



**HAL**  
open science

# Fossiles moléculaires d'intérêt microbiologique, pétrolier, agronomique et environnemental

Eric Lichtfouse

► **To cite this version:**

Eric Lichtfouse. Fossiles moléculaires d'intérêt microbiologique, pétrolier, agronomique et environnemental. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 1998. tel-00173971

**HAL Id: tel-00173971**

**<https://theses.hal.science/tel-00173971>**

Submitted on 21 Sep 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# MÉMOIRE SUR TRAVAUX

présenté pour obtenir

l'Habilitation à Diriger des Recherches  
de l'Institut National Polytechnique de Lorraine

par

**Éric LICHTFOUSE**

---

**FOSSILES MOLÉCULAIRES D'INTÉRÊT MICROBIOLOGIQUE,  
PÉTROLIER, AGRONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL**

---

Soutenu le 16 décembre 1998 devant la commission d'examen :

<b>Francis ANDREUX</b>	Professeur à l'Université de Bourgogne
<b>Philippe GARRIGUES</b>	Directeur de Recherche au C.N.R.S.
<b>Jean-Louis MOREL</b>	Professeur à l'I.N.P.L.
<b>Michel ROHMER</b>	Professeur à l'Université de Strasbourg
<b>Étienne ROTH</b>	Professeur Honoraire au C.N.A.M.
<b>Pierre STENGEL</b>	Directeur de Recherche à l'I.N.R.A.

# SOMMAIRE

## **SYNTHÈSE DES TRAVAUX :**

Fossiles moléculaires d'intérêt microbiologique, pétrolier, agronomique et environnemental . . . . .	5
1. LES FOSSILES MOLÉCULAIRES . . . . .	7
2. APPLICATION EN MICROBIOLOGIE . . . . .	8
Découverte des hopanoïdes bactériens	
Des fossiles orphelins	
3. APPLICATION EN GÉOCHIMIE PÉTROLIÈRE . . . . .	10
Reconstruction du paléoenvironnement	
Identification des réactions géochimiques	
Paramètres moléculaires de maturité	
Migration du pétrole	
4. APPLICATION EN AGRONOMIE . . . . .	14
Indicateurs de source végétale	
Indicateurs de source microbienne	
Mise en évidence de liens biogéniques	
Identification de polymères aliphatiques	
Des liaisons fortes	
Des liaisons faibles	
Étude de la dynamique moléculaire	
5. APPLICATION EN ENVIRONNEMENT . . . . .	20
Principe	
Cas de contamination diffuse	
Cas de contamination ponctuelle	
Hopanes et stéranes pétroliers	
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	
6. CONCLUSION . . . . .	24
7. PERSPECTIVES : GÉOCHIMIE ORGANIQUE ENVIRONNEMENTALE . . . . .	25
Introduction	
Marqueurs de source anthropique	
Marqueurs de biodégradation	
Marqueurs de maturité	
8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . . . .	27
<b>CURRICULUM VITAE . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>ACTIVITÉS D'ADMINISTRATION . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>ACTIVITÉS D'ENCADREMENT . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>ANIMATION DE LA RECHERCHE . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>LISTE DES COMMUNICATIONS . . . . .</b>	<b>42</b>
<b>ARTICLES . . . . .</b>	<b>49</b>

**SYNTHÈSE DES TRAVAUX**  
**Fossiles moléculaires d'intérêt microbiologique,**  
**pétrolier, agronomique et environnemental**

Cette synthèse a été publiée dans l'Actualité Chimique. Référence :

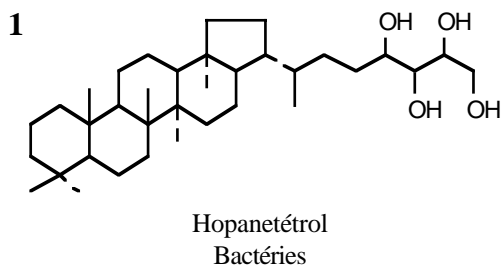
Fossiles moléculaires d'intérêt microbiologique, pétrolier, agronomique et environnemental.

E. Lichtfouse

*L'Actualité Chimique* pp. 5-19, avril 2000.

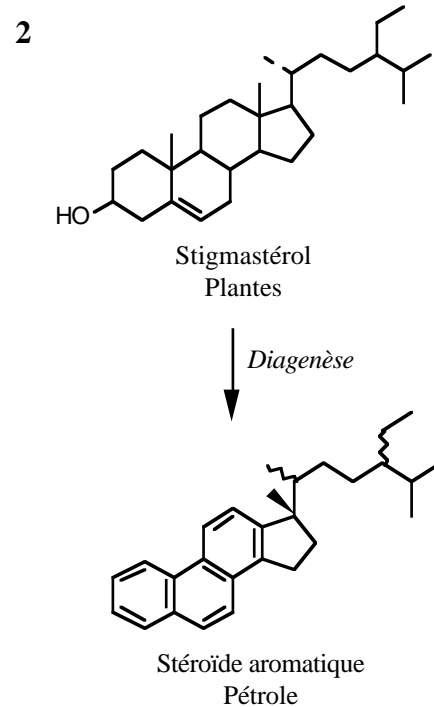
## 1. LES FOSSILES MOLÉCULAIRES

La matière organique des sols et des sédiments est issue de la transformation des tissus biologiques après la mort des organismes vivants (Welte, 1970, Schnitzer, 1991). Elle est constituée de substances provenant d'organismes comme les plantes, les algues et les bactéries (Schreiner et Shorey, 1909, 1911, Eglinton et Murphy, 1969, Albrecht et Ourisson, 1971, Eglinton, 1973, Amblès *et al.*, 1989, Ries-Kautt et Albrecht, 1989, Diné *et al.*, 1990, Lichtfouse *et al.*, 1992). Le stigmastérol, par exemple, est une molécule biologique typique des plantes supérieures (Schreiner et Shorey, 1911, Huang et Meinschein, 1976, 1979), alors que le hopanétérol est présent dans les bactéries (1, Ourisson *et al.*, 1979, Rohmer *et al.*, 1984).



