

# MISE AU POINT D'UN PROCÉDÉ EXPÉRIMENTAL DE QUANTIFICATION DE LA TENEUR TOTALE EN CRÉOSOTE DANS LES BOIS IMPRÉGNÉS

J. Rauch\* et \*\*, G. Trouvé\*, L. Delfosse\* et S. Durécu\*\*

\* *Laboratoire gestion des risques et environnement, Mulhouse*

\*\* *Tredi département recherche, Vandœuvre-lès-Nancy*

La créosote est largement utilisée comme fongicide dans le traitement des bois d'extérieur (traverses de chemin de fer, poteaux électriques et téléphoniques) pour pallier aux effets climatiques (vent, pluie) et aux dégradations néfastes engendrées sur les insectes. Ces bois en fin de vie représentent actuellement un gisement de 100 000 tonnes de déchets par an sur l'ensemble de la Communauté européenne. Le retraitement et la valorisation de ces déchets dangereux monopolisent un grand nombre d'études. Si l'identification et la quantification de la totalité des molécules organiques aromatiques contenues dans une créosote sont largement décrites dans la littérature par l'utilisation de la chromatographie en phase gazeuse, la teneur globale en créosote d'un bois imprégné n'est en général pas connue. Cette étude expérimentale présente un protocole rapide de quantification de la teneur totale en créosote dans un bois imprégné par spectroscopie infrarouge.

Organic preservatives like creosote are used to preserve wood from insects, fungi and water damage for many years. Poles for electric power or telephone and railroad sleepers are treated with this preservative and generate wood waste for which environmentally friendly treatment technologies need to be developed in the near future. These wood wastes which represent a large volume of material are classified as dangerous waste. These waste streams sum up to 100 000 ton of material per year in every major country of the European Community.

While various types of creosotes have been extensively analysed as reported in various publications, a rapid method of evaluation of the quantity of creosote present in a given sample is not available. The present work is an attempt to validate such a protocol using Infrared spectroscopy, allowing the evaluation of the mass content of creosote in impregnated woods.

## INTRODUCTION

Malgré l'apparition de nouveaux matériaux, le bois reste encore largement utilisé dans la construction, l'ameublement ou comme support (poteaux électriques et téléphoniques, traverses de chemin de fer). Si au siècle dernier, seul le cœur, ou duramen du bois, était utilisé pour les ouvrages en bois, l'augmentation de la demande a imposé de travailler les bois à croissance rapide dans leur totalité (cœur et aubier). La plus faible résistance de l'aubier aux agressions biologiques a entraîné le traitement des bois par des fongicides tels que la créosote (résidu de distillation de la houille), les polychlorophénols et/ou des mélanges de chrome, cuivre et arsenic (CCA) [8], [9]. Ces produits de préservation permettent d'allonger la durée de vie des bois de manière significative, soit d'environ une vingtaine d'années. Dans ces conditions, on estime à 35 ans la durée de vie moyenne de ces bois traités [12]. Le parc européen en matière de déchets de bois traités est estimé à ce jour à 100 000 tonnes par an. Le devenir de ces bois traités en fin de vie est conditionné par la rémanence de concentrations importantes des produits de préservation. Des solutions de traitement de ces bois par pyrolyse ou incinération suscitent un fort intérêt dans la communauté scientifique [14], [4], [6], [7] et [13]. Sur l'ensemble du gisement des déchets de bois de type poteaux électriques et téléphoniques à éliminer et à revaloriser, il faut s'attendre à trouver toute la gamme des produits de préservation utilisés (créosote, CCA et PCP).

