

# ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX LIÉS À LA PYROLYSE DE LA BIOMASSE

Corinne MEZERETTE, Philippe GIRARD, Anne-Marie VERGNET,  
Centre Technique Forestier Tropical



Four artisanal de carbonisation  
*A non industrial kiln of carbonization*

## RÉSUMÉ

### ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX LIÉS À LA PYROLYSE DE LA BIOMASSE

L'équipement en matière de carbonisation est essentiellement constitué de fours à combustion partielle sans système de récupération des produits cogénérés (gaz et composés organiques condensables). Cette situation se traduit par une pollution atmosphérique non négligeable et de faibles rendements de conversion. C'est pourquoi, à la demande du Ministère Français de l'Environnement et de l'A.D.M.E. (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), le C.T.F.T. a entrepris la caractérisation de ces émissions de pyrolyse et l'étude des systèmes de traitement adaptés.

Dans cet article sont présentées la composition et la toxicité des effluents de pyrolyse. Des résultats expérimentaux (études cinétiques, concentrations et facteurs d'émission des polluants) sont donnés pour différents procédés de pyrolyse (four pilote de laboratoire, four artisanal ou industriel). Les résultats montrent notamment comment le traitement thermique peut réduire considérablement les quantités de polluant émises tout en améliorant les rendements de production. C'est actuellement la voie de dépollution la plus prometteuse. Les aspects législatifs sont discutés et quelques méthodes de traitement et de valorisation de ces effluents sont également présentées (condensation, incinération).

## ABSTRACT

### ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE BIOMASS PYROLYSIS

The main industrial pyrolysis technologies currently employed in Europe and world-wide produce charcoal and essential oils. The charcoal production equipment consists of partial combustion kilns without recovery of co-generated products (gases and condensable organic compounds). This results in atmospheric pollution and low energy conversion yields. For this reason C.T.F.T. undertook a study of the characteristics of such emissions at the request of the French Ministry of the Environment.

This article describes the composition and toxicity of pyrolysis effluents. Experimental results (kinetic studies, concentration and emission factors of pollutants) are given for different pyrolysis processes. The legal aspects are discussed, and some techniques of treatment and profitable utilization of such effluents (condensation, incineration) are also described.

## RESUMEN

### ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES RELACIONADOS CON LA PIROLISIS DE LA BIOMASA

En el aspecto de la carbonización, el equipamiento disponible corresponde, básicamente, a los hornos de combustión parcial, sin sistemas de recuperación de los productos cogenerados (gas y compuestos orgánicos condensables). Semejante situación se traduce por una contaminación atmosférica nada insignificante, así como por rendimientos de transformación reducidos. Por todo ello, el C.T.F.T. ha emprendido la caracterización de estas emisiones nocivas y el estudio de los sistemas de procesamiento, a petición del Ministerio Francés del Medio Ambiente y de la Agencia Francesa para la Gestión de la Energía.

En el presente artículo se presentan la composición y la toxicidad de los efluentes de pirólisis. Se precisan también los resultados experimentales (estudios cinéticos, concentraciones y factores de emisión de contaminantes), para diversos procedimientos de pirólisis. Se examinan los aspectos legislativos así como algunos métodos de procesamiento y de valorización de estos efluentes (condensación, incineración).

# **L**e présent article se propose de faire le point sur les problèmes d'environnement et de pollution, liés aux technologies de pyrolyse, et de présenter succinctement les solutions développées pour la réduction des émissions et l'amélioration corrélative des rendements de conversion.

Les contraintes qui limitent actuellement, et pour le court terme, le développement des technologies de conversion thermo-chimique de la biomasse en Europe sont de plusieurs ordres :

- bas prix du pétrole brut sur le marché international,
- coût élevé de la matière première ligneuse (même des déchets) rendue sur site utilisateur,
- technologies de pyrolyse nouvelles encore au stade de la recherche ou du pilote industriel.

Cependant, les enjeux liés au développement des technologies de pyrolyse sont d'ordre multiple :

□ En Europe, la possibilité de cogénérer, à partir de la biomasse et de déchets de diverse nature, des combustibles liquides, gazeux ou solides, pourrait contribuer au rééquilibre de la balance commerciale de nos pays dans le cas (probable à long et moyen termes) de la remontée des cours du pétrole. Dans cette perspective, la disponibilité des terres agricoles mises en jachère (1 million d'ha en 1988-89) pourrait alors permettre la production économique de bois ou de matière première ligno-cellulosique en quantité adaptée.

□ Dans les P.E.D., la situation énergétique est radicalement différente. La plupart de ces pays, même les plus industrialisés, ont une part importante voire très importante (jusqu'à 60 % pour les pays les moins avancés) de leurs besoins énergétiques couverts par la biomasse. Les

pays de la zone intertropicale humide disposent d'un potentiel ligneux renouvelable abondant et peu coûteux (déchets d'exploitation forestière ou d'unités de transformation, plantations, ...). La pyrolyse une fois crédibilisée pourrait permettre de mieux valoriser cette ressource énergétique nationale. Les technologies performantes mises au point en Europe trouveront rapidement leur première application dans ces régions.

Les technologies de pyrolyse qui sont actuellement développées au stade industriel visent essentiellement la production de charbon de bois avec parfois la récupération des produits cogénérés : gaz et pyrolygneux.

Dans le cas général cependant, la carbonisation est pratiquée artisanalement sans récupération des sous-produits avec des rendements massiques et énergétiques très faibles (maxima respectifs : 30 et 50 %).

Ainsi, ne retrouve-t-on pas dans le charbon produit :

- 52 à 54 % du carbone initial,
- 77 à 82 % de l'hydrogène,
- 87 à 90 % de l'oxygène.

Ces éléments, correspondant au déficit entre le bois initial et le charbon de bois, sont rejetés à l'atmosphère sous forme de composés organiques plus ou moins complexes, susceptibles d'engendrer des nuisances importantes.

## **NATURE ET CONCENTRATION DES REJETS**

La nature des composés émis lors de la pyrolyse du bois a fait l'objet de nombreuses recherches analytiques (3) (5) (7) dont l'intérêt était d'ordre :

□ **Economique**, visant la récupération de produits tels que :

- Acide acétique, acide formique, méthanol, éthanol, phénols : ces produits peuvent être valorisés bien que fortement concurrencés par les produits de synthèse.

- Arômes utilisés comme additifs alimentaires et difficilement synthétisables.

□ **Scientifique**, en vue d'une meilleure compréhension des mécanismes de pyrolyse.

Plus récemment, le caractère polluant des fumées de pyrolyse a orienté divers travaux concernant notamment la nature et le niveau de toxicité des rejets liés à l'activité de pyrolyse.

En effet, la mise au point de techniques de traitements appropriés des effluents (dimensionnement d'incinérateurs, de filtres, de condenseurs, ...) nécessite avant tout une bonne connaissance de la nature chimique et de la concentration des rejets à traiter.

