procédé qui associe le principe du co-courant à la gazéification étagée offrait un potentiel intéressant au départ. Cette unité est l'une des innombrables unités qui sont citées en référence dans de très nombreuses publications sans qu'aucune analyse critique même sommaire n'ait été réalisée.

<b>PROJET ARBRE</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lit fluidisé circulant à pression atmosphérique	
<b>Localisation :</b> Eggborough, Angleterre	<b>État actuel :</b> En cours de réception
<b>Contact :</b> KEITH Pitcher - First Renewables Ltd, 3 The Embankment, Sovereign Street, Leeds, UK,LSI 4BJ <b>Tél :</b> 44.113.231.2562 <b>Fax :</b> 44.113.231.2707 <b>Email :</b> keith.pitcher@first-renewelable.com	<b>Capacité :</b> 8 mWe <b>Année :</b> 1994
<b>Financements :</b> U.E. - Pouvoirs publics anglais	
<b>Matière première :</b> Plaquette taillis de saule	

### Description de la technologie

ARBRE Energy Limited est une joint venture créée en 1994 entre First Renewable Limited (groupe Kelda) et TPS Termiska Porcesser AB pour développer et implanter la technologie BIGCC en Angleterre.

En fin d'année 1994, Arbre Energy reçu le soutien financier de l'Union Européenne au travers du programme Thermie pour la construction d'une installation de gazéification à Selby North Yorkshire d'une capacité de 10 MWe soit 28 MW th en entrée.

Peu de temps après cela, le consortium fort appuyé au niveau national dans le cadre de la loi NFFO (No Fossil Fuel obligation), a reçu l'assurance d'un prix fixe de vente au réseau électrique anglais pour une période de 15 ans.

### L'objectif

L'objectif du projet ARBRE est double et consiste à répondre à deux points clefs du programme européen sur les énergies renouvelables :

- Démontrer la faisabilité technique de production d'énergie à haut rendement à partir des sources d'énergie renouvelable de type biomasse,
- Développer la production de sources d'énergie renouvelable et durable au travers de la culture énergétique à courte rotation afin de garantir l'intégration.

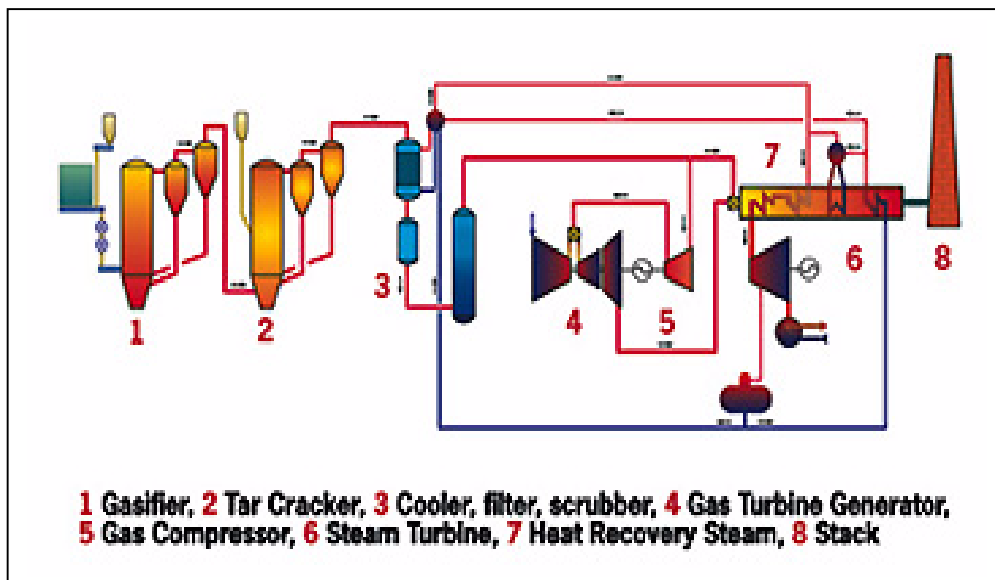
Ainsi, ce projet ARBRE est un des premiers programmes d'envergure sur la gazéification de la biomasse qui intègre à la fois la production d'électricité à haut rendement et la gestion durable de source d'énergie de type biomasse. Les premières études furent réalisées en 1995 en prenant en compte les aspects environnementaux tels que les émissions à l'atmosphère, le transport de la biomasse sur site, les nuisances visuelles et sonores,....

