

GAZÉIFICATION PAR PYROLYSE ÉCLAIR DE QUELQUES BOIS TROPICAUX

COMPARAISON ENTRE PYROLYSE RAPIDE ET PYROLYSE LENTE CLASSIQUE

Par

Jacqueline DOAT*

Division Cellulose - Chimie - Energie
CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL

et

Xavier DEGLISE*

Laboratoire de Photochimie Appliquée
UNIVERSITÉ DE NANCY I

SUMMARY

GASIFICATION OF SOME TROPICAL WOODS BY FLASH PYROLYSIS

Comparison between flash pyrolysis and conventional slow pyrolysis

Flash pyrolysis was carried out on a few tropical woods :

- afforestation species,
- heterogeneous mixtures having specific chemical composition (species with high lignin, extractives or carbohydrates contents)

Four temperatures were selected : 500, 700, 900 and 1000 °C.

As a reference, temperate woods, cellulose and lignin were tested under the same conditions. The results showed that high temperature favours gasification with a special increase of carbon monoxide and hydrocarbons.

The addition of water or catalysts improves the yields when the reaction takes place at high temperatures.

On the other hand, the results of gasification depend on the chemical composition of raw materials. An inverse correlation exists between lignin in wood and gas production.

Pure lignin is harder to gasify than pure cellulose.

Last, a comparison between slow pyrolysis (lasting 10 hours) and flash pyrolysis (lasting one second) shows that the former gives at 500° as much gas as the latter at 700°, but the volumic composition is different, the gas coming from slow pyrolysis having more CO₂ than CO. At high temperatures, however, flash pyrolysis give the best yields in gases and the worst yields in charcoal which may disappear almost completely.

* Avec la collaboration de Patrick BEAUCHESNE, Mireille POITET et Anne-Marie VERGNET (CTFT) et de Hubert FRANÇOIS, Claude RICHARD et André ROBLIN (Université de Nancy).

Etude partiellement financée par la DGRST.

GASIFICACION POR PIROLISIS RELAMPAGO DE ALGUNAS MADERAS TROPICALES COMPARACION ENTRE PIROLISIS RAPIDA Y PIROLISIS LENTA CONVENCIONAL

Se ha procedido a la pirólisis relámpago de maderas tropicales de distinto género : especies de repoblación, mezclas heterogéneas de composición química diversa (maderas ricas en Lignina, en extractos o en carbohidratos). Se ha operado con cuatro temperaturas de reacción : 500, 700, 900 y 1.000 °C. Comparativamente, y a título de referencia, se ha procedido al ensayo en las mismas condiciones en dos maderas europeas, de la celulosa y de la lignina.

Los resultados conseguidos han demostrado que un aumento de la temperatura favorece la gasificación aumentando de forma más acusada los contenidos en óxido de carbono y en hidrocarburos. La adición de agua y de catalizadores permite también mejorar los rendimientos cuando se opera con temperaturas elevadas.

La naturaleza de las materias primas que se trata de pirolizar tiene, además, cierta influencia respecto a la gasificación y se ha comprobado la existencia de una correlación inversa entre los porcentajes iniciales de lignina y las cantidades de gas formadas, ya que la lignina pura se gasifica con mucha mayor dificultad que la celulosa.

Finalmente, la comparación entre la pirólisis lenta convencional (duración total : 10 horas) y la pirólisis relámpago (duración de un segundo, aproximadamente), ha hecho resaltar que la primera permite producir a 500 °C tanto gas como la segunda a 700 °C, pero que la composición volumétrica de los gases es entonces diferente, ya que el gas de carbonización lenta contiene mayor proporción de CO₂ que de CO. No obstante, para las temperaturas elevadas, la pirólisis rápida permite conseguir mayores rendimientos gaseosos en detrimento del carbón, el cual llega incluso a desaparecer totalmente en ciertos casos.

INTRODUCTION

L'emploi de la biomasse (et plus particulièrement des bois) à des fins énergétiques en remplacement des produits pétroliers est toujours d'actualité. Différentes filières peuvent être suivies pour produire cette énergie à partir du bois.

Le Centre Technique Forestier Tropical, qui, comme de nombreux autres organismes, a déjà exploré plusieurs de ces filières (combustion, carbonisation, gazéification classique, etc...) s'est intéressé récemment avec l'Université de Nancy I, à la gazéification par la voie de la pyrolyse rapide. Un programme d'essais en commun a été entrepris, essais dont les résultats font l'objet de cet article.

Qu'entend-on par pyrolyse éclair ? Il s'agit de la gazéification qui se produit, en quelques fractions de secondes, lorsque l'on porte très rapidement du bois, finement fractionné, à température élevée.

Ce traitement diffère de la pyrolyse classique :

- par le flux thermique élevé : < 20 Watts/cm² au niveau de la particule de bois (pour les hautes températures),
- par la rapidité de la montée en température : environ 1.000 °C/sec,
- par la température de la réaction : > 500 °C,
- par la vitesse de la réaction limitée par le transfert thermique,
- par la granulométrie de l'échantillon.

ÉTUDE DE LA PYROLYSE ÉCLAIR

Chaque échantillon mis en sciure et séché à l'air, a été testé à 500-700-900 et 1.000°, sec à l'air et humidifié à 50 % d'eau.

Chaque prise d'essai correspondait à environ 0,1 gramme de produit sec. Dans chaque cas, on a déterminé les rendements à la gazéification (poids de gaz produits pour 100 g de bois initial anhydre) et les poids d'oxyde et de dioxyde de carbone, hydrogène, méthane,

éthylène, éthane et acétylène obtenus également pour 100 g de matière première comptée anhydre.

Dans le cas du Douglas et du Hêtre sec, on a chiffré les rendements pondéraux globaux en gaz, charbon, goudrons et eau afin d'estimer l'ensemble des réactions et d'avoir des éléments de comparaison avec la pyrolyse lente classique.

ECHANTILLONNAGE

L'échantillonnage testé était constitué de la façon suivante :

BOIS FRANÇAIS

- Hêtre (*Fagus sylvatica*).
- Pin Douglas (*Pinus*).
- Mélange à parties égales de : Peuplier (*Populus alba*), Hêtre (*Fagus sylvatica*), Bouleau (*Betula alba*), Chêne (*Quercus sp.*).

BOIS TROPICAUX

• Essences de reboisement :

- Gmelina (*Gmelina arborea*) de Côte-d'Ivoire,
- Eucalyptus (*E. saligna* × *tereticornis*) du Congo.

• Mélanges hétérogènes :

- Mélange à parties égales de 6 bois riches en lignine (Mél. T_1).
- Mélange à parties égales de 5 bois riches en extraits (Mél. T_2).
- Mélange à parties égales de 5 bois riches en carbohydrates (cellulose + pentosanes) (Mél. T_3).

PRODUITS DE RÉFÉRENCE

- Lignine préparée par insolubilisation sulfurique de bois tropicaux.
- Cellulose : coton ou pâte blanchie épurée.

TECHNIQUES SUIVIES

PYROLYSE ÉCLAIR

La pyrolyse rapide a été conduite dans un appareil construit à l'Université de Nancy I et comprenant un réacteur en quartz placé dans un four électrique vertical. Les expériences ont lieu sous vide ou sous pression réduite de gaz inerte. Une quantité connue de bois est introduite dans une coupelle placée au-dessus du four, dans la partie froide du réacteur. Après avoir réalisé le vide dans l'installation, on retourne la coupelle et le bois est projeté dans le réacteur réglé en température (varia-

ble de 500 à 1.000 °C pour différentes expériences). Dans ces conditions, la vitesse de chauffage est d'environ 1.000 °C/s et le temps de séjour de l'ordre de la seconde. Les gaz formés sont immédiatement trempés dans la partie froide du réacteur. Un manomètre à mercure ou un capteur de pression (Entran type EPG 400) permet de suivre l'évolution de la pression. Lorsque celle-ci se stabilise, le réacteur est mis en communication avec la rampe d'échantillonnage.