### **ASPECT QUALITATIF**

Le nombre de composés émis lors de la pyrolyse s'élève à plusieurs centaines, dont certains n'ont pas pu être encore identifiés. Rejetés à l'atmosphère, ils peuvent souvent être considérés comme polluants, à des degrés plus ou moins élevés.

On distingue en général trois grandes catégories de produits dans les fumées de pyrolyse.

#### **Les particules et poussières**

Elles sont constituées, en général, de suie, poussières de charbon, cendres, particules de goudron recuit, entraînées par le flux gazeux des fumées. Elles sont souvent englobées dans des vésicules de goudrons de taille variable et, pour cette raison, sont difficilement quantifiables selon les méthodes de détection normalisées, habituellement mises en œuvre pour des suivis d'installation de combustion.

## RAPPELS SUR LA PYROLYSE DU BOIS

### Mécanismes fondamentaux de la pyrolyse

La dégradation thermique du bois par pyrolyse agit par décomposition successive, en milieu réducteur, des principaux constituants (hémicelluloses, cellulose et lignine), de stabilité thermique différente (2). Les ruptures des liaisons et les processus de réarrangement au sein des polymères constituant le bois conduisent à un très grand nombre de produits. Le schéma des mécanismes fondamentaux proposé par SHAFIZADEH (3) met en évidence un ensemble complexe de schémas réactionnels, dont de nombreuses réactions secondaires intervenant rapidement après la formation de certains composés organiques dans ou hors du produit soumis au traitement.

Les études concernant les mécanismes réactionnels sont de 2 types : études fondées sur des analyses thermiques et thermogravimétriques, études basées sur l'analyse des produits de pyrolyse par la chromatographie en phase gazeuse et la spectrométrie de masse.

Cette dernière technique avec les travaux de MILNE (4) a permis d'identifier différentes chaînes de réactions qui se produisent pendant la pyrolyse de la biomasse.

Les analyses chromatographiques couplées à la spectrométrie de masse ont permis la mise en évidence de plus de 400 produits (5) (6).

Une étude de BLONDET (8) sur la cinétique d'apparition des produits pyrolytiques au cours de la carbonisation met en relation la nature des réactions thermo-chimiques et les produits formés.

Les aspects cinétiques de la pyrolyse sont menés à partir de deux principaux dispositifs expérimentaux basés sur l'introduction de la matière première dans une enceinte isotherme, préalablement mise en température, ou le suivi de la perte de masse de la matière première, en fonction d'une vitesse de montée en température présélectionnée.

Les représentations mathématiques de la perte de masse sont nombreuses et de type Arrhenius.

En ce qui concerne la thermicité de la réaction, une grande contradiction règne selon les auteurs et il semble acquis actuellement que la nature exo ou endothermique de la réaction globale varie selon la dimension du solide substrat, de la température de réaction, de la pression... (9) (10). Quoi qu'il en soit, la valeur absolue de la chaleur de réaction résultante ne représente que 3 à 4 % du

contenu énergétique du bois et reste probablement sans incidence dans un procédé industriel.

Cependant, pour la pyrolyse lente ou carbonisation, on distingue généralement cinq phases (11) (12), que nous résumerons succinctement :

- La première phase (de 20 à 200 °C) correspondant au séchage du bois est suivie par la décomposition des hémicelluloses (200 à 280 °C) avec dégagement d'acides acétique et formique, de furfural, de méthanol et de gaz oxygénés (CO, CO<sub>2</sub>).

- La phase exothermique, qui a lieu à partir de 280 °C, élève rapidement la température jusqu'à 320 °C. L'émission des composés précédemment cités se poursuit, accompagnée du dégagement d'hydrocarbures de faible poids moléculaire et de goudrons légers.

- Entre 320 et 500 °C, la dégradation de la cellulose génère des produits analogues aux produits de décomposition des hémicelluloses. Des composés phénoliques résultant de la dégradation de la lignine apparaissent accompagnés de goudrons plus lourds.

- Au-delà de 500 °C, les gaz, moins abondants, s'enrichissent en hydrogène.

Il faut préciser, par ailleurs, qu'un certain nombre de phénomènes thermo-chimiques secondaires accroissent la diversité des produits obtenus et rendent encore plus complexe la compréhension des mécanismes de la pyrolyse : réaction et recombinaison des produits formés, polymérisation, déshydratation, cracking des produits sur des points particulièrement chauds.

### Cas particulier de la torréfaction

Le bois torréfié est un produit intermédiaire entre le bois et le charbon de bois. Il s'obtient en réalisant les 2 premières étapes de la pyrolyse et en arrêtant la réaction avant le démarrage de la phase exothermique, c'est-à-dire vers 270-280 °C. Seuls les composés à faible pouvoir calorifique se dégagent et l'essentiel du contenu énergétique du bois se retrouve dans le produit final.

### Influence des différents paramètres de la pyrolyse

La composition et les proportions relatives des trois principaux produits de la pyrolyse (charbon, liquide et gaz) varient en fonction de divers paramètres qui sont : la nature du bois, la température finale de réaction, la vitesse de réaction,

la pression, les dimensions de la matière première, le taux d'humidité du bois, l'atmosphère de réaction, l'addition de catalyseurs.

### Les différents procédés de pyrolyse

L'essentiel des procédés de pyrolyse actuellement développés au stade industriel ou semi-industriel privilégie la production de charbon de bois (ou de bois torréfié). Il s'agit de procédés de pyrolyse lente, à pression atmosphérique, sans atmosphère de réaction particulière et sans adjonction de catalyseurs.

Les procédés de carbonisation existants peuvent être classés selon trois catégories en fonction de la source de chaleur utilisée pour fournir l'énergie de carbonisation :

#### La carbonisation par combustion partielle

L'énergie nécessaire est fournie par la combustion d'une partie de la charge et des produits volatils générés. Les fours sont en métal, en terre ou en brique. Les effluents sont dilués par la présence d'azote et d'oxygène non consommé, provenant de l'air de combustion. La presque totalité du charbon de bois produit dans les pays en voie de développement est fabriquée dans des systèmes à combustion partielle, en raison de leur simplicité et du faible coût du matériel. Dans les pays industrialisés, ce mode de carbonisation est encore largement utilisé (fours métalliques) dans les unités de faible et moyenne production.

#### La carbonisation par chauffage externe

L'énergie nécessaire est fournie à la charge, placée dans une enceinte close, par un foyer de chauffe externe, par l'intermédiaire d'une surface d'échange (vase clos, cornue). Une fois que le processus de carbonisation est amorcé, les produits de pyrolyse combustibles peuvent être injectés dans le foyer pour entretenir la pyrolyse. Ce principe a été largement utilisé avant les années 50 ; il est actuellement utilisé pour de faibles productions de charbon de bois.

#### La carbonisation par contact de gaz chauds

L'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par des gaz chauds provenant d'un foyer externe (il peut s'agir des gaz de pyrolyse brûlés) et mis en contact direct avec la charge. Cette technologie est surtout employée pour les fours industriels fonctionnant en continu.