En février 1997, le UK DOE et d'autres organisations gouvernementales donnèrent leur accord pour l'implantation de l'installation. Le procédé TPS est un réacteur de gazéification constitué d'un lit fluidisé circulant fonctionnant à pression atmosphérique couplé à une turbine à gaz à cycle combiné.

L'unité de gazéification comprend :

- un réacteur de gazéification,
- une unité de craquage des goudrons,
- un système de refroidissement des gaz,
- un filtre à gaz.
- un système de lavage des gaz par voie humide (scrubber)
- une turbine à gaz à cycle combiné
- un système d'évacuation des cendres
- une unité de traitement des effluents
- et une installation auxiliaire pour l'alimentation en sable et en dolomie, et pour la production d'azote.

Un schéma du procédé est donné ci-après.



Le gaz produit au cours de la gazéification est dirigé vers un cyclone en vue de le nettoyer des cendres, du charbon et du sable résiduel. Ces derniers sont réintroduits à la base du réacteur de fluidisation. Le gaz est quant à lui dirigé dans une des unités de craquage des goudrons. Cette unité est de conception identique au réacteur de gazéification. Elle comprend un lit fluidisé circulant et un cyclone dans lequel le matériau fluidisant utilisé est le catalyseur (dolomie).

Après le cyclonage, les gaz sont refroidis (" 200°C). Les fines particules sont retenues dans des filtres à manches classiques. Le gaz est ensuite dirigé vers un second système de refroidissement puis dans un laveur humide pour condenser la vapeur d'eau ensuite vers un filtre final pour retenir les traces de goudrons et de composés d'alcalins.

Le gaz ainsi nettoyé est divisé en deux flux. Le flux principal est dirigé vers la chambre de compression en amont de la turbine à gaz pour y être brûlé. Les fumées ainsi produites seront dirigées vers un échangeur pour la récupération de chaleur et la production de vapeur pour la turbine à vapeur (waste heat boiler - WHB).

Le flux secondaire de gaz est brûlé en appoint avec les fumées de la turbine à gaz juste avant leur entrée dans l'échangeur thermique (WHB).

Cette conception de type IGCC permettra la production nette de 8MWe avec une efficacité électrique estimée à 30% pour cette installation de faible capacité. Un rendement de plus de 40% serait attendu dans le cas d'installations de plus grande capacité (>30MW)

### **Matière première**

L'unité utilise des plaquettes de bois provenant en majorité des TCR (taillis à courte rotation) à hauteur de 60% pour le début puis 80% à terme et partiellement des résidus de l'industrie du bois (40% puis 20% à terme). La capacité annuelle est de 43 000 t/an sur anhydre. Les essences retenues pour les cultures énergétiques sont le saule et le peuplier et sont mobilisables dans un rayon de 60 km (2000 ha).

### **Expertise technique**

L'installation est en cours de réception et la campagne de test devrait démarrée en début 2002.

<b>Projet SCHWARZE PUMPE</b>	
<b>Type de procédé :</b> Lits fixes : LURGI et B.G Lurgi Lit entraîné : NOELL (Bakcook)	
<b>Matière première :</b> Tout type de déchets et lignites	
<b>Localisation :</b> Dresden - Allemagne	<b>Etat actuel :</b> Industriel
<b>Contact :</b> Thomas Obermeier D-02979 Spreel OT Spreewitz - Allemagne Tel : 49.35.64.69.37.70 Fax : 49.35.64.69.37.34 Email : svz@svz-gmbh.de www.svz-gmgh.de	<b>Capacité :</b> 50 à 75 MWe 100 000 t méthanol <b>Année :</b> 1950
<b>Financements :</b> Privé	
<b>Source :</b> Brochure commerciale	

### Objectifs.

L'unité de Schwarze Pumpe est un ancien complexe industriel chimique fonctionnant au lignite depuis une cinquantaine d'années. L'unité de gazéification, avant la production de méthanol, a produit jusqu'à 20 millions de m<sup>3</sup>/j de gaz de ville. Le passage au gaz naturel a nécessité une reconversion très rapide de l'installation et d'importants investissements ont été réalisés entre 95 et 97.

A ce jour, sont toujours en fonctionnement:

- 7 lits fixes Lurgi à sole rotative fonctionnant à une température de 1300 °C
- 1 unité Brith Gas -Lurgi en lit fixe avec vitrification des cendres fonctionnant à 1600°C
- 1 unité en lit entraîné de technologie Noell aujourd'hui Babcock Borsig fonctionnant à 1800 °C.