CARBONISATION CLASSIQUE

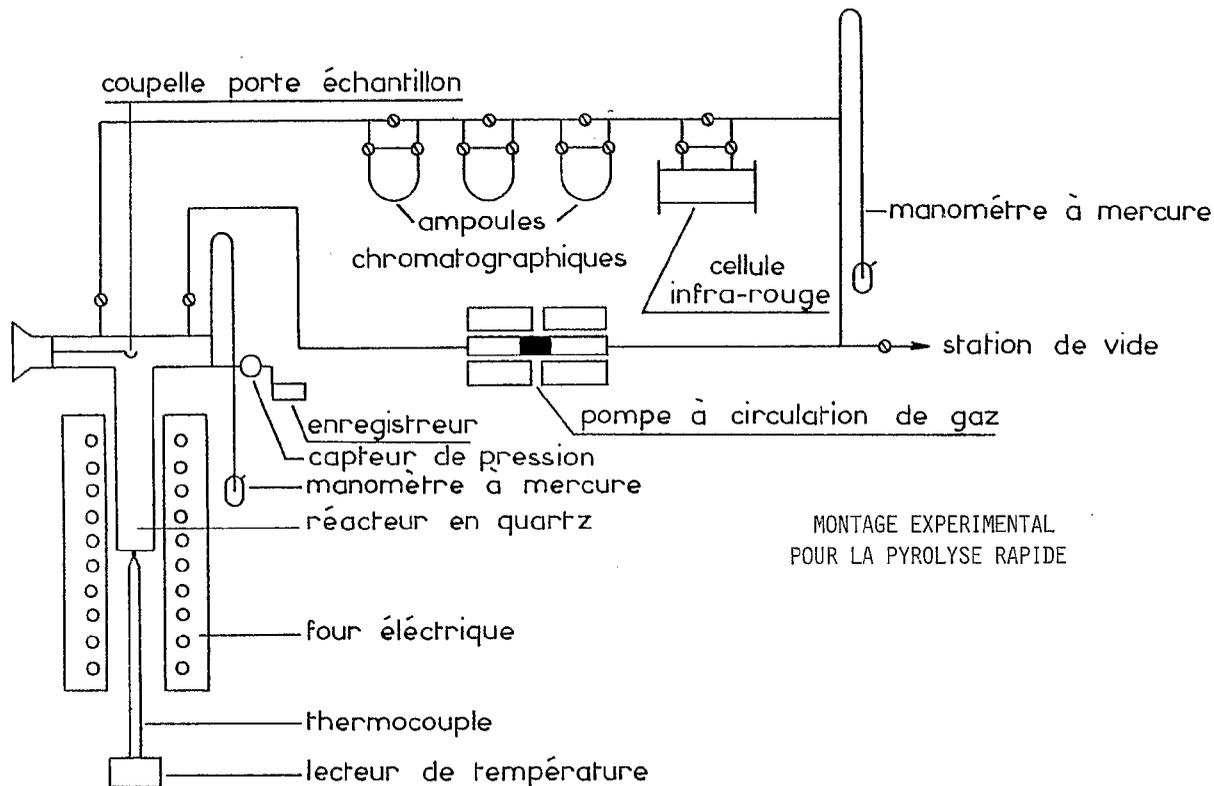
La pyrolyse lente a été effectuée au C.T.F.T. dans un four de laboratoire permettant de tester de petites quantités de bois (20 à 100 g) comprenant un obus de carbonisation pouvant être placé dans un four électrique dont la montée en température et la stabilité de la température du palier sont contrôlées électriquement. L'obus est muni d'un couvercle comportant une évacuation avec vanne, pour le passage des gaz et pyrolyseux, reliée à

un réfrigérant à eau. Un récipient permet la récupération des produits condensables, il est suivi par un filtre garni de fibres de verre pour l'élimination des goudrons qui pourraient être entraînés par les gaz. Ces derniers sont recueillis dans une poche en matière plastique, après avoir été mesurés à l'aide d'un compteur (voir schéma).

CARACTÉRISTIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES

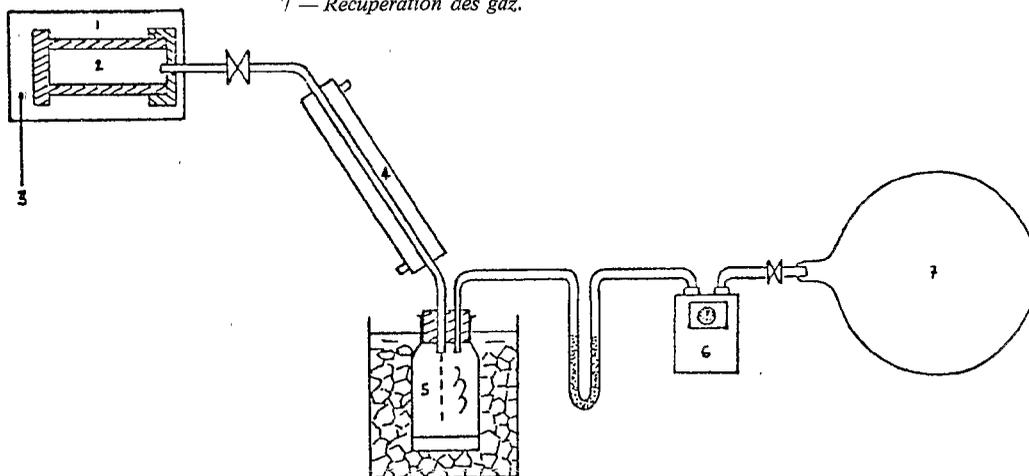
Le pouvoir calorifique supérieur des matières premiè-

res anhydres et leur composition chimique ont été déterminés au laboratoire.



Four de carbonisation de laboratoire pour pyrolyse lente.

- 1 — Four.
- 2 — Obus de carbonisation.
- 3 — Régulation de température.
- 4 — Réfrigérant.
- 5 — Récupération des pyroligneux.
- 6 — Compteur à gaz.
- 7 — Récupération des gaz.



POUVOIRS CALORIFIQUES (p.c.s. bois anhydres)

Bois français :		pentosanes	4.590 (cal/g) ou 19.210 (J/g)
Hêtre	4.665 (cal/g) ou 19.525 (J/g)	Produits de référence :	
Pin Douglas	4.775 (cal/g) ou 19.985 (J/g)	Lignine	6.100 (cal/g) ou 25.530 (J/g) (chiffre trouvé dans la littérature = 6.000)
Mélange feuillus	4.740 (cal/g) ou 19.840 (J/g)	Cellulose pure	4.070 (cal/g) ou 17.035 (J/g) (chiffre trouvé dans la littérature = 4.100)
Bois tropicaux :		Cellulose + pentosanes (pâte blanchie)	4.130 (cal/g) ou 17.285 (J/g)
Eucalyptus	4.820 (cal/g) ou 20.175 (J/g)		
Gmelina	4.840 (cal/g) ou 20.260 (J/g)		
Mél. T_1 riche en lignine	4.810 (cal/g) ou 20.130 (J/g)		
Mél. T_2 riche en extraits	5.015 (cal/g) ou 20.990 (J/g)		
Mél. T_3 riche en cellulose +			

COMPOSITION CHIMIQUE DES BOIS (% bois anhydres)

Echantillon	Ext. A.B. %	Ext. eau %	Lignine %	Cellulose %	Pentosanes %	Cendres %	Mannanes %
<i>Bois français :</i>							
Hêtre	1,5	2,2	25,4	41,6	25,7	1,2	—
Pin Douglas	3,05	4,15	26,5	45,9	9,3	0,15	8,55
Mél. feuillus	2,2	1,2	22,7	42,0	24,9	0,5	—
<i>Bois tropicaux :</i>							
Eucalyptus	1,5	0,9	31,6	44,5	16,5	0,3	—
Gmelina	3,9	0,5	25,1	48,1	16,2	0,9	—
Mél. T_1	0,9	2,9	35,3	42,8	13,5	1,0	—
Mél. T_2	16,6	0,5	26,6	37,0	13,7	0,9	—
Mél. T_3	2,5	2,8	23,5	40,7	22,0	2,7	—
<i>Produits de référence :</i>							
Lignine	—	—	100	0	—	—	—
Cellulose	—	—	0	100	—	—	—

RENDEMENTS PONDÉRAUX (voir graphiques I pour la moyenne des bois et tableaux I à IV)

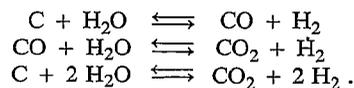
Rendements globaux à la gazéification.