Parmi les familles de fongicides utilisées, la créosote est largement dominante. En effet, les traverses de chemin de fer dont l'essence est le chêne sont traitées par la créosote exclusivement. Quant aux poteaux en bois des lignes électriques (constitués des essences de pin et de sapin), 70 % du gisement actuel sont traités à la créosote contre 30 % au CCA. L'addition de créosote dans les bois est réalisée par injection du fongicide sous pression (10 Bar) dans une autoclave portée à 100°C et ceci pendant 2 heures. Le procédé d'imprégnation du CCA est presque identique. Elle a également lieu dans une autoclave sous pression mais à tempé-

rature ambiante.

Si l'identification de l'ensemble des molécules présentes dans une créosote (HAP, chlorophénols, crésols, quino- léines, etc.) est largement détaillée dans la littérature par l'uti- lisation des techniques chromatographiques, elle ne nous renseigne pas sur la quantité totale de créosote contenue dans un bois contaminé [11] et [10]. La quantification indivi- duelle de chaque molécule présente dans la créosote s'avè- re extrêmement longue, fastidieuse et coûteuse par les tech- niques chromatographiques classiques. Il apparaît évident que la teneur globale en créosote est une donnée man- quante et nécessaire, notamment dans l'objectif d'estimer la performance d'un procédé de traitement de ces bois.

Cette étude présente une méthodologie rapide de quanti- fication de la teneur totale de créosote dans différents bois imprégnés.

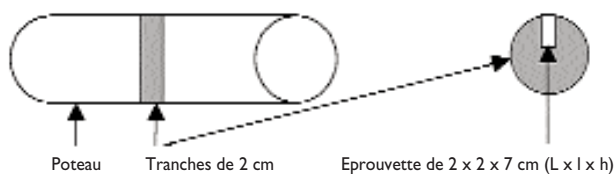
## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Présentation et préparation des échantillons de bois

Au laboratoire, trois échantillons créosotés ont été analy- sés. Le premier échantillon est une traverse usagée de che- min de fer en chêne (L x l x h : 260 cm x 26 cm x 14 cm), la créosote n'ayant pénétré que sur une vingtaine de milli- mètres. Le second échantillon est un poteau électrique en sapin imprégné sur 15 à 20 mm. Le sapin n'est pas aussi facilement imprégnable que le pin, le traitement pénètre donc moins profondément dans l'aubier. Le dernier échan- tillon est un poteau en pin qui n'a jamais été utilisé et qui est quasiment imprégné à cœur. La profondeur de l'imprégna- tion (visible à l'œil) de la créosote fournit une idée sur la nature du poteau. Les diamètres respectifs des poteaux de pin et de sapin sont 22,5 et 17 cm.

Dans chaque échantillon (bois bruts et imprégnés), des tranches de 2 cm d'épaisseur ont été découpées. Des éprou- vettes de bois de forme parallélépipède et de dimension (L x l x h : 2 cm x 2 cm x 7 cm) ont été préparées à partir des tranches des essences brutes et imprégnées. Ces éprou- vettes de volume 28 cm<sup>3</sup> sont soumis à l'analyse quantitati- ve de la créosote par spectroscopie infrarouge.

La méthode d'obtention des éprouvettes utilisées pour la détermination de la teneur en créosote est résumée sur la figure suivante :



**Figure a : Obtention des éprouvettes pour la détermination de la teneur en créosote dans les poteaux.**

Le tableau I donne les résultats de l'analyse élémentaire des échantillons de bois.

Tableau I : Composition élémentaire des échantillons de bois					
Echantillons	C	H	N	S	O
en %					
Sapin brut	47	6,8	0,1	< LD	46,1
Sapin créosoté	61	6,8	0,2	0,1	31,9
Pin brut	47	7,0	0,1	< LD	45,9
Pin créosoté					
neuf	62	6,6	0,5	0,1	30,8
Pin créosoté					
usagé	61	6,3	0,3	< 0,1	32,3
Chêne brut	45	6,9	0,1	< LD	52,0
Chêne créosoté	52	6,6	0,3	0,1	41,0