## Les gaz incondensables

Ils contiennent :

- du dioxyde de carbone,
- des gaz toxiques tels que monoxyde de carbone,
- des hydrocarbures (méthane, éthane, éthylène, acétylène, propane, isobutane, butène...),
- de l'hydrogène.

A l'exception de l'hydrogène, tous ces composés correspondent à des gaz dont la contribution à l'effet de serre est admise.

En ce qui concerne les oxydes d'azote, une mesure effectuée par le C.T.F.T. et le L.N.E.\* sur site industriel de carbonisation a mis en évidence des quantités extrêmement faibles (proches du seuil de détection).

Le bois et la biomasse ne contenant que très rarement du soufre, des gaz toxiques tels que les oxydes de soufre ne devraient pas être présents dans les rejets.

## Les composés organiques condensables ou pyroli-gneux

En fonction de la température d'émission des effluents et de la tension de vapeur saturante respective des composés émis, ces produits sont rejetés sous forme de vapeur ou sous forme d'aérosols.

Condensés, ils se présentent sous la forme d'un liquide hétérogène qui peut être séparé en deux phases :

● **Une phase aqueuse** contenant essentiellement de l'eau d'humidité et de l'eau de formation qui est également fortement chargée en acides organiques, alcools et autres produits volatils (5). La nature de ces produits est aujourd'hui bien connue.

● **Une phase organique ou goudrons**, plus ou moins visqueuse. Les goudrons de pyrolyse ont également fait l'objet d'un certain nombre de recherches qui ont permis l'identification de familles de composés bien particuliers (5) (6) (7) :

- hydrocarbures linéaires saturés et insaturés,
- hydrocarbures aromatiques polycondensés ou H.A.P.,
- cétones et lactones cycliques,
- composés phénoliques substitués,
- composés furfuryliques,
- bases azotées.

Les travaux réalisés conjointement par le C.T.F.T. et l'Université de Paris VI ont permis d'identifier dans les goudrons plus de 400 composés, dont plus de 40 H.A.P. \* et une cinquantaine de bases azotées (6).

Notons que ces travaux ne permettent pas d'apprécier les quantités et donc l'impact réel de chaque constituant.

Le tableau I présente les composés organiques majoritaires de la fraction condensable des effluents de pyrolyse.

\* L.N.E. : Laboratoire National d'Essais.

\* H.A.P. : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

**TABLEAU I**  
**Principaux composés organiques**  
**de la fraction condensable des effluents de pyrolyse**

Alcools	Méthanol, éthanol...
Cétones ou lactones	Acétone, méthyléthylcétone, pentanone 2, hepténone, octénone...
Acides	Formique, acétique, butyrique, propionique, valérique, tiglique, acrylique...
Composés furfuryliques	Furfural, méthyl 5-furfural, alcool furfurylique...
Composés phénoliques	Phénol, crésol, gaïacol, diméthoxyphénol, diméthyl-phénol, méthylpropylphénol, buténylphénol...
Hydrocarbures linéaires ou insaturés	Hexatriène, tridécanne, dipropyldodécane, hexadécane, méthylheptadécane, pentadécane...
Hydrocarbures cycliques	Propylcyclopentane, propylcyclopentène, éthylcyclopentène...
Hydrocarbures aromatiques	Naphtalène, fluorène, pyrène, fluoranthène, anthracène, acéanthrylène, benzène, toluène, éthylbenzène. Benzo (b) fluoranthène, Benzo (k) pyrène, Méthyl 1 fluorène, benzo (a) anthracène, Chrysène...
Bases azotées	● Méthoxyypyridine, éthanolpyridine, propyl-2 méthylpyridine, butylpyridine... ● Méthyléthylpyrazine, méthoxybutylpyrazine, ● Diméthoxy pipérimidine, diméthoxyéthylpipérimidine... ● Tétrahydroquinoléine, méthyltétrahydroquinoléine... ● Méthylpurine, diméthylpurine, propylpurine, méthylpropylpurine...

## ASPECT QUANTITATIF : CONCENTRATION DES POLLUANTS ET FACTEURS D'ÉMISSIONS

Actuellement, l'essentiel de la production de charbon de bois dans le monde comme en Europe est assuré par des procédés à combustion partielle, rarement équipés de système de traitement des effluents. Les gaz et liquides de pyrolyse, qui représentent 70 à 80 % de la masse du bois et 50 % de l'énergie initiale, sont alors rejetés en totalité à l'atmosphère sans traitement ni valorisation préalable. La carbonisation est, de ce fait, à l'origine d'une pollution atmosphérique notable.

Devant le peu de données chiffrées disponibles en 1986 sur la quantification de ces rejets, les pouvoirs publics (Ministère Français de l'Environnement, Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie) ont chargé le C.T.F.T., en collaboration avec le CITEPA\*, le L.N.E. et l'E.D.F.\*\*, de qualifier et quantifier les rejets atmosphériques liés à l'activité de pyrolyse et de contrôler divers systèmes de traitement des fumées (13) (14) (15).

Dans ce but, une ligne de prélèvements appropriée a été mise au point et expérimentée sur plusieurs sites industriels.

Diverses séries de mesures sur sites ont pu être réalisées par le C.T.F.T. en collaboration avec le L.N.E., avec les objectifs suivants :

- Etudes cinétiques d'émissions de polluants.
- Evaluation des concentrations des rejets et des facteurs d'émission en fonction de la nature du bois.
- Détermination des caractéristiques thermiques des fumées en vue de leur valorisation.
- Contrôle des performances de différents systèmes de traitement des effluents.

Ces mesures ont porté sur différents types de procédés pyrolytiques :

- système artisanal à combustion partielle,
- système industriel à contact de gaz chaud,
- procédé de torréfaction.

### Méthodologie

#### Prélèvements

La qualification des émissions nécessite de prélever un échantillon représentatif de l'effluent à caractériser. Cet échantillonnage doit respecter la loi de l'isocinétisme pour refléter la concentration réelle des particules et des polluants dans les fumées.

Etant donné la nature particulière des effluents de pyrolyse caractérisée par une teneur élevée en eau et en produits condensables, ainsi qu'une concentration importante en goudrons, la métrologie des rejets pondéraux définie par les normes AFNOR X43-003 et X44-052 n'a pu être mise en œuvre. Une ligne d'échantillon-

nage spécifique aux effluents de pyrolyse a été conçue conjointement par le C.T.F.T. et le L.N.E. (16) (17).

Elle permet de :

- mesurer avec précision la vitesse des effluents dans la cheminée et respecter les conditions de l'isocinétisme pendant le prélèvement,
- suivre la totalité d'un cycle (dans le cas d'un système discontinu) par des prélèvements suffisamment longs pour être représentatifs (prélèvements en continu de produits condensables et prélèvements séquentiels de gaz),
- séparer les condensats de la fraction gazeuse et quantifier leurs proportions respectives dans l'effluent,
- piéger la totalité des goudrons en amont du filtre, en vue de leur quantification ultérieure,
- suivre en divers points de la ligne, et à tout moment, des paramètres tels que pression, température.