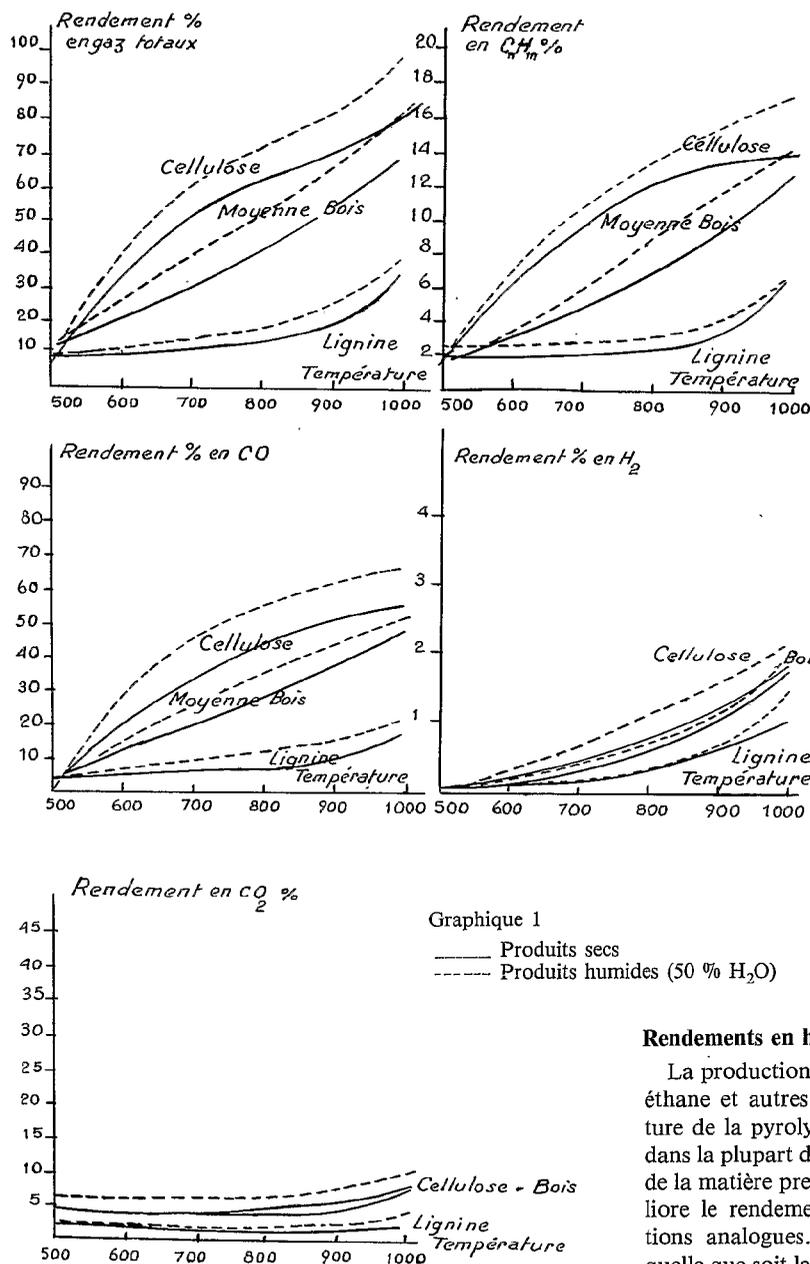
On remarque qu'une élévation de la température se traduit quelle que soit la matière première par une augmentation du rendement en gaz, qui très faible à 500° (autour de 10-15 %) s'élève à 1.000°, dans de nombreux cas, à plus de 80 % pour les bois et même à plus de 90 % pour la cellulose. La lignine se gazéifie plus difficilement.

Dans le cas du Douglas et du Hêtre sec où l'on a pu obtenir un bilan global, on a constaté également que le rendement en goudrons diminue avec la température de

façon moins importante que le rendement en charbon de bois, ce qui est un phénomène nouveau. Par contre, la quantité d'eau formée reste sensiblement constante à partir d'une température de 600°.

La présence d'eau améliore la gazéification, mais en l'absence de catalyseurs, ce phénomène n'est pas dû uniquement aux réactions de gazéification :





En effet, des expériences effectuées en imprégnant le bois d'eau lourde D₂O ont montré que l'hydrogène formé, l'était presque uniquement sous forme H₂ et à moins de 10 % sous forme HD. L'eau agirait donc uni-

COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE DES GAZ (voir graphiques II pour la moyenne des bois et tableaux V à VIII)

Teneur en gaz oxygénés.

Le volume de gaz oxygénés contenus dans le volume global des gaz varie en fonction de la température : le volume de CO passe par un maximum situé entre 700 et 900°. A l'inverse le volume de CO₂ décroît quand la

quement sous forme vapeur améliorant les conditions de transfert thermique. Ceci indique donc que la cinétique de pyrolyse rapide, limitée par le transfert thermique est beaucoup plus grande que la cinétique de la réaction gaz-solide de gazéification.

Rendements en gaz oxygénés.

La formation d'oxyde de carbone est nettement influencée par la température. Les valeurs qui correspondent à quelques pour-cent du bois à 500° augmentent jusqu'à plus de 50 % en poids des bois ou de la cellulose. On note que la lignine donne moins de CO que les autres matières premières. La présence d'eau augmente le rendement en CO. Le gaz carbonique formé varie dans de bien moins grandes proportions que le CO. Il correspond au minimum à quelques % et au maximum à 10 %, quelle que soit l'essence.

Rendements en hydrogène.

L'hydrogène étant un gaz très léger, les quantités produites sont dans leur ensemble peu importantes en poids par rapport aux autres composés. On peut cependant noter que l'hydrogène, en très petite quantité pour les pyrolyses à 500°, correspond à 1,5-2 % du bois initial quand la température de réaction se situe autour de 1.000°.

Rendements en hydrocarbures.

La production de composés hydrocarbonés (méthane, éthane et autres hydrocarbures) croît avec la température de la pyrolyse. Les taux de CH₄, inférieurs à 1 % dans la plupart des cas à 500°, tournent autour de 7-8 % de la matière première à 1.000°. La présence d'eau améliore le rendement. L'éthylène varie dans des proportions analogues. Le taux d'éthane par contre, reste, quelle que soit la température, inférieur à 0,5 % du bois.

Enfin, l'acétylène pratiquement inexistant à 500° correspond à quelques % pour les températures élevées.

La formation d'hydrocarbures totaux est donc d'autant plus marquée que la température est importante.

température augmente. La chute est très nette entre 500 et 700°. L'humidité semble avoir peu d'importance sur la composition volumétrique.

Teneur en hydrogène.

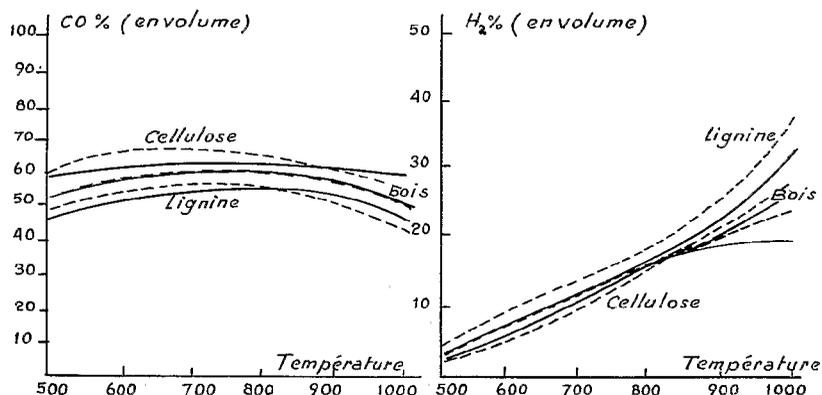
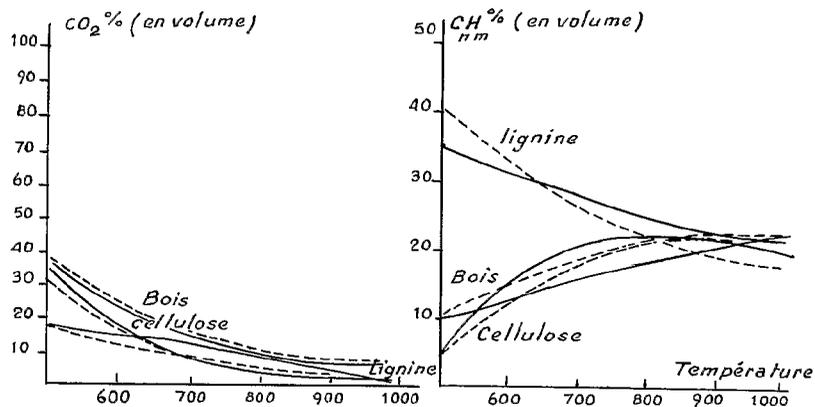
Le volume d'hydrogène augmente régulièrement avec

la température quelle que soit l'essence. Comme pour les gaz oxygénés, la présence d'eau ne modifie pas de façon très sensible les proportions volumétriques d'hydrogène dans les gaz. C'est pour la lignine que l'augmentation des pourcentages d' H_2 est la plus forte.

Teneur en méthane et hydrocarbures.