Après leur introduction dans le milieu géologique, ces substances biologiques sont altérées sous l'influence de la biodégradation, de la température et de la pression (Tissot et Welte, 1984). L'étude des changements de structure moléculaire au cours de l'enfouissement a permis de déterminer la nature des principales réactions géochimiques subies par la matière organique, notamment la défonctionnalisation, la décarboxylation, la condensation, la vulcanisation, l'aromatisation et le craquage (Mackenzie *et al.*, 1982, Tissot et Welte, 1984, Sinninghe Damsté et De Leeuw, 1990). Le stigmastérol est ainsi déshydraté, déméthylé et déshydrogéné au cours de la lente diagenèse pour former des stéroïdes aromatiques dans les sédiments matures et les pétroles (2, Riolo *et al.*, 1986, Lichtfouse, 1989, Lichtfouse *et al.*, 1994a). Les fossiles moléculaires sont

des indicateurs de source et de transformation qui ont donné lieu à de nombreuses applications (Tissot et Welte, 1984, Moldowan *et al.*, 1992, Connan *et al.*, 1992, Peters et Moldowan, 1993, Killops et Killops, 1993, Engel et Macko, 1993).

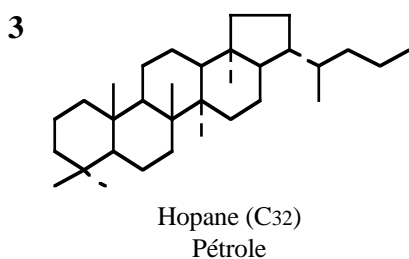


Dans cette synthèse, nous allons tout d'abord montrer que l'identification de fossiles moléculaires peut conduire de façon inattendue à la découverte de nouvelles substances biologiques. Puis nous décrirons leur utilisation en tant que paramètre de source et de transformation en géochimie pétrolière. Nous découvrirons ensuite qu'ils s'avèrent de puissants outils d'étude de la formation et de la dynamique de l'humus des sols. Nous expliquerons aussi comment ils peuvent authentifier la contamination des sols et des plantes par les produits pétroliers. Enfin, nous proposerons quelques axes de recherche qui s'intègrent dans une discipline scientifique en émergence, la géochimie organique environnementale.

## 2. APPLICATION EN MICROBIOLOGIE

### Découverte des hopanoïdes bactériens

Après 1970, les géochimistes organiciens identifièrent de nombreux dérivés hopaniques en C<sub>27</sub>-C<sub>35</sub> dans les sédiments, les sols, les pétroles et les charbons (3, Van Dorsselaer *et al.*, 1974, 1977). À cette époque, leur origine biologique reste mystérieuse car on ne connaît qu'une dizaine de hopanoïdes synthétisés par des arbres, avec toutefois un nombre de carbone ne dépassant pas 30. Il est alors difficile d'expliquer la présence ubiquiste de leurs fossiles dans les sédiments, en particulier dans des pétroles dont la contribution végétale est souvent mineure.



Les précurseurs biologiques des hopanoïdes fossiles doivent donc probablement se trouver dans des organismes ubiquistes. Or, en analysant de façon méticuleuse quelques souches de bactéries, Rohmer et Ourisson (1976a-c) identifient des hopanotétrols dont le

nombre de carbone de 35 explique bien la présence de fossiles en C<sub>27</sub>-C<sub>35</sub> par dégradation de la chaîne latérale.

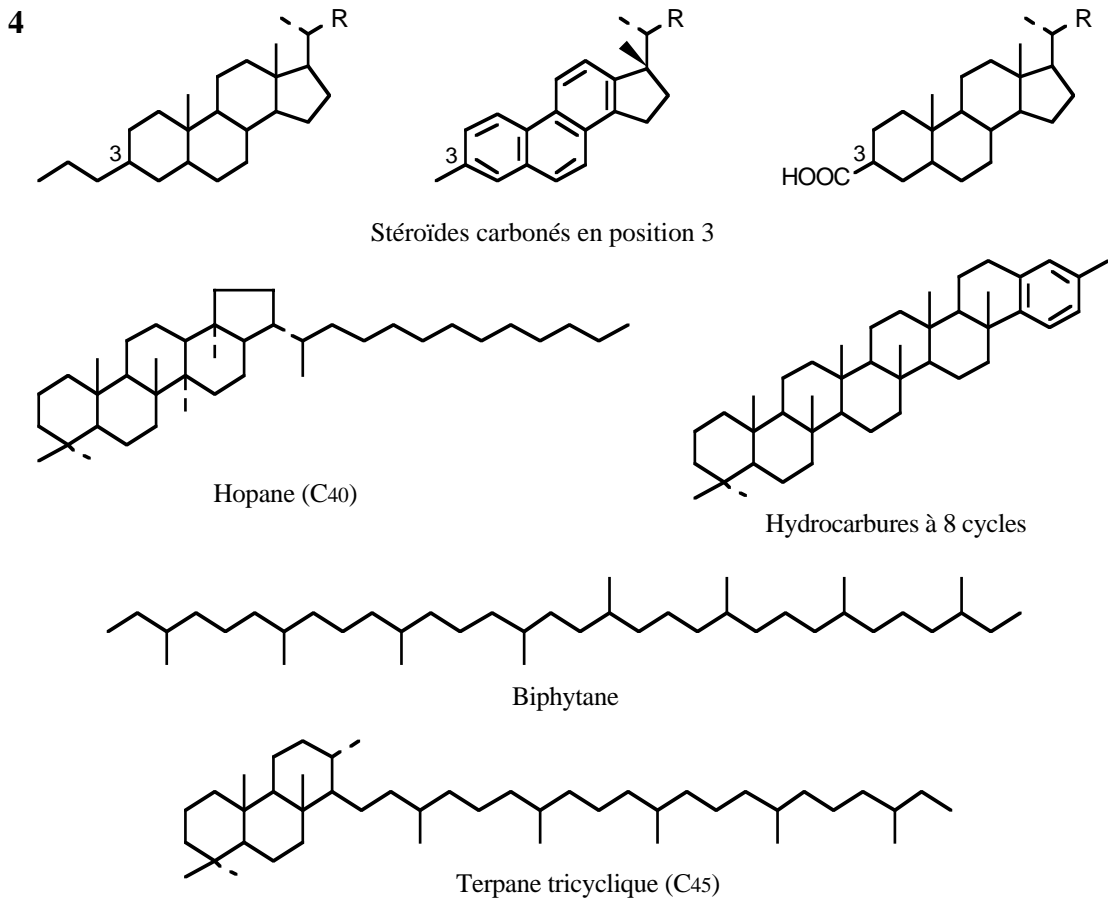
La raison pour laquelle ces hopanols bactériens n'ont pas été identifiés plus tôt est d'ordre analytique. En effet, la séparation classique des lipides comporte une étape de trois lavages de la phase organique à l'eau distillée au cours de laquelle les hopanols, substances amphiphiles, sont transférés vers la phase aqueuse puis dans l'évier.