### Analyses

Les gaz et condensats sont ensuite analysés en différé par chromatographie au Laboratoire de Chimie du C.T.F.T. (5).

La chaîne d'échantillonnage ne permet pas d'isoler les particules et les poussières qui restent englobées dans le goudron.

### Résultats expérimentaux

#### Cinétique d'apparition des polluants

Les figures 1 et 2 ci-contre font apparaître l'évolution de la composition des fractions incondensables et condensables des émissions d'un four à combustion partielle (capacité 2 m<sup>3</sup>), en fonction du temps.

Ces émissions varient au cours du cycle en fonction de la température moyenne de pyrolyse (variation de la composition, du débit d'émissions, ...) (13). On ne peut cependant pas établir une loi générale de cinétique d'apparition des produits, les émissions étant, entre autres, fonction du type de four et de la conduite de la pyrolyse. Notons tout de même que l'émission maximale a lieu pendant la phase exothermique correspondant à la phase où le bois subit de profondes transformations.

#### Concentration des rejets et facteurs d'émission

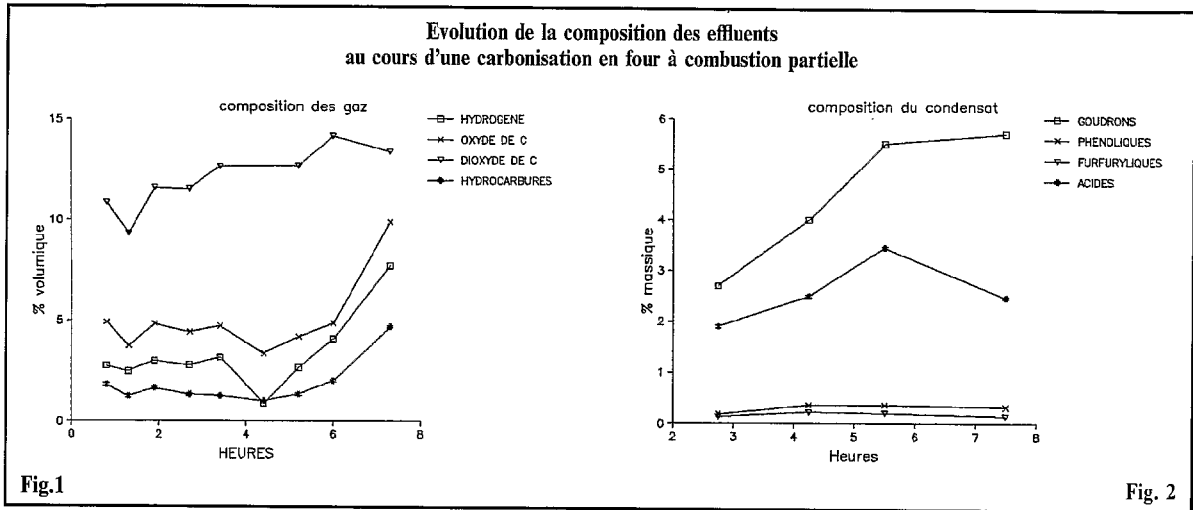
##### *Influence de la matière première pyrolysée*

Le tableau II, p. 73, présente les caractéristiques des émissions d'un four à combustion partielle pour deux essences différentes (un feuillu : le chêne, un résineux : l'épicéa).

Ces résultats mettent bien en évidence l'influence de l'essence pyrolysée sur la nature des effluents : la pyrolyse de l'épicéa favorise la formation d'hydrocarbures et de goudrons tandis que la pyrolyse du chêne favorise plutôt l'émission de composés acides.

\* CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique.

\*\* E.D.F. : Electricité de France.



*Evolution of the effluent composition during a carbonization in a partial combustion kiln*

**TABLEAU II**

**Caractéristiques des rejets de four à combustion partielle  
en fonction de l'essence carbonisée**

	CHÊNE			ÉPICÉA		
	g/Nm <sup>3</sup>	kg/t bois anhydre	kg/t de charbon	g/Nm <sup>3</sup>	kg/t bois anhydre	kg/t de charbon
<b>Produits gazeux</b>						
CO	60	122	350	40	110	380
CO <sub>2</sub>	190	383	1 100	151	412	1 425
H <sub>2</sub>	2,5	5,1	14,6	1,7	4,7	16,5
Hydrocarbures	11,3	23,2	66,3	8,7	24,0	83,3
<b>Produits condensables</b>						
Masse totale des composés organiques	56	110	330	36	105	350
dont :						
Goudrons	17,0	34,5	99	13	33,6	116
Composés phénoliques	1,0	1,9	5,5	0,8	2,0	6,8
Composés furfuryliques	0,7	1,4	4,0	0,5	1,3	4,3
Acides	14,0	28,6	81,5	5,3	20,4	70
Composés légers	5,0	10,2	29	2,4	6,3	22

**Influence du procédé de pyrolyse**

Le tableau III, p. 74, présente les caractéristiques des rejets émis par différents types de procédés de pyrolyse, contrôlés par le C.T.F.T.

Il apparaît que les procédés à combustion partielle génèrent davantage de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone et d'hydrocarbures que les systèmes cornue et les procédés à contact de gaz chauds, au détriment des polluants condensables qui sont partiellement crackés dans les zones de combustion.

Des 3 types de procédés c'est le système cornue qui génère le plus de polluants condensables. Les quantités observées pour les 2 autres procédés sont plus faibles et voisines.

Quel que soit le procédé mis en œuvre, il apparaît clairement que la pyrolyse est une activité qui génère des quantités importantes de composés polluants ; ceux-ci se classent, comme suit, par ordre décroissant de facteur d'émission (tableau IV, p. 75) :

TABLEAU III

Caractéristiques des rejets de différents procédés de pyrolyse

PROCÉDÉS	Combustion partielle (moyenne sur 10 essais)			Four cornue de laboratoire						Four industriel à contact de gaz chaud			Torréfaction		
	31			28			35			30			91		
	Pyrolyse rapide (a)			Pyrolyse lente (b)											
Rendement charbon de bois (%)	31			28			35			30			91		
Concentration et facteurs d'émission	g/Nm <sup>3</sup> fumée	kg/t bois anhydre	kg/t de charbon	g/Nm <sup>3</sup> fumée	kg/t de bois anhydre	kg/t de charbon	g/Nm <sup>3</sup> fumée	kg/t bois anhydre	kg/t de charbon	g/Nm <sup>3</sup> fumée	kg/t bois anhydre	kg/t de charbon	g/Nm <sup>3</sup> fumée	kg/t bois anhydre	kg/t bois torréfié
	48	100	318	95	68	239	70	49	139	95	66	220	15	14	15
	162	345	1 105	147	106	371	186	130	372	205	143	477	135	121	132
	2	4	14	2	2	6	2	2	4	6	4	13	—	—	—
H <sub>2</sub>	11	21	67	29	21	72	29	20	57	28	19	65	1	1	1
Hydrocarbures	223	470	1 504	273	191	688	287	201	572	334	232	775	151	136	148
Total															
<b>Produits condensables</b>															
Masse totale des composés organiques dont :	51	97	310	311	224	784	206	145	394	110	76	255	95	81	88
Goudrons	19	35	112	103	75	260	107	75	215	39	27	90	4	3	3
Composés phénoliques	1	2	6	5	4	13	5	4	11	2	2	6	4	4	4
Composés furfuryliques	1	1	4	8	5	19	12	9	24	2	1	5	2	2	2
Acides	9	19	60	74	54	187	53	37	107	30	21	70	61	52	56
Composés légers	4	7	23	13	10	33	20	14	39	2	1	5	8	7	8