< LD : résultat inférieur à la limite de détection

Les résultats sont très proches de valeurs citées dans la lit- térature pour les bois bruts [3] et [5]. Les taux de carbone pour les échantillons créosotés sont élevés, présentant des écarts variant de 8 % à 18 % par rapport aux bois bruts. Le soufre et l'azote dans les bois créosotés sont présents avec des valeurs respectives de 1 000 et 3 000 ppm. Seule la teneur en hydrogène n'est pas affectée par la présence des contaminants. L'augmentation significative des éléments C, N et S dans les échantillons créosotés est directement liée à la forte teneur de composés aromatiques (HAP, N-HAP, qui- noléines, benzothiophènes, etc...) présents dans la créosote.

### Extractions liquide-liquide

Afin d'identifier les principales molécules contenues dans la créosote, des extractions liquide-liquide ont été réalisées d'après la procédure décrite par Mueller sur un échantillon de créosote commerciale (PTT 2000) et sur les bois trai- tés [11]. Ce procédé d'extraction permet de séparer les dif- férentes familles de composés aromatiques en plusieurs fractions, respectivement, les phénols, les HAPs, O, S-hété- rocycles et les N-hétérocycles. Chaque fraction comporte un grand nombre de composés dont la séparation et l'iden- tification ont été réalisées par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse.

### Quantification de la teneur massique globale en créosote par spectroscopie infrarouge

#### Principe

Une méthode de quantification de la teneur massique glo- bale en créosote dans les bois a été mise en place au labo- ratoire par spectroscopie infrarouge : elle est basée sur l'utilisation de la vibration de valence C-H (Csp<sup>2</sup>). En effet la créosote contenant un grand nombre de composés aromatiques, le dosage de ceux-ci doit donner une bonne approximation de l'ordre de grandeur de la teneur en créosote. Le domaine choisi pour la mesure de l'absorban- ce par application de la loi de Beer-Lambert se situe entre 3 200 – 3 000 cm<sup>-1</sup>. Une cellule liquide en verre optique per-

mettant l'analyse entre 4 000 et 2 000  $\text{cm}^{-1}$  et de trajet optique 1 mm a été utilisée. Le domaine de linéarité de la loi de Beer-Lambert est compris entre 0 et 3  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  pour des concentrations en créosote dans le tétrachlorure de carbone. Des bois non traités (chêne, pin et sapin) ont été soumis préalablement à la même procédure expérimentale. Ils constituent « les blancs » et ont permis de vérifier dans ces conditions expérimentales l'absence de bandes d'absorption dans le domaine considéré.

#### Préparations des extraits

Pour parvenir à doser la créosote dans le bois par FTIR, il faut effectuer une première étape qui consiste en l'extraction de la créosote du bois à chaud. Cette extraction a été effectuée dans un soxhlet avec le dichlorométhane à reflux pendant 4 heures. La masse des échantillons est comprise entre 10 et 20 g et le volume de dichlorométhane utilisé pour chaque extraction est fixé à 200 mL. Après évaporation du solvant, l'extrait se présente sous la forme d'une « croûte » qui est reprise dans le tétrachlorure de carbone (10 ou 25 mL exactement), celui-ci étant transparent dans le domaine considéré. Des ajouts de concentration croissante de créosote commerciale (0 à 1,4  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) dans les extraits permettent de réaliser la droite d'étalonnage par ajouts dosés.

La procédure d'extraction par soxhlet n'étant jamais totale, il est nécessaire de connaître avec précision le rendement de cette étape afin de pouvoir corriger les valeurs mesurées pour les bois créosotés, ces valeurs corrigées devant rendre compte de la teneur en créosote de ces bois en fin de vie. Afin d'estimer le rendement d'extraction, il a été choisi de travailler dans un premier temps sur des bois bruts imprégnés manuellement de créosote. En effet l'imprégnation manuelle permet de comparer exactement les quantités de créosote introduites et extraites.