Ces résultats montrent que l'analyse d'échantillons géologiques âgés de plusieurs centaines de millions d'années a suscité la découverte des hopanoïdes bactériens (Ourisson *et al.*, 1982, 1987a). Ces substances biologiques revêtent une importance particulière parce qu'elles sont très probablement les précurseurs phylogénétiques des stérols, molécules ubiquistes chez les eucaryotes. Les hopanoïdes joueraient ainsi des rôles physiologiques analogues, notamment en tant que renforçateurs membranaires (Ourisson *et al.*, 1987b). Nous allons maintenant exposer la découverte de fossiles moléculaires dont les précurseurs biologiques sont encore inconnus.

### Des fossiles orphelins

De nombreux dérivés stéroïdiques ont été identifiés dans les sédiments et pétroles (Mackenzie *et al.*, 1982). Leur présence dans le milieu géologique peut être expliquée par la transformation diagénétique des stérols d'organismes vivants comme les plantes supérieures, les algues et les champignons (Mackenzie *et al.*, 1982). Toutefois, plusieurs groupes identifient des stéroïdes fossiles dont la structure singulière est difficile à corréler avec les stérols biologiques (4). Ainsi, des stéranes alkylés en position 2 ou 3 sont présents dans des sédiments d'âges variés (Summons et Capon, 1988, 1991, Dahl *et al.*, 1992). Puis, des stéroïdes triaromatiques méthylés en position 2, 3 ou 6 sont identifiés dans les sédiments matures et les pétroles du Jurassique du bassin de Paris (Lichtfouse *et al.*, 1990, Lichtfouse et Albrecht, 1994). Enfin, des stéranes carboxylés en position 3 sont mis en évidence dans les sédiments potassiques Eocène d'Alsace (Dany *et al.*, 1990). C'est la présence de substituants carbonés en position 3 sur ces fossiles qui est particulièrement préoccupante car aucun stérol biologique connu ne possède une telle structure. En outre, il est difficile d'expliquer l'ajout d'un carbone en

position 3 par un processus diagénetique. Ainsi, la présence de substituants carbonés de nature variée en position 3 suggère l'existence d'un précurseur biologique chez les organismes vivants (Lichtfouse *et al.*, 1993).