(a) : Pyrolyse lente : 1,5 à 2,5 °C (≈ par minute pyrolyse industrielle).

(b) : Pyrolyse rapide : 4,5 °C par minute.



**TABLEAU IV**

**Classement des principaux composés émis**

Composés émis	Facteur d'émission kg/t de charbon		
CO <sub>2</sub>	370	à	1 100
CO	140	à	320
Goudrons	100	à	260
Acides	60	à	180
Hydrocarbures	50	à	70
Composés phénoliques	6	à	13
Composés furfuryliques	4	à	25
Hydrogène	4	à	15

D'autres composés présents en quantité trop faible ne peuvent être détectés et quantifiés par les techniques analytiques habituellement mises en œuvre par le C.T.F.T. (5). L'analyse des H.A.P. les plus représentées est actuellement en cours de mise au point au C.T.F.T.

Une première mesure de H.A.P. réalisée à l'occasion d'une série d'essais sur four à combustion partielle, avec le concours de l'Université Paris VII, a permis d'évaluer

la concentration de cette famille de polluants à 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Le facteur d'émission atteindrait donc 1,35 kg/t de charbon produit, ce qui est très élevé compte tenu de la toxicité de ces produits (cf. chapitre ci-dessous).

En ce qui concerne les **bases azotées**, aucune mesure directe sur effluent n'a encore été mise en œuvre. Cependant, d'après ESSAYEGH (6), cette famille représenterait 2,4 % des goudrons. En s'appuyant sur les résultats du tableau III pour la combustion partielle, on peut par extrapolation estimer les facteurs d'émissions des bases azotées à 0,8 kg/t de bois anhydre pyrolysé et 2,7 kg/t de charbon produit (même remarque que pour les H.A.P.).

Les ordres de grandeur avancés pour les H.A.P. et les bases azotées sont à considérer avec une extrême prudence étant donné que ces deux familles n'ont pas fait l'objet de mesures répétitives. Des contrôles complémentaires sont absolument nécessaires pour quantifier avec plus d'assurance ces deux groupes de composés toxiques.

**Cas particulier de la torréfaction**

Bien que dans les procédés de torréfaction du bois la température ne dépasse pas seulement 280 °C, ce type de transformation thermo-chimique, actuellement en développement, génère des quantités notables de composés acides (56 kg/t de bois torréfié produit) et de composés phénoliques (4 kg/t de bois torréfié).

**TOXICITÉ DES PRODUITS DE PYROLYSE**

C'est surtout dans le domaine de la pollution atmosphérique que les effluents ont un impact important. Comparativement, la pollution des eaux et des sols est minime et ne sera pas traitée dans ce document.

Les effets sur l'organisme et les dommages causés à l'homme vont être fonction de la concentration en polluants et de leur toxicité.

Différentes études ont montré la toxicité des produits contenus dans les fumées de pyrolyse et notamment dans la fraction lourde des goudrons (18) (19).

Dans les composés gazeux à fort facteur d'émission seul le monoxyde de carbone est particulièrement toxique.

Dans la fraction condensable, on note une fraction acide importante avec prédominance des acides acétique, formique et propionique et le groupe des phénols toxiques, faiblement biodégradables.

La toxicité maximale des produits de la pyrolyse se situe incontestablement parmi les hydrocarbures aromatiques polycycliques (H.A.P.) et les bases azotées des goudrons qui présentent une activité mutagène et carcinogène importante. Une activité mutagénique importante a en effet été décelée dans des goudrons de charbon

et attribuée à la présence d'amines aromatiques primaires ; de même, une activité carcinogène y a été détectée et attribuée aux dérivés polycycliques azotés (azaarènes) présents dans ces goudrons (20) (21) (22).

La classification établie par KELSEY (18) sur les 671 polluants organiques mis en évidence dans l'air, et présents dans les données du EMIC (Environmental Mutagen Information Center), retient quatre grands groupes, dans lesquels se répartissent 77 composés biologiquement actifs.

- Les produits reconnus carcinogènes.
- Les produits carcinogènes probables.
- Les produits favorisant l'apparition de tumeur ou cocarcinogènes.
- Les produits mutagènes.

671 Polluants atmosphériques			
77 Biologiquement actifs			
Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Reconnus carcinogènes	Carcinogènes probables	Cocarcinogènes tumeur favorisée	Mutagènes
25	20	15	50

Parmi les différents composés identifiés par ESSAYEGH dans les goudrons de pyrolyse : 7 font partie du groupe 1, 2 sont du groupe 2, 9 dont les phénols appartenant au groupe 3 et 12 autres sont fichés dans le groupe 4.

C'est-à-dire que 30 des 77 composés chimiques polluants présents dans l'atmosphère et reconnus comme biologiquement actifs ont été trouvés dans les goudrons de pyrolyse. Dans le cas de technologies ne traitant pas les fumées (carbonisation artisanale ou semi-industrielle), ces produits sont rejetés à l'atmosphère avec les fumées.

Parmi les 379 composés chimiques identifiés par ESSAYEGH, dont 49 bases azotées, plusieurs n'ont pas été répertoriés par KALSEY. Ils pourraient cependant s'avérer toxiques dans les environs immédiats des unités de carbonisation.

Faute d'informations sur la biodégradabilité des produits issus de la carbonisation et les possibilités de recombinaison sous l'action des U.V. de l'atmosphère, il n'est pas aujourd'hui possible de donner un avis sur l'évolution dans le temps de leur impact.

Les contrôles effectués par le C.T.F.T. selon la norme française sur différents procédés de carbonisation n'ont pas permis de réaliser des mesures spécifiques des pou-

sières, puisque dans les fumées ces éléments forment des agglomérats avec les goudrons.

Plusieurs travaux ont été réalisés aux Etats-Unis (23) (24) (25) (26) sur les émissions de poussières dues à la combustion du bois. Pour le chauffage domestique, il ressort que :

- Le volume d'émission croît lorsque le rendement du foyer chute, par suite d'une mauvaise combustion : on se rapproche alors des conditions de pyrolyse.