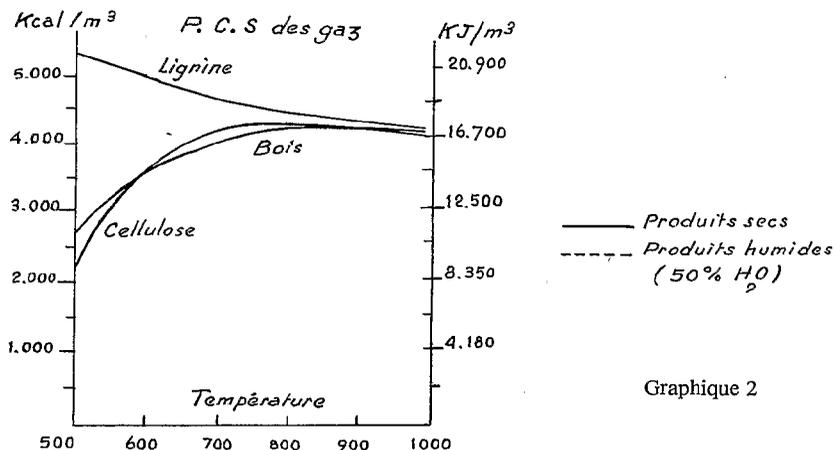
Pour les bois, les pourcentages volumiques de méthane et hydrocarbures totaux s'élèvent légèrement avec une augmentation de la température. Pour la cellulose, il semblerait que les volumes de CH_4 restent stables entre 700 et 1.000°. Pour la lignine, les volumes relatifs d'hydrocarbures, importants à basse température, ont tendance à diminuer à température élevée (conversion possible de CH_4 en présence de vapeur d'eau).

Enfin, les différences entre matières premières sèches et humides sont moins marquées que pour les rendements pondéraux.



Pouvoir calorifique des gaz.

Le pouvoir calorifique des gaz de bois ou de cellulose obtenus par pyrolyse à 500° est faible. Ce pouvoir calorifique croît avec la température jusqu'à un léger maximum situé entre 700 et 900° lorsqu'il s'agit de cellulose, de Gmelina ou de bois métropolitains. Pour les autres bois le p.c.s. augmente de 500 à 700° mais varie peu entre 800 et 1.000°. Pour la lignine, à l'inverse, le p.c.s. des gaz formés reste élevé quelle que soit la température de pyrolyse (4.500 à 5.000 kcal/m³).



Graphique 2

ADDITION DE CATALYSEURS AU COURS DE LA PYROLYSE ÉCLAIR

Différents catalyseurs ont été essayés à Nancy au cours de la gazéification de Pin Douglas (carbonates,

bicarbonates, chlorures, phosphates, oxalates, acétates...). On a remarqué que l'addition de ces com-

TABLEAU N° 1. — RÉSULTATS DE PYROLYSE ÉCLAIR À 500 °C. RENDEMENTS PONDÉRAUX — EN GAZ
(% BOIS SEC).

Echantillons		Rend ^t %	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Hydro- carbures totaux	Kcal/ 100 g bois
Hêtre	Sec	16,7	6,4	8,5	0,025	1,0	0,6	0,12	0	1,62	43
	Humide	20,1	7,9	10,2	0,04	1,2	0,65	0,15	0,015	2,01	51
Pin	Sec	13,9	4,65	7,85	0,025	0,9	0,45	0	0	1,35	36
	Humide	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mél. F.F.	Sec	10,25	5,4	4,35	0,02	0,33	0,12	0,05	0,002	0,5	18
	Humide	16,1	7,55	7,65	0,03	0,55	0,22	0,08	0,002	0,85	31
Eucalyptus	Sec	8,75	4,0	4,15	0,007	0,4	0,14	0,04	0,003	0,6	18
	Humide	12,9	5,4	6,6	0,016	0,6	0,22	0,06	0,005	0,9	30
Gmelina	Sec	9,55	5,2	3,85	0,011	0,33	0,1	0,05	0,001	0,5	16
	Humide	12,8	5,6	5,25	0,02	0,6	0,2	0,1	0,003	0,9	25
Mél. T ₁	Sec	11,5	6,5	4,35	0,01	0,45	0,1	0,06	0,001	0,6	18
	Humide	15,9	8,3	6,8	0,02	0,5	0,16	0,07	0,003	0,75	27
Mél. T ₂	Sec	11,9	6,2	5,05	0,015	0,4	0,14	0,06	0,001	0,6	20
	Humide	13,25	6,35	6,05	0,02	0,52	0,18	0,07	0,003	0,8	25
Mél. T ₃	Sec	12,0	6,5	4,9	0,015	0,4	0,12	0,06	0,002	0,6	20
	Humide	18,9	9,7	8,1	0,03	0,7	0,25	0,12	0,003	1,05	34
Lignine	Sec	8,35	2,45	4,0	0,015	1,6	0,15	0,15	0,001	1,9	35
	Humide	11,6	3,25	5,2	0,02	2,65	0,25	0,25	0,003	3,15	52
Cellulose	Sec	5,2	2,2	2,8	0,01	0,1	0,04	0,03	0,001	0,15	9
	Humide	8,8	3,9	4,6	0,03	0,12	0,10	0,05	0,002	2,7	15
Moyenne des bois	Sec	11,8	5,6	5,4	0,016	0,5	0,22	0,05	0,001	0,8	23
	Humide	15,7	7,25	7,1	0,025	0,65	0,27	0,09	0,005	1,2	32

TABLEAU N° 2. — RÉSULTATS DE PYROLYSE ÉCLAIR À 700 °C. RENDEMENTS PONDÉRAUX — EN GAZ
(% BOIS SEC).

Echantillons		Rend ^t %	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Hydro- carbures totaux	Kcal/ 100 g bois
Hêtre	Sec	48,8	7,9	30,9	0,6	5,0	3,6	0,5	0,3	9,4	214
	Humide	60,2	11,8	36,1	0,8	6,1	4,3	0,8	0,35	11,55	261
Pin	Sec	52,2	5,2	35,5	0,7	5,65	4,3	0,5	0,3	10,75	172
	Humide	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mél. F.F.	Sec	26,0	4,85	17,8	0,22	1,55	1,3	0,1	0,1	3,05	84
	Humide	43,8	8,4	20,65	0,35	2,1	1,7	0,35	0,12	4,25	116
Eucalyptus	Sec	15,9	4,35	17,9	0,2	1,7	1,3	0,26	0,1	3,35	93
	Humide	40,6	6,25	28,45	0,4	2,75	2,25	0,4	0,1	5,5	152
Gmelina	Sec	21,3	5,1	13,3	0,22	4,35	1,05	0,22	0,08	5,7	84
	Humide	33,7	8,4	20,65	0,35	2,1	1,72	0,35	0,12	4,3	116
Mél. T ₁	Sec	23,8	5,2	15,3	0,23	1,6	1,1	0,23	0,08	3,0	83
	Humide	38,0	7,35	25,15	0,4	2,55	2,0	0,35	0,2	5,1	139
Mél. T ₂	Sec	31,0	5,6	20,9	0,33	2,1	1,75	0,3	0,12	4,25	116
	Humide	44,9	8,1	29,65	0,55	3,1	2,55	0,4	0,2	6,25	169
Mél. T ₃	Sec	25,4	5,9	15,95	0,26	1,4	1,3	0,24	0,1	3,05	86
	Humide	42,8	9,2	27,1	0,47	3,0	2,4	0,45	0,22	6,1	158
Lignine	Sec	10,7	2,0	6,3	0,1	1,55	0,35	0,26	0,01	2,15	47
	Humide	14,1	2,1	9,3	0,15	1,75	0,45	0,37	0,02	2,6	61
Cellulose	Sec	47,6	4,9	33,1	0,7	4,1	4,0	0,45	0,3	8,85	215
	Humide	58,3	4,5	44,9	0,42	3,7	3,75	0,47	0,45	8,35	228
Moyenne des bois	Sec	30,55	5,5	21,0	0,35	2,9	1,95	0,29	0,15	5,3	116
	Humide	43,4	8,5	26,8	0,45	3,0	2,4	0,44	0,19	6,15	159

TABLEAU N° 3. — RÉSULTATS DE PYROLYSE ÉCLAIR À 900 °C. RENDEMENTS PONDÉRAUX — EN GAZ (% BOIS SEC).