L'ensemble des gazéifieurs fonctionne à 25 bars avec de l'oxygène comme agent oxydant.

Outre ces installations de gazéification, l'installation comprend :

- une unité de traitement de gaz très complexe pour le dégoudronnage et le dépoussiérage ainsi qu'une unité de condensation du CO<sub>2</sub> pour la purification avant la synthèse du méthanol
- une unité de production de l' O<sub>2</sub>
- une unité de réformage et de production de méthanol de 100 000 t/an
- une centrale alimentée par les gaz process de 75 MWe en cycle combiné dont 1/3 est utilisé au niveau du site.

### Matière première

A l'origine l'usine fonctionnait à 100% au lignite pour passer assez rapidement à 20% lignite, 80% déchets. Un

très grand nombre de matières premières constitue l'approvisionnement de cette installation :

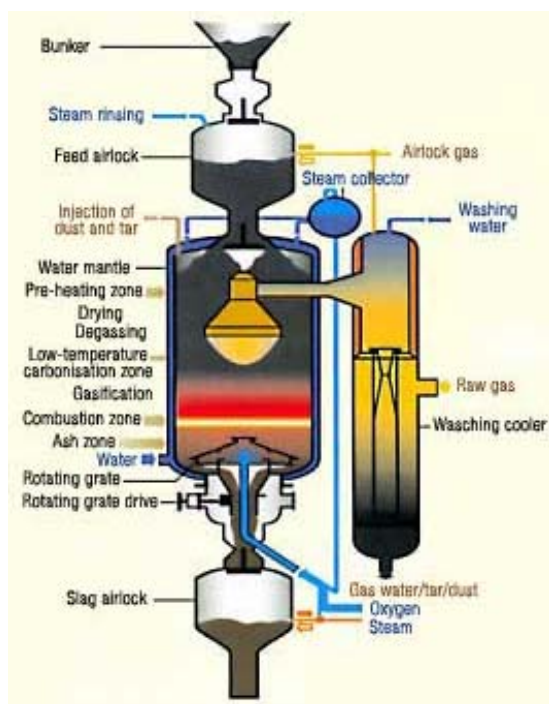
- matières plastiques,
- bois contaminés,
- boues de station d'épuration,
- déchets ménagers,
- huiles usagées,
- solvants,
- goudrons (provenant des aires de stockage de l'ancienne usine).

Un quart de l'approvisionnement est assuré par des matières plastiques. Pour l'essentiel, ces matières premières sont conditionnées à l'extérieur et livrées à l'usine sous forme de briquettes de 8 cm de  $\varphi$ . Une faible partie des matières premières est densifiée sur le site, les bois y sont également déchiquetés. Les liquides, farines et autres produits comme les goudrons provenant de la zone de lavage des gaz ou des anciennes carrières sont traités dans le lit entraîné.

Des conditions spécifiques sont définies pour fixer les seuils vis à vis de certains polluants dans ces approvisionnements. Les informations concernant ces seuils sont disponibles sur le site internet.

### Les réacteurs de gazéification

Les trois équipements installés sur le site sont présentés schématiquement ci-après. L'unité BG Lurgi est encore en phase de test.



#### Procédé Lurgi à cône rotatif

Pression : 25 bars

Lit fixe à oxygène + vapeur de capacité : 14 à 16 t/h

Température sortie gaz : 500°C

Produit sortie :

16 000 Nm<sup>3</sup> gaz/h

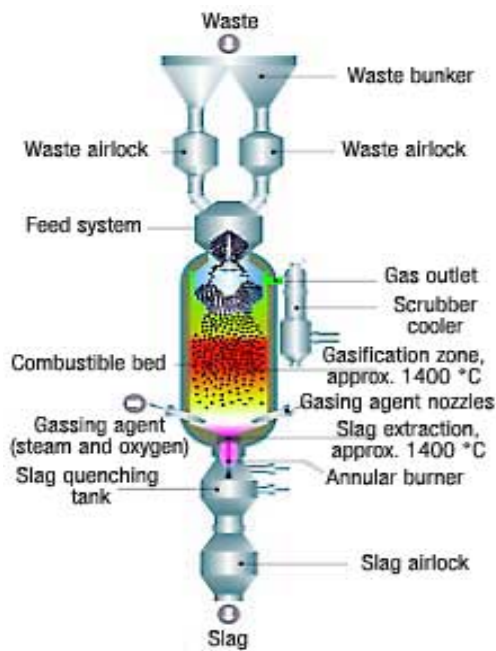
2.5 t/h de cendres

Température de réaction : 1 150 - 1300°C

Consommation :