- La taille des particules est très faible, 0,17  $\mu$  de diamètre moyen, ce qui favorise leur dissémination et les rend respirables.

- Ces particules sont à l'origine d'une augmentation d'infections pulmonaires dans les régions fortement utilisatrices de bois-énergie.

Il est probable que les technologies de pyrolyse sont susceptibles d'effets voisins sur l'environnement.

De plus, la fraction particulaire des fumées de carbonisation véhicule des goudrons. Ce phénomène devrait accroître leur toxicité en favorisant notamment la dissémination des H.A.P. et des bases azotées. Des travaux de recherche seraient à réaliser dans ce domaine.

## RÉGLEMENTATION

### En France

La carbonisation est une activité réglementée au titre des établissements classés (Rubrique 104 : carbonisation du bois autrement qu'en meules et en forêt).

- S'il y a dégagement dans l'air des produits de la pyrolyse, l'autorisation est nécessaire.

- S'il n'y a pas dégagement dans l'air des produits de la pyrolyse, une déclaration suffit. Les établissements réalisant une incinération des gaz de pyrolyse relèvent de la rubrique 153 bis : installation de combustion.

A titre d'information, nous indiquons ci-après les règles générales relevées dans quelques arrêtés ou projets d'arrêtés préfectoraux (15) :

- L'émission de fumées, buées, poussières, gaz odorants, ... toxiques est interdite.

- Les émissions gazeuses doivent être captées et canalisées.

- Les émissions diffuses doivent être évitées.

- Des campagnes de mesures de polluants émis pourraient être exigées (elles sont à la charge de l'exploitant). L'installation doit être équipée des dispositifs prévus à cet effet (emplacements et orifices de mesures normalisés).

Des règles particulières peuvent compléter ces spécifications.

### A l'Étranger

On dispose de peu d'informations sur la nature de la réglementation concernant les installations de carbonisation dans le monde. Il semble que cette activité ne soit pas systématiquement réglementée au niveau national de chaque Etat, ce qui n'exclut pas des dispositions locales propres à certaines unités de production. Ce type d'activités peut, par ailleurs, être rattaché à une réglementation régissant d'autres types d'installations (comme les installations thermiques, par exemple).

La plupart des gros pays producteurs (Brésil, Thaïlande, Philippines, Côte-d'Ivoire, Sénégal...) n'ont en général pas de législation particulière ou, quand il en existe (Thaïlande, par exemple), elle n'est pas appliquée.

L'Allemagne et la Suède, dont la production est essentiellement assurée par un gros producteur, n'ont pas mis en place de réglementation nationale spécifique.

Aux Etats-Unis, il n'existe pas de normes d'émissions spécifiques pour les installations nouvelles et les installations anciennes subissant des modifications majeures, bien que le principe ait été envisagé. Les unités de production de charbon de bois sont généralement concernées par des règles prises dans le cadre du contrôle de la qualité de l'air par région. Ces règles concernent plus particulièrement l'émission de poussières, l'opacité et parfois le monoxyde de carbone.

# TRAITEMENT DES FUMÉES DE PYROLYSE : DÉPOLLUTION ET VALORISATION

Les principales difficultés à résoudre sont d'ordre :

- Technique tout d'abord, puisqu'il convient de canaliser les émissions et d'obtenir une épuration satisfaisante vis-à-vis de composés aussi divers que les poussières, les gaz, les hydrocarbures, etc. tout en valorisant au maximum le potentiel énergétique ou chimique de ces composés.

- Economique ensuite, puisque le surcoût d'investissement consenti pour l'installation d'équipements de traitement des fumées doit être compatible avec la capacité financière des projets (le problème se pose tout particulièrement dans le cas de la carbonisation artisanale ou semi-industrielle). Cependant, la mise au point de systèmes rationnels de traitement de fumée avec récupération d'énergie permet d'améliorer les rendements de conversion. La mise en place d'équipements de dépollution améliore alors la rentabilité économique de l'entreprise.

Plusieurs voies sont actuellement envisageables pour le traitement et la valorisation des fumées de pyrolyse.

## LA CONDENSATION

C'est une voie qui est retenue lorsqu'il existe une possibilité d'utilisation rationnelle et économique des condensats. Elle a été largement utilisée à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup> pour la production par distillation de méthanol et d'acide acétique. Trois exemples de procédés en activité ou en cours de développement illustrent la situation actuelle :

### LAMBIOTTE/SIFIC

Deux fours d'une capacité unitaire de 10 000 tonnes/an de charbon de bois sont en fonctionnement dans la Nièvre (France). Les pyroligneux sont condensés, puis distillés. Du fait de la concurrence de la pétrochimie, la rentabilité de cette unité repose d'une part sur la production de charbon de bois (qui était à l'origine un sous-produit) et, d'autre part, sur l'obtention de produits à haute valeur ajoutée, tels des arômes. Les gaz sont brûlés pour fournir l'énergie nécessaire au séchage du bois et entretenir la pyrolyse.

### ALTEN/KTI

Dans le cadre des projets LEBEN<sup>(1)</sup>, un pilote industriel d'une capacité de 600 kg/h a été installé à RAIANO dans la région des Abruzzes (Italie). L'objectif est triple :

- Produire à partir de biomasse ligneuse très fragmentée un charbon végétal susceptible d'être utilisé en chaudière.

- Condenser partiellement la fraction pyroligneuse pour récupérer les goudrons utilisables comme un fuel lourd.

- Recycler la fraction légère et les incondensables dans le process pour fournir l'énergie nécessaire au séchage de la matière première et générer de l'électricité sur le site si l'on dispose d'un excédent d'énergie. Cette technologie est en cours de développement.

### BIO-ALTERNATIVE

Les goudrons sont condensés et utilisés comme fuel lourd. Les gaz et le reste de la fraction condensable sont incinérés. L'énergie est recyclée. Une première unité industrielle a été installée en Espagne. Nous ne disposons pas des éléments qui permettraient de juger de son efficacité.

D'autres solutions basées sur le principe de la condensation sont envisageables :

### Voie biologique

Dans le cas du traitement par condensation partielle ou totale des fumées de pyrolyse et en l'absence de valorisation des condensats (énergétiques ou chimiques) ou d'une fraction des condensats (phase aqueuse), l'épuration par voie biologique est actuellement proposée par quelques sociétés.

C'est la solution qui a été envisagée par la S.L.B.E. (Société Languedocienne de Bois Energie) qui produit du bois torréfié. Le traitement s'effectuerait en deux phases :

- une phase de condensation,
- une épuration par voie biologique basée sur le procédé biologique avec équilibre nutritionnel.

### Electrofiltration

Le C.T.F.T. en a expérimenté le principe. La technologie testée est constituée d'un précipitateur électrostatique à voie humide reposant sur le principe d'une décharge couronne appliquée sur un film d'eau. Une différence de potentiel de 12 à 13 kv est appliquée entre l'électrode ionisante et le liquide qui circule en circuit fermé dans le filtre. Le liquide se charge progressivement en polluants contenus dans les gaz. On concentre ainsi les polluants qui sont alors plus faciles à traiter ou à récupérer.