#### Mesure du rendement d'extraction

Pour l'imprégnation manuelle, des éprouvettes de bois brut ont été séchées à 105°C pendant 2 heures, puis remises à l'air ambiant pendant 48 heures (stabilisation de la masse des éprouvettes). La masse obtenue  $m_1$  est la masse des éprouvettes de bois avant imprégnation. Ensuite elles ont été imprégnées par trempage dans une solution de créosote pendant 24 heures, et enfin un séchage à l'air libre pendant 5 semaines a permis de ne plus observer de variation en masse ( $m_2$ ) des éprouvettes (le surplus de créosote a été évacué par évaporation). La différence de masse  $m_3 = m_2 - m_1$  correspond à la quantité de créosote introduite manuellement. Après l'imprégnation, une extraction au soxhlet par le dichlorométhane de ces éprouvettes a été réalisée. Après évaporation à sec du dichlorométhane, l'extrait est dissous dans du tétrachlorure de carbone pour l'analyse quantitative par FTIR. L'analyse quantitative par ajouts dosés de créosote commerciale permet d'obtenir la masse de créosote  $m_4$ . Cette masse  $m_4$  représente la quantité totale de créosote extraite et quantifiée par la procédure expérimentale. Le calcul du rapport des masses  $m_4/m_3$  permet d'obtenir le rendement d'extraction de la créosote par cette méthode.

Une masse connue de créosote seule a été soumise au protocole d'évaporation afin de déterminer la perte en masse représentée par les composés volatils contenus dans celle-ci qui partent au cours de cette étape. La part de composés volatils est de 10 %. La masse  $m_4$  de créosote extraite et quantifiée par FTIR a donc été réévaluée d'autant.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Identification des composés organiques par chromatographie couplée à la spectrométrie de masse

Les tableaux 2 à 5 présentent les composés retrouvés majoritairement dans chaque fraction pour les bois imprégnés, les bois bruts et la créosote. Une centaine de molécules étant retrouvées dans chacune des trois fractions, seules les grandes familles chimiques sont résumées dans ces tableaux.

**Tableau 2 : Composés spécifiques présents dans les différentes fractions pour la créosote.**

Fractions	Composés spécifiques
Fraction phénolique	Phénol méthyles et diméthyles Naphtalénoles, Naphtalénols méthyles
N-Hétérocycles	Pyridines méthyles, diméthyles, triméthyles Isoquinoléines méthyles et diméthyles Quinoléines méthyles et diméthyles Carbazole, Acridine
HAP, O- et S-Hétérocycles	Dibenzothiophène, Biphényle diméthyles

**Tableau 3 : Composés spécifiques présents dans les différentes fractions pour les bois créosotés.**

Fractions	Composés spécifiques
Fraction phénolique	Phénol méthyles et diméthyles Naphtalénoles, Naphtalénols méthyles
N-Hétérocycles	Isoquinoléines méthyles et diméthyles Quinoléines méthyles et diméthyles Carbazole, Acridine
HAP, O- et S-Hétérocycles	Dibenzothiophène, Biphényl diméthyles

Les molécules identifiées dans la créosote sont congruentes par rapport aux études précédentes [1], [2].

**Tableau 4 : Composés spécifiques présents dans les différentes fractions pour les bois bruts.**

Fractions	Composés spécifiques
Fraction phénolique	Vanilline, Hydroxy méthylacétophénone Hydroxy diméthoxy Benzaldéhyde Biphényl méthanol, Dibenzofuranol Hydroxybiphényle, Phénoxy benzaldéhyde
N-Hétérocycles	Pas de détection de composés typiques
HAP, O- et S-Hétérocycles	Acide méthyl propanoïque

Dans le cas de l'analyse des bois bruts, des alcools, des alcanes, des alcènes (leur nombre de carbone variant entre douze et vingt) ont été également détectés dans les trois fractions.