Echantillons		Rend ^t %	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Hydro- carbures totaux	Kcal/ 100 g bois
Hêtre	Sec	60,4	8,3	39,0	1,15	6,25	4,3	0,25	1,1	11,9	293
	Humide	79,2	14,3	47,8	1,65	7,9	5,1	0,55	1,75	15,3	365
Pin	Sec	60,3	5,8	40,8	1,4	6,1	4,5	0,15	1,6	12,35	306
	Humide	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mél. F.F.	Sec	48,7	5,4	34,8	0,77	3,35	3,35	0,37	0,65	7,7	227
	Humide	65,1	9,5	42,8	1,15	4,9	4,9	0,4	1,3	11,5	283
Eucalyptus	Sec	39,9	4,65	28,5	0,73	2,7	2,35	0,25	0,62	5,9	168
	Humide	62,6	8,55	43,1	1,25	4,4	3,75	0,3	1,17	9,6	268
Gmelina	Sec	60,0	6,9	38,0	1,25	6,8	5,55	0,25	1,25	13,85	310
	Humide	81,6	13,7	51,3	1,7	6,9	6,0	0,3	1,7	14,9	370
Mél. T ₁	Sec	45,0	5,65	32,55	0,75	2,7	2,55	0,27	0,55	6,1	180
	Humide	62,2	9,2	42,75	1,25	4,1	3,2	0,27	1,02	8,6	254
Mél. T ₂	Sec	56,0	6,5	39,6	1,05	3,8	3,65	0,25	0,77	8,5	238
	Humide	65,3	9,25	45,15	0,55	4,75	4,15	0,25	1,1	10,25	257
Mél. T ₃	Sec	49,4	7,2	33,9	0,3	3,5	3,4	0,35	0,65	7,9	192
	Humide	66,1	12,0	39,5	1,2	6,1	5,4	0,5	1,45	13,45	306
Lignine	Sec	13,5	1,4	9,1	0,55	1,5	0,6	0,15	0,2	2,45	72
	Humide	23,0	2,4	15,9	0,6	2,25	1,05	0,4	0,3	4,0	109
Cellulose	Sec	62,2	3,9	45,4	1,3	5,8	4,0	0,2	1,4	11,4	298
	Humide	75,8	5,35	53,7	1,65	6,75	6,35	0,25	1,65	15,0	375
Moyenne des bois	Sec	52,45	6,3	35,9	0,9	4,4	3,7	0,27	0,9	9,3	239
	Humide	68,9	10,95	44,6	1,25	5,6	4,65	0,37	1,35	11,95	300

TABLEAU N° 4. — RÉSULTATS DE PYROLYSE ÉCLAIR À 1.000 °C. RENDEMENTS PONDÉRAUX — EN GAZ (% BOIS SEC).

Echantillons		Rend ^t %	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Hydro- carbures totaux	Kcal/ 100 g bois
Hêtre	Sec	67,6	9,35	44,35	1,7	6,8	3,4	0,1	1,85	12,15	330
	Humide	82,2	15,2	50,8	2,9	7,6	3,0	0,06	2,7	13,35	391
Pin	Sec	61,3	6,4	41,9	1,9	6,4	2,8	0	1,95	11,15	308
	Humide	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mél. F.F.	Sec	80,4	9,1	54,9	2,4	7,85	3,35	0,045	2,7	13,95	392
	Humide	85,3	10,5	55,7	1,95	8,0	6,5	0,4	2,25	17,15	417
Eucalyptus	Sec	71,7	7,9	47,8	1,65	7,5	3,9	0,04	2,9	14,35	353
	Humide	78,7	9,7	51,95	2,0	7,6	4,7	0,15	2,6	15,05	383
Gmelina	Sec	73,5	10,0	47,35	1,85	7,7	3,8	0,04	2,75	14,3	359
	Humide	85,1	12,1	55,4	2,5	7,6	4,7	0,2	2,7	15,2	411
Mél. T ₁	Sec	70,75	8,2	47,4	1,5	7,2	4,2	0,07	2,2	13,7	338
	Humide	77,6	9,45	51,3	1,65	6,95	6,0	0,45	1,9	15,3	372
Mél. T ₂	Sec	65,1	6,6	44,3	1,4	5,95	5,0	0,25	1,6	12,8	316
	Humide	82,3	9,5	55,7	1,9	7,2	5,15	0,25	2,6	15,2	391
Mél. T ₃	Sec	65,6	9,0	41,05	1,55	7,45	4,3	0,01	2,2	13,95	329
	Humide	81,1	11,3	52,8	2,1	7,25	5,2	0,4	2,05	14,9	387
Lignine	Sec	31,8	3,1	20,35	0,95	5,2	1,3	0,25	0,65	7,4	177
	Humide	35,6	6,1	21,9	1,5	3,6	1,45	0,45	0,6	6,1	182
Cellulose	Sec	72,65	6,1	53,1	1,5	6,2	3,45	0,15	2,15	11,95	331
	Humide	96,9	6,5	70,3	1,9	8,0	6,75	0,17	3,3	18,2	463
Moyenne des bois	Sec	69,5	8,3	46,1	1,75	7,1	3,85	0,07	2,25	13,3	340
	Humide	81,85	11,1	53,4	2,15	7,45	5,05	0,27	2,4	15,15	393

TABLEAU N° 5. — RÉSULTATS DE PYROLYSE ÉCLAIR À 500 °C. COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE (% DANS LES GAZ)

Echantillons		CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Hydrocarbures totaux	p.c.s. Kcal/m ³	p.c.s. en KJoules/m ³
Hêtre	Sec	26,5	55,5	2,0	11,5	3,5	0,7	0,3	16,0	3.510	14.690
	Humide	27,0	54,5	3,0	11,5	3,5	0,9	0,1	16,0	3.520	14.730
Pin	Sec	27,9	60,7	2,4	11,3	3,2	0	0	14,5	3.440	14.400
	Humide	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mél. F.F.	Sec	39,3	49,95	2,5	6,4	1,35	0,5	0,015	8,25	2.480	10.380
	Humide	34,15	54,05	2,95	6,75	1,55	0,55	0,035	8,9	2.690	11.260
Eucalyptus	Sec	33,1	54,1	1,35	9,15	1,85	0,45	0,04	11,5	2.900	12.140
	Humide	29,5	56,75	1,95	9,3	1,95	0,55	0,05	11,85	3.050	12.765
Gmelina	Sec	41,2	48,3	1,75	6,95	1,3	0,5	0,02	8,75	2.450	10.255
	Humide	37,2	47,3	2,6	9,5	1,85	0,85	0,03	12,2	2.830	11.845
Mél. T ₁	Sec	43,3	45,3	1,65	8,2	1,15	0,55	0,01	9,9	2.460	10.295
	Humide	39,1	50,2	2,05	6,9	1,2	0,5	0,02	8,6	2.500	10.465
Mél. T ₂	Sec	39,1	49,8	2,0	7,2	1,3	0,6	0,02	9,1	2.550	10.675
	Humide	34,9	52,45	2,45	8,0	1,55	0,65	0,03	10,2	2.760	11.550
Mél. T ₃	Sec	40,8	48,4	2,05	6,95	1,25	0,55	0,02	8,75	2.470	10.340
	Humide	37,7	49,45	2,7	7,85	1,55	0,7	0,03	10,1	2.670	11.125
Lignine	Sec	17,8	45,6	2,6	31,1	1,4	1,5	0,01	34,0	4.870	20.385
	Humide	16,3	41,3	1,9	36,8	1,75	1,9	0,03	40,5	5.380	22.520
Cellulose	Sec	31,8	58,65	5,1	2,6	1,25	0,55	0,035	4,4	2.400	10.045
	Humide	30,45	61,2	4,3	2,55	1,0	0,45	0,025	4,0	2.450	10.255
Moyenne des bois	Sec	35,8	51,45	1,95	8,45	1,85	0,5	0,05	10,85	2.780	11.635
	Humide	34,2	51,65	2,5	8,55	1,85	0,65	0,041	11,1	2.860	11.970

TABLEAU N° 6. — RÉSULTATS DE PYROLYSE ÉCLAIR À 700 °C. COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE (% DANS LES GAZ)

Echantillons		CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Hydrocarbures totaux	p.c.s. Kcal/m ³	p.c.s. en Joules/m ³
Hêtre	Sec	9,0	54,0	14,0	15,0	6,5	1,0	0,5	22	4.690	19.630
	Humide	10,5	50,5	16,5	15,0	6,0	1,0	0,5	21,5	4.590	19.210
Pin	Sec	5,3	55,8	15,3	15,5	6,75	0,75	0,5	23,5	4.810	20.130
	Humide	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mél. F.F.	Sec	11,0	62,8	11,2	9,65	4,65	0,35	0,35	15,0	3.960	16.575
	Humide	9,65	62,85	13,85	8,2	4,4	0,65	0,4	13,65	3.920	16.410
Eucalyptus	Sec	10,05	63,65	9,9	10,55	4,6	0,85	0,4	16,4	4.110	17.200
	Humide	8,75	62,4	12,25	10,55	4,95	0,85	0,25	16,6	4.180	17.495
Gmelina	Sec	14,0	57,05	13,1	10,2	4,45	0,9	0,3	15,85	3.950	16.530
	Humide	14,55	56,15	13,3	10,0	4,7	0,9	0,4	16,0	3.960	16.575
Mél. T ₁	Sec	12,6	58,75	12,25	10,9	4,35	0,85	0,3	16,4	4.020	16.825
	Humide	11,0	59,25	13,25	10,6	4,65	0,8	0,45	16,5	4.090	17.120
Mél. T ₂	Sec	10,15	59,8	13,3	10,6	5,0	0,75	0,4	16,75	4.150	17.370
	Humide	10,0	58,3	15,1	10,45	5,0	0,7	0,45	16,0	4.140	17.330
Mél. T ₃	Sec	13,5	57,4	12,9	10,55	4,65	0,8	0,4	16,4	4.010	16.785
	Humide	12,25	56,5	14,0	10,85	5,05	0,85	0,5	17,25	4.130	17.286
Lignine	Sec	11,0	51,0	11,35	21,7	2,8	2,05	0,12	26,7	4.720	19.755
	Humide	7,9	55,9	13,5	18,25	2,65	2,05	0,15	23,1	4.590	19.210
Cellulose	Sec	5,35	57,05	16,9	12,4	6,95	0,75	0,6	20,7	4.670	19.545
	Humide	4,45	69,5	8,7	10,1	5,8	0,7	0,75	17,25	4.420	18.500
Moyenne des bois	Sec	10,7	58,6	12,75	11,6	5,1	0,8	0,4	17,8	4.210	17.620
	Humide	10,9	58,0	14,1	10,8	4,95	0,8	0,4	16,8	4.140	17.330