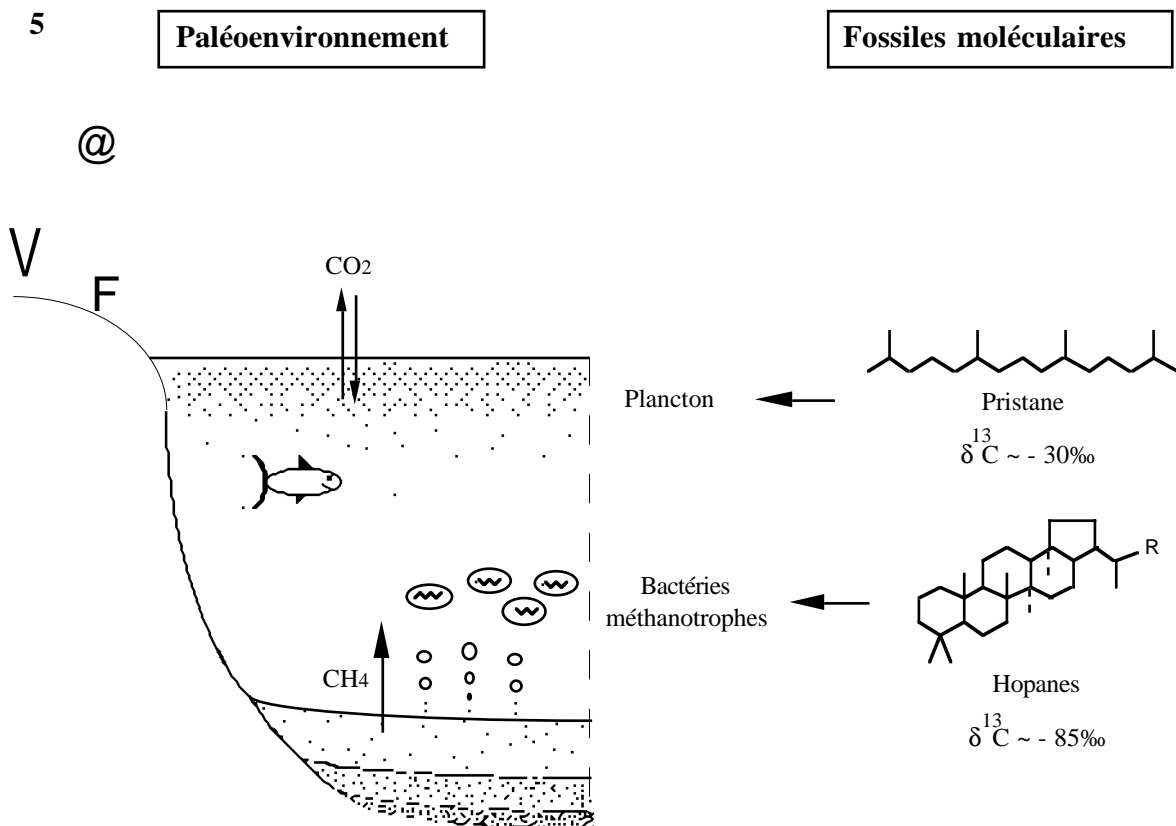


Il existe actuellement plusieurs familles de fossiles "orphelins" ou "coelacanthés moléculaires", c'est à dire des molécules géologiques dont les précurseurs biologiques n'ont pas encore été identifiés (4, Ourisson *et al.*, 1982). Tout d'abord, Rullkötter et Philip (1981) ont identifié des hopanes dont le nombre de carbone s'étend jusqu'à 40 dans un bitume du Silurien, alors que ce nombre n'atteint que 35 chez les hopanols bactériens connus. D'autre part, en brisant les liaisons des macromolécules organiques sédimentaires avec des réactifs spécifiques Chappe *et coll.* (1979) ont mis en évidence de longs hydrocarbures, le biphytane par exemple. Ces fossiles sont probablement dérivés des lipides membranaires des archaé vivant actuellement dans les niches écologiques aux conditions extrêmes de température, de salinité et d'anaérobiose (De Rosa *et al.*, 1986). Des terpanes tricycliques dont le nombre de carbone varie de 19 à 45 ont été identifiés dans les sédiments et pétroles (Aquino Neto *et al.*, 1982, Moldowan *et al.*, 1983, Heissler *et al.*, 1984). Leur origine biologique est difficile à cerner quoique l'hypothèse la plus satisfaisante soit une source microbienne (Heissler *et al.*, 1984). Enfin, Schaeffer *et coll.* (1994) ont mis en évidence des hydrocarbures possédant de 4 à 8 cycles dans les schistes Eocène de Messel. La biosynthèse de leurs précurseurs biologiques pourrait avoir eu lieu à partir de polyprénols dans des organismes dont l'origine reste inconnue. En conclusion, l'identification de fossiles moléculaires peut conduire à la découverte de nouvelles substances biologiques. Nous allons montrer maintenant que les molécules fossiles s'avèrent utiles pour étudier l'origine et le devenir de la matière organique sédimentaire.

### 3. APPLICATION EN GÉOCHIMIE PÉTROLIÈRE

#### Reconstruction du paléoenvironnement

L'étude isotopique des molécules sédimentaires peut livrer des informations sur l'environnement du milieu de dépôt (Hayes *et al.*, 1990, Jasper et Hayes, 1990, Collister *et al.*, 1992, Lichtfouse et Budzinski, 1995). Ainsi la structure moléculaire permet de préciser la nature du précurseur biologique. Le pristane sédimentaire, par exemple, provient en majeure partie du phytol de la chlorophylle (Peters et Moldowan, 1993). En outre, grâce à la mise au point de l'analyse du carbone 13 au niveau moléculaire (Sano *et al.*, 1976, Matthews et Hayes, 1978, Barrie *et al.*, 1984, Hayes *et al.*, 1990, Lichtfouse *et al.*, 1991, Lichtfouse et Budzinski, 1995), il est possible d'obtenir des informations sur la place de l'organisme précurseur dans la chaîne alimentaire.

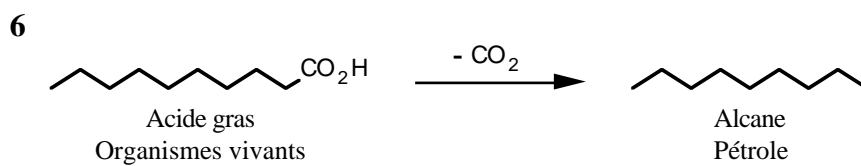


Ainsi la composition isotopique en carbone 13 du pristane (-30‰) des sédiments Eocène de Green River montre que ce fossile provient de la chlorophylle du plancton, notamment à cause de valeurs identiques observées pour les stéranes algues (5, Collister *et al.*, 1992). La présence des hopanes révèle une contribution bactérienne. De surcroît, leurs compositions isotopiques très appauvries en carbone 13 (-85‰) indiquent une provenance de bactéries méthanotrophes, d'une part parce que le méthane biogénique issu de la décomposition de la matière organique est appauvri en carbone 13 (<-60‰, Deines, 1980, Schoell, 1980), et d'autre part parce que l'appauvrissement isotopique entre le substrat et les lipides des bactéries méthanotrophes peut atteindre 40‰ (Summons *et al.*, 1994). Les études moléculaires s'avèrent donc utiles pour préciser quel maillon le précurseur biologique occupe dans la chaîne alimentaire d'un milieu complexe. Enfin, la prédominance de ces marqueurs algues et bactériens indique que la matière organique est susceptible de générer du pétrole léger par pyrolyse ou au cours de l'enfouissement.



## Identification des réactions géochimiques

Au cours de l'enfouissement la matière organique sédimentaire se transforme lentement sous l'action de la biodégradation, de la pression, de la température et de la catalyse par les minéraux (Tissot et Welte, 1984). Toutefois la nature exacte des réactions chimiques mises en jeu est difficile à cerner, notamment à cause de l'extrême complexité du milieu et en raison de la difficulté à suivre en temps réel les transformations moléculaires. À cet égard, la formation des alcanes linéaires, constituants majeurs du pétrole, peut être expliquée par plusieurs mécanismes faisant intervenir des précurseurs variés (Collister *et al.*, 1994a, Tissot et Welte, 1984) : la préservation des alcanes des cires végétales (Eglinton et Hamilton, 1967, Huc, 1976, Tegelaar *et al.*, 1989); la réduction des alcènes linéaires alguaire (Gelpi *et al.*, 1968, 1970, Lichtfouse *et al.*, 1994b) et des alcools végétaux (Eglinton et Hamilton, 1967, Kolattukudy, 1976, 1980); la décarboxylation des acides gras (6, Cooper et Bray, 1963, Behar et Albrecht, 1984) et le craquage du kérogène (Durand, 1980, Behar *et al.*, 1984, Behar et Vandenbroucke, 1988).