20-23t/h de vapeur

3 200 Nm<sup>3</sup> /h de O<sub>2</sub>



### Procédé BG - Lurgi

Lit fixe à oxygène avec vitrification :

27 à 30 t/h

Pression : 25 bars

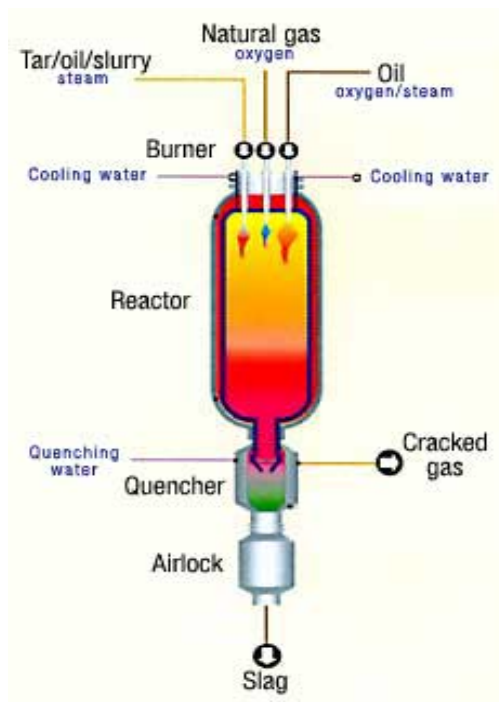
Température de réaction : 1 600°C

Consommation :

6-9 t/h de vapeur

3 500 Nm<sup>3</sup> /h de O<sub>2</sub>

Production de vitrifiats : 7.5 t/h



### Lit entraîné NOELL (Babcock-Borsig)

Lit entraîné à l'oxygène avec vitrification

Pression : 25 bars

Température : 1 800°C

3 brûleurs spécifiques en partie supérieure

20t/h de capacité

Consommation :

4t/h vapeur

5 000 Nm<sup>3</sup> /h de O<sub>2</sub>

### Le traitement des gaz

Il a été très difficile d'obtenir des informations sur cet aspect. Le traitement des gaz se fait en deux étapes successives. L'unité de traitement goudrons/dépoussiérage est très imposante (l'emprise au sol est supérieure à celle réservée au gazéifieur) mais aucune information n'a été fournie. Toutefois la qualité des gaz est très élevée pour la synthèse du méthanol et le dépoussiérage ainsi que l'élimination de goudrons doit être poussée. Les gaz, une fois débarrassés de leurs impuretés, sont purifiés afin d'éliminer les polluants restants et plus particulièrement le CO<sub>2</sub>.



La composition moyenne des gaz en entrée et sortie du système de purification est donnée dans le tableau ci-après.

	Avant % vol.	Après % vol.
H <sub>2</sub>	45	64
CO	10	19
CH <sub>4</sub>	7	8
CO <sub>2</sub>	34	6
N <sub>2</sub>	1.8	1.4
O <sub>2</sub>	0.01	0.06

### En terme de bilan

Selon les promoteurs, 1 t de plastiques de pouvoir calorifique 34 MJ/kg et 8% de cendres permettrait de produire 600 kg/h méthanol, 0.98 MWh et 4 kg de gips.

Les matières premières selon leur qualité sont facturées entre 0 et 400 €/t, la majorité étant facturée aux environs de 100 €/t.

En terme de chiffre d'affaire, la part de la redevance du traitement des déchets représenterait environ 60% du chiffre d'affaire de l'entreprise. Les 40% restants seraient le méthanol puis l'électricité.

### Analyse critique

Les unités de gazéification sont assez vieilles et toutes ne sont visiblement pas en fonctionnement. Par contre, quelque soit la technologie il est clair que la société SCHWARZE PUMPE et ses partenaires ont acquis une expérience assez unique en ce qui concerne la gazéification de très nombreux produits. Une des contraintes fortes des procédés Lurgi réside dans le prix du conditionnement des déchets (densification) qui représente un coût approximatif de 50 €/t (pour les plastiques). Le procédé NOELL est bien adapté aux liquides et peu aux solides (nécessité d'une préparation poussée " 50 : ). Il convient de signaler que cette unité permet d'éliminer les goudrons qui sont produits par les autres unités de gazéification. La qualité des gaz en terme de goudrons n'est donc pas fondamentale pour les installations de gazéification puisque le lit entraîné permet de les éliminer après la séparation. Le traitement de ces gaz doit cependant avoir un coût non négligeable notamment en terme de maintenance des installations de lavage dépoussiérage.