De nombreuses molécules d'hydrocarbures aromatiques polycycliques sont retrouvées dans les trois fractions pour

les bois créosotés et la créosote. Ces composés n'ont pas été correctement séparés par le protocole expérimental appliqué au bois imprégné. Les principaux composés sont présentés dans le tableau 5.

**Tableau 5 : Composés présents dans les fractions des extraits des bois créosotés et de la créosote.**

Composés présents dans les trois fractions :	Naphtalène, Naphtalène méthyle, éthyle, diméthyle Biphényle, Biphényle méthyle, Acénaphène Dibenzofurane, Fluorène, Phénanthrène Anthracène, Fluoranthène, Pyrène Phénanthrène méthyle et anthracène méthyle
--	---

La séparation des composés de la créosote par ce procédé, initialement réservé aux sols créosotés, est peut-être bien adaptée à la matrice sol car celle-ci est constituée essentiellement d'éléments minéraux, ce qui n'est pas le cas pour le bois. En effet, ce protocole de séparation n'apparaît pas suffisamment sélectif. Les HAP se retrouvent dans toutes les fractions. Il faut noter également qu'une partie des molécules présentes de la fraction organique du bois est extractible par ce procédé et vient perturber l'identification du produit de préservation dans les bois imprégnés.

Malgré la faible sélectivité de ce procédé, les molécules identifiées, principalement des aromatiques, sont citées dans la littérature [1][2]. Ces analyses chromatographiques ont permis de vérifier la présence et la nature du produit de préservation dans les bois.

#### Rendements d'extraction mesurés par FTIR à partir de bois imprégnés manuellement

Le tableau 6 regroupe les données concernant l'imprégnation ainsi que le rendement d'extraction pour chaque essence. Les rendements d'extraction sont la moyenne de deux ou trois essais pour chaque essence de bois. La répétabilité des mesures sur la totalité des essais est comprise entre 3 et 5 %. Il a été délibérément choisi de prendre la valeur maximale de 5 % pour les rendements d'extraction des trois essences.

**Tableau 6 : Calcul du rendement d'extraction pour chaque essence de bois.**

Essence	Masse avant imprégnation $m_1$ (g)	Masse après imprégnation $m_2$ (g)	Masse de créosote introduite manuellement $m_3$ (g)	Masse de créosote extraite et quantifiée par FTIR $m_4$ (g)	Rendement d'extraction R (%)
Chêne	15,51	16,45	0,94	0,18	19±1
Pin	11,68	13,24	1,56	1,07	68±4
Sapin	9,27	10,39	1,12	0,67	60±3

#### Teneurs en créosote des bois imprégnés (poteaux et traverses)

Les bois imprégnés industriellement ont subi le même protocole expérimental que les bois imprégnés manuellement. Les rendements d'extraction calculés précédemment permettent de corriger les teneurs en créosote extraites à partir des bois imprégnés industriellement afin d'obtenir les

quantités de créosote présentes dans ces bois avant extraction.

La teneur en créosote quantifiée à partir de l'extraction de éprouvettes de bois de volume 28 cm<sup>3</sup> et exprimée en % n'est pas représentative de la totalité de fongicide présente dans un poteau ou une traverse usagés. En effet, le fongicide n'a pas pénétré en totalité le cœur et l'aubier du bois, les éprouvettes de bois ayant été prélevés dans la zone de pénétration de l'aubier. Il faut prendre en compte l'épaisseur de pénétration de la créosote dans l'aubier pour calculer la teneur en créosote dans une tranche de poteau. En émettant l'hypothèse selon laquelle toutes les tranches sur la totalité de la longueur du poteau, contiennent la même quantité de créosote, et connaissant la densité de chaque essence de bois, la teneur en créosote dans les poteaux et traverses peut être ramenée en m<sup>3</sup> de bois traité. Le tableau suivant résume l'ensemble des résultats obtenus.