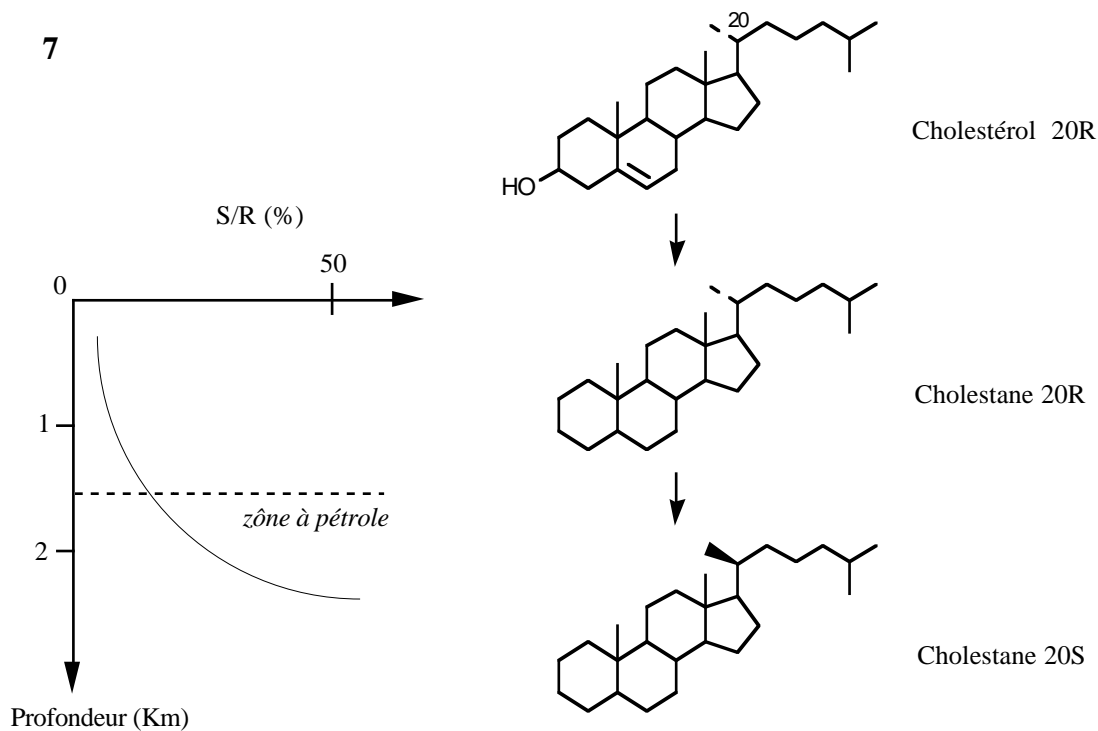


L'hypothèse de formation des alcanes par décarboxylation des acides gras est étayée par plusieurs observations. Tout d'abord, la transformation de la matière organique génère d'importantes quantités de dioxyde de carbone (Tissot et Welte, 1984). D'autre part, la distribution des alcanes linéaires fossiles est souvent marquée par une forte prédominance des homologues à nombre de carbone impair (25, 27, 29...) alors que les acides gras biologiques montrent presque toujours une prédominance paire (26, 28, 30...), d'où l'idée d'une décarboxylation (Bray et Evans, 1961, Cooper, 1962, Cooper et Bray, 1963). Cette corrélation entre précurseur acide et produit saturé est aussi mise en évidence par Behar et Albrecht (1984) dans le cas d'hydrocarbures polycycliques de structure spécifique. Pour simuler les réactions géochimiques Shimoyama et Johns (1972) chauffent à 250°C des acides gras purs en présence d'argile ou de carbonate, et obtiennent bien des alcanes linéaires. La pyrolyse d'acides humiques, substances riches en fonctions carboxyliques, livre le même résultat (Fukushima, 1982). Enfin, Lichtfouse et Collister (1992) mettent en évidence une corrélation isotopique entre les acides gras à nombre de carbone impair et les alcanes linéaires à nombre de carbone pair dans les schistes Eocène de la formation de Green River, Colorado.

La formation des alcanes linéaires fossiles s'explique donc bien par la décarboxylation des acides gras (6). Toutefois, d'autres voies ne sont pas exclues car l'hétérogénéité des compositions isotopiques des alcanes linéaires suggère l'existence de sources multiples (Collister *et al.*, 1994a). L'étude de la structure et de la composition isotopique des fossiles moléculaires s'avère donc utile pour identifier les réactions géochimiques opérant dans les milieux complexes. À cet égard, cette démarche apparaît prometteuse pour étudier le devenir des constituants organiques et des xénobiotiques au sein des écosystèmes modernes (Lichtfouse et Budzinski, 1995, Lichtfouse et Eglinton, 1995, Lichtfouse, 1998).

## Paramètres moléculaires de maturité

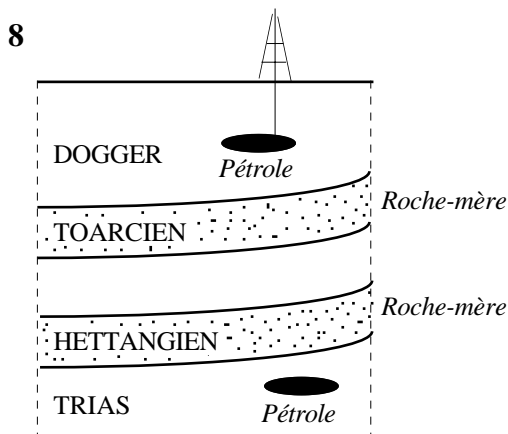
Les fossiles moléculaires sont utilisés pour étudier la transformation de la matière organique, notamment dans les bassins pétroliers (Tissot et Welte, 1984, Peters et Moldowan, 1993). Le principe repose sur les altérations des structures moléculaires au cours de l'enfouissement (Seifert, 1978, Seifert et Moldowan, 1978, 1979, 1981). D'une manière générale, dans les sédiments de surface les fossiles ont une configuration proche de celle des molécules biologiques (7). Puis, avec l'enfouissement, ils adoptent progressivement une configuration "géologique" plus stable (Ensminger *et al.*, 1978, Mackenzie *et al.*, 1980). Ainsi le cholestérol de configuration "biologique" 20R se transforme tout d'abord en cholestane 20R dans les sédiments immatures. Puis, dans les sédiments profonds du bassin de Paris, on observe la formation progressive du cholestane "géologique" 20S dont la proportion dépasse 50% dans la zone à pétrole (> 1,5 Km).