## **ANNEXE 4**

### **Les 30 plus grosses unités de gazéification dans le monde (SFA Pacific)**

Société	Localisation	Technologie	Capacité MWth	Année de démarrage	Combustible /produit
Sasol-II	Afrique du Sud	Lurgi Dry Ash	4.130	1977	Charbon/carburant
Sasol-III	Afrique du Sud	Lurgi Dry Ash	4.130	1982	Charbon/carburant
Repsol/Iberdrola	Espagne	Texaco	1.654	2004 <sup>1</sup>	Résidus pétroliers /Electricité
Dakota Gasification Co.	Etats Unis	Lurgi Dry Ash	1.545	1984	Lignite & Résidus pétroliers /gaz de ville
Sarlux srl	Italie	Texaco	1.067	2000 <sup>2</sup>	Résidus pétroliers/électricité &H <sub>2</sub>
Shell MDS Sdn. Bhd.	Malaisie	Shell	1.032	1993	Gaz Naturel/distillat
Linde AG	Allemagne	Shell	984	1997	Résidus pétroliers/Electricité
ISAB Energy	Italie	Texaco	982	1999 <sup>2</sup>	Résidus pétroliers/H <sub>2</sub> & Méthanol
Sasol-I	Afrique du Sud	Lurgi Dry Ash	911	1955	Asphalte/électricité & H <sub>2</sub>
Total France/EDF/Texaco	France	Texaco	895	2003 <sup>1</sup>	Charbon/carburant
Unspecified owner	Etats Unis	Texaco	656	1979	Produits pétroliers/électricité & H <sub>2</sub>
Shell Nederland Raffinaderij BV	Pays Bas	Shell	637	1997	Gaz naturel/Méthanol & CO
SUV/EGT	Republique Tchèque	Lurgi Dry Ash	636	1996	Produits pétroliers/H <sub>2</sub> & électricité
Chinese Petroleum Corp.	Taiwan	Texaco	621	1984	Charbon/électricité & vapeur
Hydro Agri. Brunsbuttel	Allemagne	Shell	615	1978	Bitume/H <sub>2</sub> & CO
Public Service of Indiana	Etats Unis	Destec	591	1995	Résidus pétroliers/ammoniac
VEBA Chemie AG	Allemagne	Shell	588	1973	Charbon/électricité
Elcogas SA	Espagne	PRENFLO	588	1997	Produits pétroliers /ammoniac & méthanol
Motiva Enterprises LLC	Etats Unis	Texaco	558	1999 <sup>2</sup>	Charbon & coke/électricité
API Raffineria di Ancona Spa	Italie	Texaco	496	1999 <sup>2</sup>	Coke/électricité& vapeur
Chemopetrol a.s.	Republique Tchèque	Shell	492	1971	Résidus pétroliers/méthanol/ammoniac
Demkolec BV	Pays Bas	Shell	466	1994	Charbon/électricité
Tampa Electric Co.	Etats Unis	Texaco	455	1996	Charbon/électricité
Ultrafertil S.A.	Brésil	Shell	451	1979	Asphalte/ammoniac
Shangai pacific chemical Corp	Chine	Texaco	439	1995	Anthracite/méthanol & gaz de ville
Exxon USA Inc.	Etats Unis	Texaco	436	2000 <sup>2</sup>	Coke/électricité & syngas
Shangai pacific chemical Corp	Chine	IGT U-GAS	410	1994	Charbon/ga z& gaz de ville
Gujarat National Fertilizer Co.	Inde	Texaco	405	1982	Produits pétroliers/ammoniac/méthanol
Esso Singapore Pty. Ltd	Singapour	Texaco	364	2000 <sup>2</sup>	Produits pétroliers /électricité & H <sub>2</sub>
Quimigal Adubos	Portugal	Shell	328	1984	Produits pétroliers/ammoniac

<sup>1</sup> Technologie nouvelle

<sup>2</sup> En construction