La série d'essais réalisée a mis en évidence que l'efficacité de l'épuration peut atteindre 94 % sur les goudrons, 34 % sur les composés légers, 56 % sur les acides, 84 % sur les phénoliques, 68 % sur les furfuryliques. L'efficacité totale (eau comprise) était de 66 %.

(1) LEBEN : LARGE EUROPEAN BIOMASS ENERGY, projets supportés par la C.E.E.

Le C.T.F.T. envisage de travailler sur une meilleure définition de la source haute tension afin d'adapter la puissance et le signal aux produits à traiter. Cette technologie offre de réelles perspectives pour le traitement des effluents de pyrolyse et l'épuration des gaz de gazéification avant moteur. L'électrofiltre doit être testé dans ce sens.

### L'INCINÉRATION

Les vapeurs de pyrolyse présentent un pouvoir calorifique supérieur au seuil de combustibilité.

Les gaz seuls, et a fortiori les vapeurs qui sont enrichies par les goudrons et pyrolygneux (qui représentent 40 à 50 % de l'énergie potentielle des fumées dans le cas de la carbonisation), peuvent alimenter un système générateur de chaleur.

Cette solution permet d'augmenter significativement le rendement énergétique de la conversion si l'énergie produite est utilisable dans le process. C'est le cas le plus fréquent pour les technologies industrielles de pyrolyse : FRAMATOME/PROSER/CEMAGREF, LAMBIOTTE/CISR, ALTEN/KTI, CARBONOR, CARBOLISI...

En ce qui concerne les procédés discontinus fonctionnant en batch, il est possible de coupler plusieurs réacteurs en fonctionnement décalé afin de pallier les variations de qualité des fumées. C'est la solution retenue par la Société CARBONOR pour traiter et valoriser les fumées de carbonisation de four métallique à combustion partielle. Sur ce procédé expertisé par le C.T.F.T., une partie de la chaleur est récupérée pour le séchage du bois avant carbonisation et une part importante de l'énergie reste disponible pour une autre spéculation (séchage de bois d'œuvre...). Les résultats de l'épuration (27) sont donnés dans le tableau V.

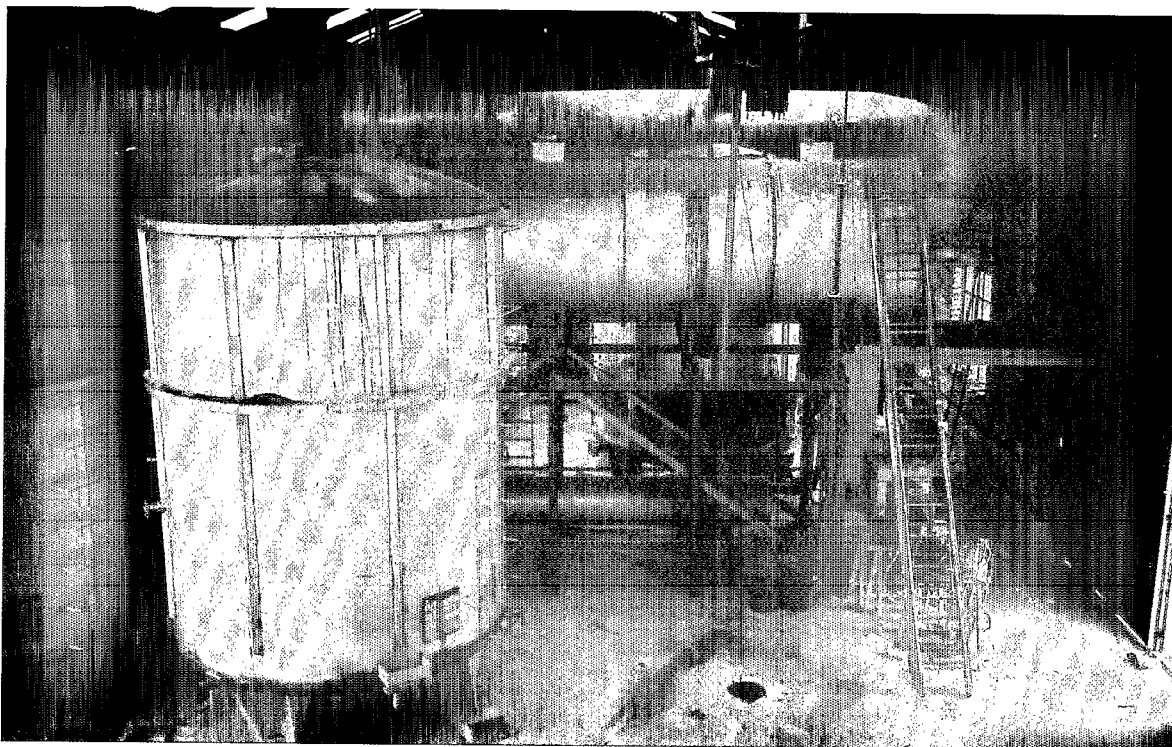
Ces résultats mettent en évidence la très bonne efficacité du traitement des vapeurs de pyrolyse par incinération. De plus, la disponibilité d'une quantité importante d'énergie valorisable permet d'amortir, dans de bonnes conditions, les investissements de dépollution consentis.

Le traitement thermique des effluents de pyrolyse demeure actuellement la voie de dépollution la plus efficace. C'est pour le moment la solution adoptée par la plupart des nouvelles installations de pyrolyse.

TABLEAU V

#### Epuration par incinération

Niveau de prélèvement	Avant incinération	Après incinération
Concentration pondérale (mg/Nm <sup>3</sup> ) (goudrons + poussières)	50 000	2
Débit volumétrique moyen (Nm <sup>3</sup> /h)	550	1 700
Température moyenne (°C)	90	430
Teneur des gaz en CO (%)	3	—
Teneur des gaz en CO <sub>2</sub> (%)	5	6
Teneur des gaz en O <sub>2</sub> (%)	15	15
Teneur des gaz en NOx (ppm)	—	40-55
Hydrocarbures totaux (ppm)	12 000	20-30



**Installation de carbonisation avec incinération de fumées.**  
*Batch process with effluent incineration and heat recovery.*

## CONCLUSION

Les résultats précédents mettent en évidence le caractère polluant de la pyrolyse de la biomasse et montrent comment le développement de technologies n'intégrant pas l'aspect environnemental pourrait pérenniser des problèmes de pollution atmosphérique non négligeables. Face à cette situation défavorable, des solutions technologiques existent.

Les enjeux du développement de technologies propres d'utilisation énergétique de la biomasse, matière première renouvelable, sont :

### D'ordre écologique

- A court terme, la biomasse constitue une source d'énergie propre dans la mesure où son utilisation, au moyen de technologies traitant les émissions, limitent les émissions de polluants et notamment de gaz à effet de serre.