TABLEAU N° 7. — RÉSULTATS DE PYROLYSE ÉCLAIR À 900 °C. COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE (% DANS LES GAZ)

Echantillons		CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Hydrocarbures totaux	p.c.s. Kcal/m ³	p.c.s. en KJoules/m ³
Hêtre	Sec	7,0	50,0	21,0	14,0	6,0	0,5	1,5	22,0	4.670	19.545
	Humide	8,5	44,5	27,0	13,0	4,7	0,5	1,8	20,0	4.430	18.540
Pin	Sec	4,6	50,3	24,1	13,15	5,5	0,15	2,15	20,95	4.640	19.000
	Humide	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mél. F.F.	Sec	5,8	58,65	18,3	9,8	7,6	0,6	1,2	19,2	4.660	19.505
	Humide	7,5	53,0	20,4	10,95	6,1	0,45	1,6	19,1	4.470	18.710
Eucalyptus	Sec	5,95	57,45	20,7	9,4	4,7	0,5	1,35	15,95	4.230	17.705
	Humide	6,85	54,3	22,4	9,75	47,5	0,35	1,65	16,45	4.240	17.745
Gmelina	Sec	6,95	52,25	21,0	12,0	5,9	0,4	1,5	19,8	4.510	18.875
	Humide	8,45	49,4	23,2	11,35	5,5	0,3	1,8	18,95	4.400	18.415
Mél. T ₁	Sec	6,55	59,2	19,45	8,6	4,65	0,5	1,05	14,8	4.120	17.245
	Humide	7,45	54,45	22,65	9,15	4,55	0,32	1,4	15,4	4.130	17.285
Mél. T ₂	Sec	5,95	56,8	21,1	9,45	5,2	0,35	1,15	16,15	4.250	17.790
	Humide	8,0	61,4	11,7	11,3	5,6	0,35	1,65	18,9	4.410	18.460
Mél. T ₃	Sec	8,65	63,8	7,55	11,55	6,4	0,65	1,35	19,95	4.510	18.875
	Humide	9,3	48,25	20,3	13,05	6,6	0,55	1,95	22,15	4.660	19.505
Lignine	Sec	5,15	52,15	21,75	15,5	3,55	0,8	1,15	21,0	4.530	18.960
	Humide	4,85	50,2	26,25	12,95	3,5	1,25	1,05	18,75	4.420	18.500
Cellulose	Sec	2,95	55,3	21,65	12,3	4,8	0,2	1,85	19,15	4.500	18.835
	Humide	3,4	53,3	23,3	11,7	6,3	0,25	1,8	20,05	4.660	19.505
Moyenne des bois	Sec	6,4	56	19,1	11	5,75	0,45	1,4	18,6	4.450	18.625
	Humide	8,0	52,2	21,1	11,2	5,4	0,4	1,7	18,7	4.390	18.375

TABLEAU N° 8. — RÉSULTATS DE PYROLYSE ÉCLAIR À 1.000 °C. COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE (% DANS LES GAZ)

Echantillons		CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Hydrocarbures totaux	p.c.s. Kcal/m ³	p.c.s. en KJoules/m ³
Hêtre	Sec	6,5	48,5	26,0	13,0	3,8	0,2	2,0	19,0	4.370	18.290
	Humide	8,0	42,0	34,0	11,0	2,5	0,05	2,45	16,0	4.060	16.995
Pin	Sec	4,4	45,2	28,8	16,5	3,0	0	2,2	15,7	4.560	19.100
	Humide	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mél. F.F.	Sec	5,0	47,7	29,9	12,0	2,9	0,04	2,6	17,55	4.290	17.955
	Humide	5,9	49,2	24,1	12,4	5,75	0,35	2,3	20,8	4.630	19.380
Eucalyptus	Sec	5,15	49,4	24,6	13,7	4,0	0,04	3,1	20,85	4.570	19.125
	Humide	5,75	48,4	26,3	12,4	4,4	0,12	2,6	19,5	4.480	18.750
Gmelina	Sec	6,4	47,4	25,9	13,2	3,8	0,04	3,0	20,05	4.460	18.665
	Humide	6,85	45,0	29,8	11,65	4,25	0,16	2,3	18,35	4.350	18.205
Mél. T ₁	Sec	5,6	51,1	22,5	13,6	4,6	0,07	2,55	20,8	4.570	19.125
	Humide	5,95	50,7	22,9	12,15	5,8	0,45	2,05	20,45	4.610	19.295
Mél. T ₂	Sec	4,9	51,1	23,1	12,6	5,85	0,3	2,0	20,75	4.640	19.420
	Humide	5,3	49,1	25,85	12,1	4,85	0,2	2,6	19,75	4.540	19.000
Mél. T ₃	Sec	6,5	46,6	24,6	14,8	4,9	0,08	2,7	22,5	4.680	19.590
	Humide	5,3	47,9	27,7	11,5	5,0	0,85	2,3	19,05	4.490	18.790
Lignine	Sec	4,2	43,2	28,5	19,35	2,8	0,5	1,5	24,15	4.720	19.755
	Humide	6,9	38,95	38,5	11,2	2,55	0,8	1,1	15,65	4.070	17.035
Cellulose	Sec	4,1	56,25	21,9	11,6	3,65	0,15	2,35	17,75	4.360	18.200
	Humide	3,3	55,95	21,25	11,15	5,35	0,15	2,8	19,45	4.610	19.295
Moyenne des bois	Sec	5,55	48,4	25,65	13,65	4,1	0,1	2,5	19,65	4.520	18.920
	Humide	6,15	47,45	27,25	11,9	4,65	0,3	2,35	19,15	4.450	18.625

posés présentait surtout de l'intérêt lorsque la température de réaction et l'humidité des bois étaient élevées (900° et 50 % d'eau). Le rôle des catalyseurs est, en effet, d'accélérer la cinétique de gazéification à la vapeur qui devient alors du même ordre de grandeur que la cinétique de pyrolyse rapide. Les deux réactions sont alors compétitives, ce qui n'est pas le cas en pyrolyse

rapide de bois humides en l'absence de catalyseurs.

Enfin, l'action des catalyseurs tels les carbonates alcalins ou certains chlorures, se traduit également par des variations dans la composition volumétrique des gaz obtenus : gaz plus riches en CO₂ et H₂ et moins riches en CO, ce qui peut entraîner une variation des pouvoirs calorifiques.

INFLUENCE DE LA NATURE DES MATIÈRES PREMIÈRES

On a vu précédemment que les résultats de pyrolyse éclair étaient différents, toutes choses égales d'ailleurs, selon la matière première traitée. En particulier, on a pu noter que la cellulose se gazéifiait plus facilement que la lignine et que la moyenne des bois se situait entre ces extrêmes. On a alors considéré les résultats de chaque bois pris isolément et étudié les variations des rendements pondéraux obtenus à 700°, 900° et 1.000° en fonction des teneurs en lignine, en carbohydrates totaux (cellulose plus pentosanes) des matières premières de départ et de leur pouvoir calorifique anhydre. On a alors remarqué que ces rendements se situaient :

- en fonction inverse des teneurs en lignine,
- en fonction inverse des pouvoirs calorifiques,
- dans le même sens que les quantités de polysaccharides des matières premières.

Les coefficients de corrélation entre les pourcentages des principaux constituants chimiques des bois et les rendements à la gazéification éclair ont été calculés. Ils sont donnés ci-dessous.

On peut en déduire que les rendements en gaz obtenus au cours de la pyrolyse éclair sont fonction de la composition chimique des matières premières traitées. Les corrélations sont nettes, quelle que soit la température, lorsque l'on travaille sur produits humides. Avec les bois secs, par contre, il faut atteindre des températures élevées 900° et 1.000°, pour que la corrélation existe avec certitude.

Enfin, comme le p.c.s. d'un composé est lui-même fortement corrélé à sa nature chimique, il est normal que cette notion soit à son tour en corrélation avec la facilité de gazéification.