Il est donc possible de mesurer la maturité de la matière organique sédimentaire à l'aide des isomères "biologiques" et "géologiques". C'est notamment un moyen de distinguer les sédiments matures qui ont pu générer du pétrole de ceux dont le kérogène est encore trop immature (Lichtfouse et Rullkötter, 1994). En outre, dans la partie suivante nous allons montrer que de tels indices moléculaires s'avèrent particulièrement utiles pour corréler les réservoirs de pétrole avec leur roches-mères présumées. On entrevoit aussi l'éventuelle utilisation des fossiles matures comme le cholestane 20S en tant que marqueurs des combustibles fossiles dans les situations de contamination de l'environnement moderne (Lichtfouse *et al.*, 1997b, Bryselbout *et al.*, 1998).

## Migration du pétrole

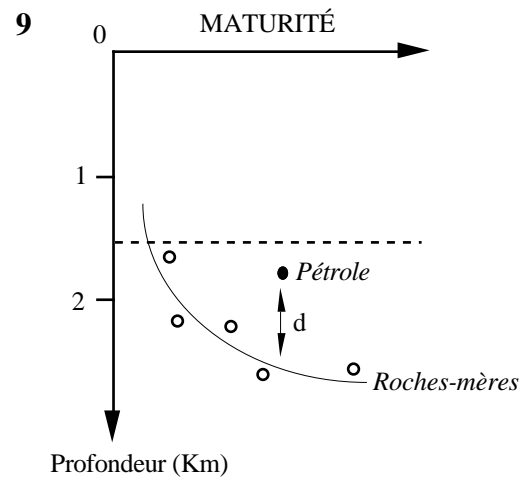
Dans le bassin de Paris les deux principales roches-mères sont les formations du Toarcien et de l'Hettangien (8). Les réservoirs de pétrole sont situés soit au-dessus dans le Dogger, soit en dessous dans le Trias (Tissot *et al.*, 1971, Espitalié *et al.*, 1987, 1988). Il est ainsi difficile de préciser quelle roche-mère contribue à l'accumulation des pétroles. Il s'ensuit que les chemins de migration du pétrole sont peu connus.



Or, à l'aide d'un nouveau paramètre basé sur les stéroïdes aromatiques, Lichtfouse *et coll.* (1994a) distinguent la maturité de la matière organique du Toarcien (32%) de celle de l'Hettangien (49%). Comme les pétroles livrent des valeurs intermédiaires (38%), c'est la contribution de l'Hettangien qui s'avère quantitativement la plus importante. En effet, la formation du pétrole s'explique bien dans un premier temps par une expulsion de matière organique à partir des roches de l'Hettangien. Puis, au cours du temps, la

maturité des fossiles moléculaires de l'Hettangien continue à augmenter alors que le réservoir, moins chaud et moins riche en argiles, est sujet à une maturation plus lente. L'accumulation du pétrole est donc principalement due à une expulsion à partir des roches de l'Hettangien suivie de migration vers les formations du Trias et du Dogger.

Lichtfouse *et coll.* (1994a) ont proposé un moyen de calculer la distance de migration du pétrole à l'aide des fossiles moléculaires (9). Le principe repose sur le fait que la maturité de la roche-mère est généralement au moins égale à celle du pétrole. La distance minimale de migration verticale est alors déterminée par différence entre la profondeur de la roche-mère d'isomaturité et celle du réservoir. Cette distance est estimée à 440 m dans le bassin de Paris en utilisant plusieurs paramètres moléculaires basés sur les isomères des stéroïdes (Lichtfouse *et al.*, 1994a).



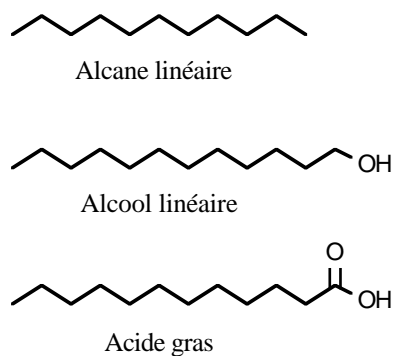
En conclusion, les fossiles moléculaires s'avèrent de puissants outils pour étudier les sources, la transformation et le transfert de la matière organique sédimentaire. Dans les parties suivantes nous montrerons que ces concepts développés dans le domaine sédimentaire trouvent des applications en recherche agronomique et environnementale.

#### 4. APPLICATION EN AGRONOMIE

##### Indicateurs de source végétale

Le concept d'indicateur de source biologique fondé sur les fossiles moléculaires peut être appliqué à l'étude des matières humiques du sol. En effet, les sources biologiques et les réactions chimiques qui président à l'accumulation de l'humus sont aussi très peu connues. Parmi la multitude des constituants organiques du sol, prenons l'exemple des alcanes, des alcools et des acides gras linéaires (10, Schnitzer et Neyroud, 1975, Jambu *et al.*, 1978, Moucawi *et al.*, 1981, Schnitzer *et al.*, 1986, Amblès *et al.*, 1990, 1991, Diné *et al.*, 1990).