### D'ordre économique

- A court terme, le traitement thermique des effluents de pyrolyse permet de récupérer une quantité importante

d'énergie qui peut par exemple être valorisée au sein même du procédé (séchage avant pyrolyse, initiation de la pyrolyse) permettant d'obtenir de meilleurs rendements de conversion.

- A moyen/long terme, dans le cas d'un accroissement des prix des produits pétroliers, et, dans l'hypothèse de l'intégration d'un coût de dépollution dans le prix des combustibles quels qu'ils soient (taxe à la tonne de CO<sub>2</sub> émise), la biomasse pourrait redevenir compétitive par rapport aux combustibles pétroliers en Europe. ■

---

### REMERCIEMENTS

*Les auteurs remercient l'A.D.E.M.E. pour son aide financière qui a permis la réalisation d'une grande partie des études dont les résultats sont présentés dans le présent document.*

*Ils tiennent également à remercier le L.N.E. pour sa collaboration fructueuse à l'ensemble des campagnes de mesures d'effluents qui sont mentionnées.*

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) GIRARD (Ph.), 1989. — Environmental problems in the use of biomass fuels. Global and local aspects. International Conference « Pyrolysis and Gasification », 23-25 mai 1989, Luxembourg.
- (2) DEGLISE (X.), 1982. — Les conversions thermo-chimiques du bois. *Revue Forestière Française*, 34 (4), 249.
- (3) SHAFIZADEH (F.), 1968. — Pyrolysis and combustion of cellulosic materials. *Advance in carbohydrates Chemistry*, 23, 419-474.
- (4) MILNE (A. J.), SOLTYS (M. N.), 1983. — *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 5, 111-131.
- (5) VILLENEUVE (F.), VERGNET (A. M.), 1983. — Techniques analytiques applicables aux liquides et aux gaz de pyrolyse de la biomasse tropicale. *Cahier scientifique n° 9*. Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne (France), 174 p.
- (6) ESSAYEGH (M.), 1988. — Etude analytique des jus pyrolygneux. Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- (7) BEAUMONT (O.), 1981. — Pyrolyse extractive du bois. Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> cycle. Ecole Normale Supérieure des Mines de Paris.
- (8) BLONDET (M.), 1986. — Cinétique d'apparition des composés pyrolygneux au cours de la carbonisation (mémoire de fin d'étude). Centre Technique Forestier Tropical, Nogent-sur-Marne (France).
- (9) ANTAL (M. J.), MOK (W. S. L.), WARMEGIL (G.) et SZEKELY (T.), 1990. — A review of methods for improving the yield of charcoal from biomass (personal communication). University of Hawaii.
- (10) SHAH (N.), 1990. — Carbonisation discontinue du bois en four à combustion partielle. Contribution à la connaissance des phénomènes et recherche d'une méthode de gestion (thèse de doctorat). Université Technologique de Compiègne (France).
- (11) BRIANE (D.), DOAT (J.), 1985. — Guide Technique de la Carbonisation. Ed. Edisud. Aix-en-Provence (France).
- (12) DEGLISE (X.), MAGNE (P.), 1983. — Mécanismes fondamentaux de la gazéification. *Biomasse Actualités*, Numéro spécial, N° 5.
- (13) MEYER (C.), 1986. — Détermination des rejets atmosphériques lors de la carbonisation par combustion partielle (mémoire de fin d'études). Centre Technique Forestier Tropical, 50 p. + annexes. Nogent-sur-Marne (France).
- (14) GIRARD (Ph.), MEYER (C.), FONTELLE (J.-P.), BOILLOT (M.), 1987. — Caractérisation des émissions de carbonisation en four à combustion partielle. Mise au point de systèmes de traitement des fumées de carbonisation. IV<sup>e</sup> Conférence Européenne. « Application de la Biomasse pour l'Energie et l'Industrie », 11-15 mai 1987, Orléans (France).
- (15) CITEPA, 1986. — Carbonisation du bois et pollution atmosphérique (monographie), Paris.
- (16) LACHENAL (J.), MEZERETTE (C.), VERGNET (A.-M.), TOLEDO (J. M.), 1989. — Implementation of a technique for particle and gaseous sampling in effluents from pyrolysis in a metallic kiln. International Conference « Pyrolysis and gasification », 23-25 mai 1989, Luxembourg.
- (17) MEZERETTE (C.), GIRARD (P.), 1991. — Gaseous emissions from carbonization and pyrolysis processes, Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilisation. Edited by A.V. Bridgwater and G.Grassi, Elsevier Applied Science.
- (18) KELSEY (M. I.), KRAYBILL (H. F.), TUCKER (C.), 1981. — A data base of organic pollutants that have been evaluated for carcinogenicity and mutagenicity. International Conference on Residential Solid Fuels, Portland, Oregon. (U.S.A.).
- (19) KNOEF (H. A. M.), STASSEN (H. E. M.), HURSTAD (A.), VISSER (R.), 1987. — Environmental aspect of condensates from down draft biomass gasifiers. 4th E.C. Conference on biomass for energy and industry, Orléans (France).
- (20) HIRAO (K.), SHINOHARA (V.), TSUDA (H.), FUKUSHIMA (S.), TAKAMASHI (M.), ITO (N.), 1976. — *Cancer Res.* 36, 329-335.
- (21) DONG (M.), SCHMELTZ (I.), LAVOIE (E.), HOFFMAN (D.), 1978. — Carcinogenesis. A comprehensive survey. *Polynuclear Aromatic Hydrocarbons*, Raven press, New York, vol. 3, 97-108.
- (22) LEE (M. L.), NOVOTNY (M. W.), BARTLE (K. D.), 1981. — *Analytical Chemistry of Polycyclic Aromatic Compounds*. Academic Press. London, Appendix 5, 441-449.
- (23) MUHL BAIER (J. L.), 1981. — A characterization of emissions from wood burning fireplaces. International Conference on Residential Solid Fuels, Portland, Oregon, (U.S.A.).
- (24) HARPEA (J. P.), KNIGHT (L. V.), 1981. — Measurement of wood heater thermal and emissions performance. International Conference on Residential Solid Fuels, Portland, Oregon (U.S.A.), pp. 210-226.
- (25) BUTCHER (P. J.), ELLENBECKER (M. J.), 1981. — Particulate emission factors for small wood and coal stoves. International Conference on Residential Solid Fuels, Portland, Oregon (U.S.A.), pp. 289-303.
- (26) IMHOFF (R. E.), MANNING (J. A.), 1981. — Preliminary report on a study of the ambient impact of residential wood combustion in Peterville (Alabama). International Conference on Residential Solid Fuels, Portland, Oregon (U.S.A.), pp. 520-550.
- (27) GIRARD (Ph.), 1988. — Expertise de matériel de carbonisation, rapport A.F.M.E.-C.T.F.T., Nogent-sur-Marne (France).