**Tableau 7 : Teneur en créosote des poteaux et traverses.**

	Chêne	Pin	Sapin	
Masse volumique (kg. m <sup>-3</sup> )	700	600	600	500
Volume des éprouvettes de bois (cm <sup>3</sup> )	28	28	28	28
Volume des tranches (cm <sup>3</sup> )	728	795	795	454
Teneur en créosote dans les éprouvettes (%)	4,2	42,8	35,6	1,42
Teneur en créosote dans les tranches (%)	0.16	1.50	1.25	0.09
<b>Teneur en créosote dans les poteaux et traverses traités (kg. m<sup>-3</sup>)</b>	<b>1.2±0.1</b>	<b>9.0±0.9</b>	<b>7.5±0.7</b>	<b>0.50±0.05</b>
	<b>traverse usagée</b>	<b>poteau neuf</b>	<b>poteau usagé</b>	<b>poteau usagé</b>

Deux éprouvettes par poteaux et traverse ont été soumises au protocole d'extraction afin de rendre compte de la répétabilité du procédé. Il s'avère que sur l'ensemble des étapes subies par l'éprouvette (pesée, extraction, quantification par FTIR), l'extraction est celle qui présente la plus grande incertitude de l'ordre de 5 %.

Les teneurs en créosote dans les poteaux et traverses données dans le tableau suivant sont donc entachées d'une incertitude relative finale de 10 %.

Par cette méthode, les teneurs en créosote mesurées sont de 1,2 kg, 9,0 kg, 7,5 kg et 0,5 kg par m<sup>3</sup> de bois traité, respectivement pour le chêne, les deux échantillons de pin



et le sapin. Elles sont indicatives pour les trois échantillons de leur durée d'utilisation et de leur capacité d'absorption. En effet, le chêne et le sapin sont des bois qui ont vécu plusieurs années d'exposition à l'air libre et aux intempéries. La teneur en créosote dans le poteau neuf en pin n'est pas surprenante quand on sait qu'il est constitué de l'essence dont la capacité d'absorption est la plus élevée et qu'il n'a jamais été soumis aux aléas climatiques. La valeur mesurée pour le poteau usagé en pin apparaît encore élevée. Ce résultat est toutefois cohérent quand on sait que le poteau a été utilisé peu d'années dans des conditions extérieures protégées (massif forestier vosgien).

## CONCLUSIONS

Si la chromatographie en phase gazeuse est largement utilisée pour la séparation et la quantification de molécules dans un mélange, cette technique s'avère fastidieuse et longue quand il s'agit de l'appliquer à un fongicide comme la créosote qui est un mélange complexe contenant une centaine de molécules organiques différentes, la quantification individuelle de chaque molécule dans le mélange s'avérant être l'étape limitante. Il apparaît essentiel de connaître précisément la teneur totale en créosote dans ces déchets, en particulier afin d'estimer la performance d'un procédé de traitement. Cette étude visait à mettre au point un protocole rapide de quantification de la teneur totale en créosote dans des bois imprégnés en utilisant une autre technique que la chromatographie en phase gazeuse.

La spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier a été retenue car elle permet, par la mesure de l'absorbance dans un domaine caractéristique, de quantifier la teneur globale en contaminant. Toutes les molécules du mélange présentant un caractère aromatique absorbent dans un domaine spécifique des vibrations de valence C-H ( $sp^2$ ).

L'étape d'extraction par soxhlet limite la précision de cette méthode à 10 %. La répartition du fongicide au fil des années d'utilisation n'est pas toujours homogène et contribue à une variabilité de la concentration en créosote dans les éprouvettes.