10



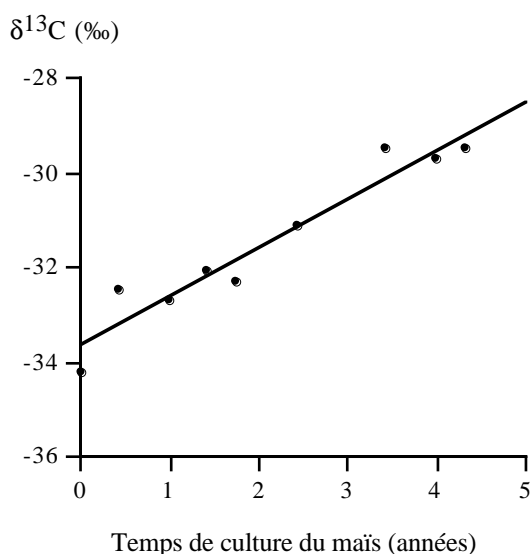
Ces molécules peuvent provenir de la décomposition d'organismes variés comme les plantes, les algues, les bactéries, les champignons et les insectes (Eglinton et Hamilton, 1967, Gelpi *et al.*, 1968, Kolattukudy, 1976). L'hypothèse de l'origine végétale est étayée par plusieurs observations.

Tout d'abord, leurs distributions montrent une forte prédominance, soit des homologues pairs pour les alcools et les acides gras, soit des homologues impairs pour les alcanes (Jambu *et al.*, 1978, Amblès *et al.*, 1990, 1991, 1994, Lichtfouse *et al.*, 1997a). Ces distributions particulières sont semblables à celles des

cires cuticulaires des plantes (Eglinton et Hamilton, 1967). D'autre part, leurs compositions en carbone 13 (Lichtfouse *et al.*, 1995a, Lichtfouse, 1998) sont analogues à celles des plantes (Rieley *et al.*, 1991, 1993, Collister *et al.*, 1994b). De surcroît, Lichtfouse *et coll.* (1995a) observent l'absence de leur marquage isotopique en incubant des sols avec du glucose-<sup>13</sup>C, permettant ainsi d'écarter une contribution microbienne.

11

##### Marquage de l'alcane du sol



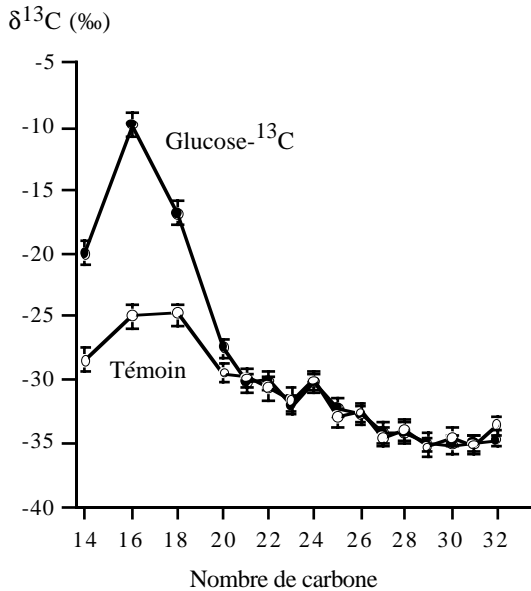
Enfin, en utilisant la technique de marquage au carbone 13 par culture de maïs (Cerri *et al.*, 1985, Balesdent *et al.*, 1987), Lichtfouse *et coll.* (1994c) mettent en évidence l'enrichissement en carbone 13 des alcanes à longues chaînes du sol, authentifiant ainsi la contribution végétale (11). Ainsi ces résultats démontrent l'origine végétale des alcanes, des alcools et des acides gras linéaires à longues chaînes du sol. Nous allons voir maintenant qu'il existe aussi des indicateurs moléculaires microbiens.

### Indicateurs de source microbienne

La présence d'acides gras à courtes chaînes dans les sols et dans les sédiments est souvent attribuée à une contribution bactérienne (Parker et Leo, 1965, Parker *et al.*, 1967, Perry *et al.*, 1979, Grimalt et Saiz-Jimenez, 1989, Grimalt *et al.*, 1989, Thompson *et al.*, 1993). Néanmoins d'autres sources biologiques sont possibles car les acides gras sont des constituants ubiquistes chez les organismes vivants. Les acides gras à chaînes courtes peuvent être aussi formés par dégradation des alcanes, des alcools et des acides gras à chaînes longues (Morrison, 1969). Afin de distinguer ces diverses contributions, Lichtfouse *et coll.* (1995a) ont incubé un sol agricole à l'obscurité avec du glucose-<sup>13</sup>C. Ils observent un enrichissement des acides gras linéaires en C<sub>14</sub>, C<sub>16</sub> et C<sub>18</sub> (12). Ce résultat confirme donc la synthèse microbienne de ces acides.

12

#### Marquage des acides gras du sol

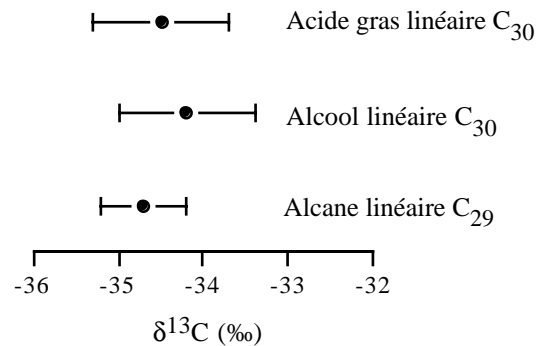


### Mise en évidence de liens biogéniques

L'humus étant constitué de nombreuses molécules provenant de sources multiples, il est difficile d'établir des relations de parenté entre les différentes classes de substances. Or, en étudiant les lipides du sol, Lichtfouse (1998) observe que les alcanes linéaires à n carbones ont des compositions isotopiques analogues à leur précurseurs biosynthétiques, les alcools linéaires et les acides gras à n + 1 carbones (13).