Température	700°		900°		1.000°	
	Sec	Humide	Sec	Humide	Sec	Humide
Corrélation avec lignine	- 0,60	- 0,86	- 0,85	- 0,92	- 0,88	- 0,95
Corrélation avec carbohydrates	+ 0,63	+ 0,86	+ 0,76	+ 0,87	+ 0,83	+ 0,96
Corrélation avec p.c.s.	- 0,61	- 0,87	- 0,76	- 0,87	- 0,84	- 0,95

COMPARAISON ENTRE PYROLYSE RAPIDE ET PYROLYSE LENTE CLASSIQUE

Parallèlement aux pyrolyses flash, une pyrolyse lente classique a été effectuée sur tous les échantillons avec le schéma opératoire suivant :

Montée de 20 à 500° : 5 heures,

Palier à 500° : 5 heures,

Durée de carbonisation : 10 heures (voir tableaux X et XI),

Quelques essais à température plus élevée (600 à

900°), ont également été effectués avec le même appareillage.

Les quantités de matière première traitée se situaient entre 50 g et 100 g selon la densité et la nature. Les produits étaient secs à l'air. Comme précédemment, on a déterminé les rendements pondéraux en gaz et différents composés ainsi que la composition volumétrique des gaz.

TABLEAU N° 9. — RÉSULTATS DE PYROLYSE LENTE À 500 °C. RENDEMENTS PONDÉRAUX EN PRODUITS GAZEUX (% PRODUCT INITIAL ANHYDRE)

Echantillons	Rend ^t %	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	O ₂	Kcal/ 100 g matière première	Rend ^t énergé- tique des gaz
Hêtre	19,8	13,45	4,8	0,03	1,15	0,08	0,2	—	0,1	31	6,7
Pin	17,85	10,15	5,4	0,04	1,65	0,07	0,2	—	0,35	46	9,6
Mél. F.F.	21,3	14,0	5,7	0,03	1,2	0,07	0,2	—	0,1	37	7,8
Eucalyptus	20,95	14,1	5,55	0,02	1,0	0,09	0,2	—	—	34	7,0
Gmelina	24,85	15,7	7,35	0,03	1,35	0,08	0,27	—	0,08	47	9,7
Mél. T ₁	22,4	15,1	6,05	0,01	0,75	0,08	0,2	—	0,2	33	6,9
Mél. T ₂	20,9	14,0	5,4	0,02	1,0	0,08	0,2	—	0,2	38	7,6
Mél. T ₃	21,15	13,0	5,7	0,03	1,65	0,11	0,33	—	0,35	52	11,3
Lignine	10,45	2,2	5,3	0,03	2,7	0,05	0,1	—	0,08	51	8,4
Cellulose	21,4	14,7	5,1	0,05	1,3	0,06	0,15	—	0,05	34	8,3

TABLEAU N° 10. — RÉSULTATS DE PYROLYSE LENTE À 500 °C. COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE (% EN VOLUME)

Echantillons	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	O ₂	p.c.s. Kcal/ m ³	p.c.s. en KJoules/ m ³
Hêtre	43,4	34,5	3,3	16,3	0,55	1,4	—	0,6	3.005	12.575
Pin	36,0	36,9	3,7	19,6	0,45	1,3	—	2,0	3.370	14.105
Mél. F.F.	50,9	32,4	2,6	12,1	0,4	1,1	—	0,5	2.450	10.255
Eucalyptus	52,4	32,5	1,7	9,05	0,45	1,1	—	2,15	2.320	9.710
Gmelina	48,55	35,7	1,85	11,55	0,5	1,25	—	0,4	2.680	11.215
Mél. T ₁	53,8	33,9	0,8	7,4	0,45	1,05	—	1,6	2.170	9.080
Mél. T ₂	51,5	31,2	1,4	10,25	0,45	1,1	—	2,0	2.530	10.590
Mél. T ₃	45,7	31,5	2,7	16,0	0,6	1,7	—	2,1	3.380	14.145
Lignine	11,4	44,15	3,45	39,3	0,4	0,8	—	0,6	5.365	22.455
Cellulose	42,1	35,7	4,6	15,9	0,4	0,95	—	0,35	2.945	12.325

RÉSULTATS PONDÉRAUX EN GAZ

Rendements totaux à la gazéification.

Par rapport à ceux de pyrolyse flash à 500°, les rendements gazeux de pyrolyse lente sont plus élevés et corres-

pondent en moyenne à ceux de pyrolyse rapide à 600-700° selon l'état hygrométrique de la matière première. Cette quantité de gaz plus importante à 500° est due au fait qu'en pyrolyse lente, la vapeur d'eau, l'hydrogène,

etc... ont le temps de réagir sur le carbone pour donner des réactions de gazéification, ce qui n'est pas le cas en pyrolyse rapide à basse température où le temps de réaction est plus court. Cependant, dès que la température croît, le volume des gaz formés par pyrolyse rapide augmente rapidement tandis qu'en pyrolyse lente même effectuée à 800 ou 900°, les pourcentages de gaz totaux ne dépassent pas en moyenne 30 à 31 % du bois (voir graphiques III).

Rendements en gaz oxygénés.

Dans le cas des bois, les pourcentages de CO formé par rapport au produit initial sont assez comparables à ceux obtenus par les gazéifications rapides à 500°. Par contre, les quantités de CO₂ sont nettement plus élevées que

celles de la pyrolyse flash puisqu'elles se situent entre 10 et 15 %, taux non atteint à la pyrolyse rapide quelle que soit la température ou l'humidité.

Rendement en hydrogène.

Le rendement en hydrogène est extrêmement faible à 500° quelle que soit la vitesse de pyrolyse. Les résultats sont donc comparables pour les deux techniques.

Rendement en méthane et hydrocarbures.

A 500°, le méthane est en général produit en quantité un peu plus importante par pyrolyse lente que par pyrolyse rapide, mais les différences sont faibles et une pyrolyse flash à 700° est nettement plus avantageuse qu'un traitement lent à 500°. Il en est de même des hydrocarbures totaux. Enfin, on n'a pas trouvé d'acétylène dosable dans les gaz de carbonisation lente.

COMPOSITION VOLUMÉTRIQUE DES GAZ

Teneur en gaz oxygénés.

Dans le cas de la pyrolyse classique les teneurs en CO et CO₂ sont inversées ; les gaz contiennent un volume plus important de CO₂ que de CO car on est en présence de réactions lentes équilibrées (à l'inverse de la pyrolyse rapide « hors-équilibre »).

Teneur en hydrogène.

Les volumes d'hydrogène sont faibles et analogues à ceux de la pyrolyse rapide à la même température.

Teneur en méthane et hydrocarbures.

Les gaz formés par pyrolyse lente à 500° contiennent en volume un peu plus de méthane que ceux de la pyrolyse rapide mais les différences sont malgré tout faibles entre les deux types de traitement.

Bilans globaux de la pyrolyse lente et rapide.

Pour comparer de façon valable la pyrolyse lente et la pyrolyse rapide, il faut également prendre en considération les composés liquides et solides (pyroligneux et charbons) dont la formation est le but de toute carbonisation classique. Des différences, plus marquées que celles enregistrées au niveau des gaz, se remarquent également au niveau du charbon et des produits condensables. A température égale, une réaction lente donne beaucoup plus de charbon et moins de pyroligneux qu'une réaction rapide. D'autre part, une élévation de la température de la pyrolyse flash se traduit rapidement par une disparition totale des résidus charbonneux qui ne correspondent plus au-dessus de 700-800° qu'à quelques % du bois initial.

A l'inverse, ce phénomène ne se produit pas pour la pyrolyse lente classique pour laquelle le pourcentage de charbon résultant est toujours assez élevé (voir graphique III).

CONCLUSIONS

Au cours de cette étude sur la pyrolyse rapide de différentes matières premières ligno cellulosiques les résultats suivants ont été enregistrés :

Tout d'abord, les rendements à la gazéification sont favorisés par une élévation de la température et de l'état hygrométrique des matières premières. L'action de la vapeur d'eau, compte tenu de la structure du matériau bois, est principalement d'ordre physique (amélioration des conditions de transfert thermique).

L'amélioration du rendement pondéral se traduit sur-

tout par une augmentation des quantités d'oxyde de carbone et d'hydrocarbures formés pour une même quantité de bois.

La composition volumétrique des gaz varie en fonction de la température : diminution des volumes relatifs en gaz carbonique, courbes présentant un maximum pour les volumes relatifs d'oxyde de carbone, augmentation nette des volumes d'hydrogène au-dessus de 900°. Il en résulte que le pouvoir calorifique des gaz s'accroît dans l'ensemble avec la température (2.400-2.500 Kcal/m³ jusqu'à 4.600-4.800 Kcal/m³) avec toutefois dans quel-

ques cas, un léger maximum autour de 800-900°.