**J. Rauch** \*\*\* : Doctorant ; **G. Trouvé** \* : Professeur ; **L. Delfosse** \* : Professeur et **S. Durécu** \*\* : Responsable du Département recherche, Tredi

\* Laboratoire gestion des risques et environnement, 25 rue de Chemnitz, 68200 Mulhouse

\*\* Tredi Département recherche, 9 avenue de la Forêt de Haye, BP 184, 54505 Vandœuvre-lès-Nancy

## Références

- [1] Becker L., Matuscheck G., Lenoir D., Ketrup A. (2001) *Thermal degradation of wood treated with creosote*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol 57, p 15-36.
- [2] Betts W. D. (1990) *Information about Coal-Tar Creosote for wood preservation*. Proceedings of the International Tar Conference, Paris.
- [3] Chagger H. K., Kendall A., Mc Donald A, Poukashanian A. and Williams A (1998) *Formation of dioxins and other semi-volatile organic compounds in biomass combustion*. Applied Energy, Vol 60, 101.
- [4] Hery, J. S (2000) *Process for the recycling of treated wood and the installation for the application of the process* United States Patent N° 6 035 791.
- [5] Demirbas A., (1998) *Yields of oil products from thermochemical biomass conversion*. Energy Conversion and Management, Vol 39, 685.
- [6] Helsen L., van den Bulck E., Mullens S., Mullens J. (1999) *Low temperature pyrolysis of CCA treated wood : thermogravimetric analysis*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol 52, p 65-86.
- [7] Helsen L., van den Bulck E. (2000) *Metal behaviour during low-temperature pyrolysis of chromated copper arsenate-treated wood waste*. Environmental Science and Technology, Vol 34, N° 14, p 2931-2938.
- [8] Kohler M., Künninger T., Schmid P., Gujer E., Crockett R. and Wolfensberger M. (2000) *Inventory and emission factors of creosote, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), and phenols from railroad ties treated with creosote*. Environmental Science and Technology, Vol 34, p 4766-4772.
- [9] Lantz S.E., Montgomery M.T., Schultz W.W., Pritchard P.H., Spargo B.J. and Mueller J.G. (1997) *Constituents of an organic wood preservative that inhibit the fluoranthene-degrading activity of sphingomonas paucimobilis strain EPA 505*. Environmental Science and Technology, Vol 31, n° 12, p 3573-3580.
- [10] Meyer S., Cartellieri S. and Steinhart H. (1999) *Simultaneous determination of PAHs, hetero-PAHs (N, S, O) and their degradation products in creosote-contaminated soils. Method development, validation, and application to hazardous waste sites*. Analytical Chemistry, Vol 71, n° 18, p 4023-4029.
- [11] Mueller J.G., Lantz S.E., Blattmann B. O., and Chapman P. J. (1991) *Bench-scale evaluation of alternative biological treatment processes for the remediation of pentachlorophenol and creosote-contaminated materials : solid-phase remediation*. Environmental Science and Technology, Vol 25, n° 6, p 1045-1955.
- [12] Afnor (1994) norme française en 350-1 *Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Durabilité naturelle du bois massif. Partie 1 : guide des principes d'essai et de classification de la durabilité naturelle du bois*.
- [13] Orfao J. J. M., Antunes F. J. A., Figueiredo J.L. (1999) *Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials - Three independent reactions model*. Fuel, Vol 78, p 349-358.
- [14] Quirino W. F. (2000) *Valorisation énergétique de déchets de bois par pyrolyse étagée*. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, France.

### DÉCHETS SCIENCES & TECHNIQUES, REVUE FRANCOPHONE D'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE

SAP - 7, chemin de Gordes - 38100 Grenoble - Tél. : 04 76 43 28 64 - Fax : 04 76 56 94 09 - Mél : [dst@pro-environnement.com](mailto:dst@pro-environnement.com)

Service abonnement : Joséphine Sambito/SAP (téléphoner du lundi au vendredi de 9 h à 12 h et de 13 h à 16 h).

N° de commission paritaire : 76929 - N° ISSN : 0753-3454. Dépôt légal : 556 septembre 2003 - Imprimerie Louis Jean/Gap - Photocomposition SAP

Principaux associés : Groupe Reed Exposition France.