L'addition de catalyseurs permet d'améliorer les rendements en gaz, lorsque les essais ont lieu à température élevée et sur les produits humides.

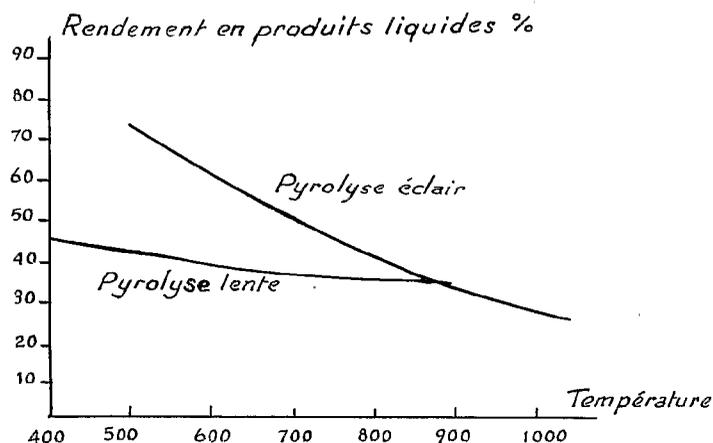
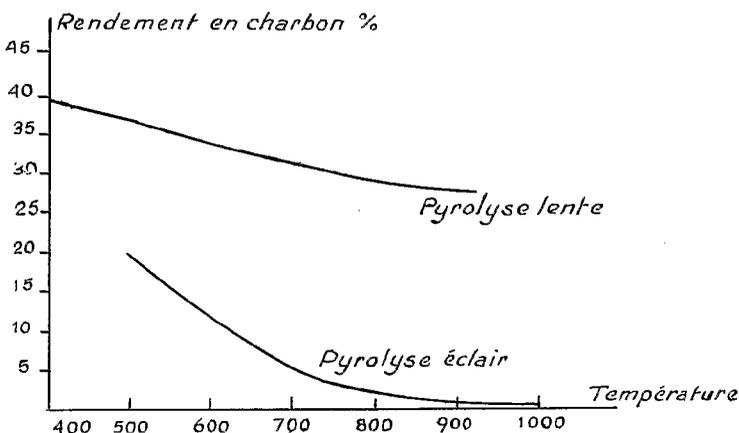
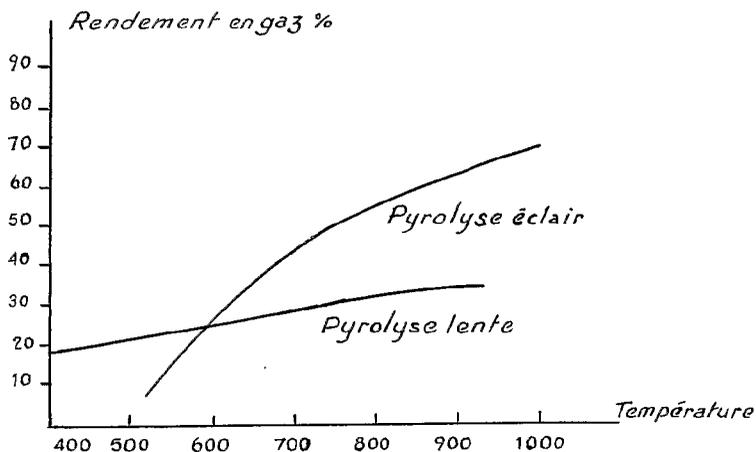
La nature des matières premières a une influence sur les résultats de pyrolyse. Ainsi la lignine est plus difficile à gazéifier que la cellulose et les rendements obtenus à 700-900 et 1.000° sont fonction des teneurs respectives de ces différents constituants. Les bois se situent dans tous les cas entre la lignine et la cellulose et les meilleurs rendements sont enregistrés pour les matières premières à haute teneur en carbohydrates (cellulose + pentosanes) ou à faible teneur en lignine.

Parallèlement le pouvoir calorifique du matériau initial (qui dépend, lui aussi de la composition chimique) est inversement corrélé avec le rendement en gaz.

La comparaison de la pyrolyse lente classique (durée totale de l'opération : 10 heures) et de la pyrolyse rapide (durée de l'ordre de la seconde) effectuées à la même température (500°) a montré que la première technique donnait un peu plus de gaz totaux et que son efficacité du point de vue rendement à la gazéification pouvait se comparer à une pyrolyse rapide réalisée autour de 600-700°. La composition volumétrique des gaz obtenus n'est cependant pas identique car les gaz de carbonisation lente contiennent plus de CO₂ que de CO. Toutefois, dès que la température s'élève, le volume des gaz formés s'accroît beaucoup plus rapidement pour la pyrolyse flash que pour le traitement lent, tandis que diminuent à la même vitesse, les résidus solides. On arrive ainsi, par traitement rapide, à la disparition totale du charbon ce qui différencie très nettement les deux techniques.

Cette étude a montré aussi que la pyrolyse rapide des bois tropicaux était possible et que les résultats obtenus confirmaient, dans leur ensemble, ceux des essences métropolitaines.

Enfin, elle a mis en lumière, le fait qu'une variation de la vitesse de la réaction conduisait à des résultats quantitativement différents, une pyrolyse rapide à température élevée ne produisant pratiquement pas de charbon mais seulement des gaz et des produits liquides (eau et goudrons). Cette remarque peut avoir un certain inté-



Graphique 3.

rêt pour la mise en œuvre d'essais ultérieurs visant à produire non plus des gaz mais des combustibles liquides à partir des bois.

BIBLIOGRAPHIE

- AVNI Eitan, DAVOUDZADEH Faegh and COUGHLIN Robert. W. — Flash pyrolysis of Lignin. International conference : Fundamental of Thermochemical Biomass conversion. Estes Park, USA, octobre 1982.
- CAUBET (S.), CORTÉ (P.), FAHIM (C.) et TRAVERSE (J. P.). — Gazéification de la cellulose, de la lignine et du bois par pyrolyse flash. Communication AFEDES, février 1981.
- CORTÉ (P.). — Valorisation énergétique de la biomasse par pyrolyse flash. Etude des paramètres physicochimiques de la conversion. Thèse de docteur ingénieur. Université Paul Sabatier, Toulouse (Sciences), octobre 1982.
- DÉGLISE (X.). — Etude analytique et cinétique de la gazéification et de la liquéfaction des déchets de bois. Etude D.G.R.S.T. n° 78.7.2902, février 1981.
- DÉGLISE (X.). — Les conversions thermochimiques du bois. Conférence à la Session de formation continue sur l'utilisation énergétique du bois. ENGREF, Nancy, 21 octobre 1980.
- DÉGLISE (X.), RICHARD (C.), FRANÇOIS (H.) et TOURNIER (A.). — Etude de la gazéification-flash de la sciure de bois à 900 °C. Rapport P.I.R.D.E.S., octobre 1978.
- DÉGLISE (X.), RICHARD (C.), ROLIN (A.) et FRANÇOIS (H.). — Influence de la température et du taux d'humidité sur la pyrolyse-flash de déchets lignocellulosiques. Communication à la Société Française des Thermiciens Orléans, 5 février 1980.
- DÉGLISE (X.), RICHARD (C.), ROLIN (A.) et FRANÇOIS (H.). — Fast Pyrolysis of Biomass at short residence time. International Conference « Energy from Biomass » Brighton, Grande-Bretagne, 4-7 novembre 1980.
- DOAT (J.). — Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. B.F.T. n° 172, 1977.
- DOAT (J.). — Les bois tropicaux, source potentielle d'énergie. B.F.T. n° 181, 1979.
- DOAT (J.), PETROFF (G.). — La carbonisation des bois tropicaux. B.F.T. n° 159, 1975.
- DOAT (J.), VALETTE (J. C.). — Inflammability of tropical woods. XVII IUFRO World Congress, Kyoto, Japan, septembre 1981.
- GRAHAM R., BERGOUNON M. A., MOK L. K. and de LASA H. I. — Fast pyrolysis (ultrapyrolysis) of biomass using solid heat carriers. International conference : Fundamental of Thermochemical Biomass conversion. Estes Park, USA, octobre 1982.
- LÉDÉ (J.). — Gazéification du bois par pyrolyse éclair. Communication AFEDES, février 1981.
- PETROFF (G.) et DOAT (J.). — Pyrolyse des bois tropicaux. Influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. B.F.T. n° 177, 1978 et International Conference « Energy from Biomass », Brighton, Grande-Bretagne, novembre 1980.
- ROLIN (A.). — Pyrolyse rapide de composés lignocellulosiques. Thèse CNAM, mai 1981.
- STEINBERG Meyer, FALLON Peter, SUNDARAN Muthu S. — Flash pyrolysis of biomass with reactive and non reactive gases. International conference : Fundamental of Thermochemical Biomass conversion. Estes Park, USA, octobre 1982.