13

#### Lipides du sol



Ce résultat montre que ces trois classes de molécules du sol utilisent la même voie de biosynthèse dans le même organisme. En effet, une contribution d'organismes de nature variée est très improbable à cause de la variabilité de la composition isotopique des sources de carbone et en raison de la variabilité de l'intensité des fractionnements isotopiques lors de l'assimilation et de la biosynthèse (Hayes *et al.*, 1990, Hayes, 1993). Ainsi l'étude isotopique des différentes classes de molécules du sol s'avère utile afin de préciser leurs éventuels liens biogéniques. Dans les parties suivantes nous allons montrer que cette démarche s'avère utile pour étudier les voies de formation de l'humus.

## Identification de polymères aliphatiques

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer la formation des matières humiques (Schnitzer et Khan, 1978, Huc, 1980, Bollag et Loll, 1983, Hayes *et al.*, 1989, Duchaufour, 1994). Dans l'hypothèse de l'*altération des plantes*, les parties résistantes comme la lignine sont peu modifiées et contribuent donc à la préservation de matière de haut poids moléculaire. L'hypothèse de la *synthèse microbienne* invoque une fabrication intracellulaire d'acides humiques par les microbes. L'hypothèse de la *condensation* met en jeu l'agglomération de petites molécules comme les sucres et les acides aminés (Maillard, 1916, 1917).

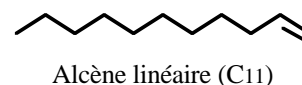
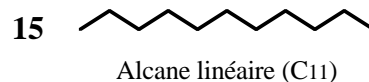
Or, en analysant divers sols cultivés, Lichtfouse *et coll.* (1995b) observent un enrichissement en carbone 13 des constituants organiques du sol par rapport à la plante. Ce résultat inattendu montre que la préservation sélective des organes végétaux ligneux, les plus résistants, est dans ce cas un processus mineur car la lignine est appauvrie en carbone 13 (Deines, 1980, Benner *et al.*, 1987). En revanche, il semble en accord avec l'hypothèse de polycondensation des acides aminés et des sucres puisque ces derniers sont enrichis en carbone 13 (Abelson et Hoering, 1961, Park et Epstein, 1961, Deines, 1980).

Néanmoins, nous suspicions l'existence d'un autre processus basé sur la synthèse microbienne de polymères aliphatiques extracellulaires, d'une part à cause de leur découverte récente dans les algues et les sédiments profonds (Largeau *et al.*, 1990, Derenne *et al.*, 1991, 1992) et d'autre part en raison de la détection de carbone aliphatique dans les sols (Hatcher *et al.*, 1981, Schulten et Schnitzer, 1990, Almendros *et al.*, 1991, Kögel-Knabner *et al.*, 1992). Dans les sédiments, ces polymères très résistants à la dégradation

apparaissent sous la forme de fines lamelles nommées "ultralaminæ".

## 14 Ultralaminæ du sol

Lichtfouse *et coll.* (1996) observent à leur tour par microscopie électronique des ultralaminæ d'une épaisseur variant de 10 à 50 µm dans l'humine d'un sol agricole (14). L'analyse moléculaire de l'humine par pyrolyse révèle en outre une suite de doublets alcane/alcène linéaires (C<sub>11</sub>-C<sub>24</sub>) typique des biopolymères aliphatiques ultrarésistants (15, Lichtfouse *et al.*, 1998a).

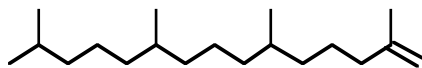


Enfin, cette contribution majeure de carbone aliphatique à l'humine est confirmée par l'analyse en résonance magnétique nucléaire du carbone 13 (Lichtfouse *et al.*, 1998a). La préservation sélective de biopolymères à chaînes aliphatiques linéaires représente donc une voie alternative expliquant la stabilisation de l'humus.

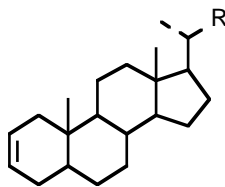
## Des liaisons fortes

L'analyse moléculaire de l'humine donne des informations sur la nature des réactions chimiques qui président à la formation de ce réseau macromoléculaire. Ainsi, Lichtfouse *et coll.* (1998b) identifient ainsi plusieurs fossiles dans un pyrolysate de l'humine, notamment du pristène, des stérènes et des hopènes (16).

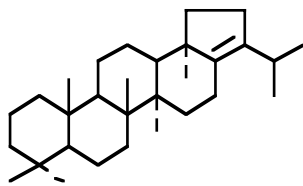
16



1-Pristène



2-Stérène



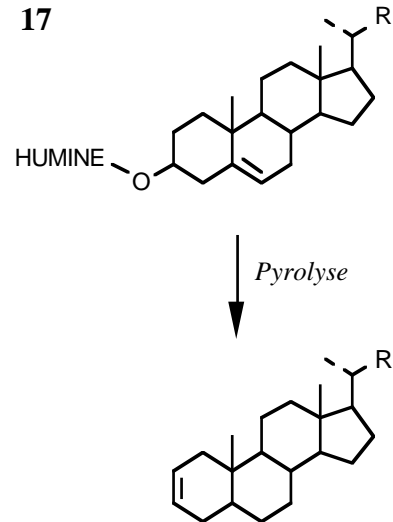
17(21)-Hopène

Tout d'abord, leur structure moléculaire spécifique indique la contribution de plusieurs sources biologiques. Ainsi, le pristène provient du phytol des organismes photosynthétiques comme les plantes, les algues et les cyanobactéries (Larter *et al.*, 1979, Peters et Moldowan, 1993). Les stérènes sont issus des stérols des eucaryotes, notamment les algues pour les homologues en C<sub>27</sub>, les champignons pour les homologues en C<sub>28</sub> et les plantes pour les homologues en C<sub>29</sub> (Huang et Meinschein, 1976, 1979, Mackenzie *et al.*, 1982). Les hopènes proviennent principalement des hopanols

bactériens (Ries-Kautt M. et Albrecht P., 1989, Ourisson et Albrecht, 1992).

D'autre part, la position de la double liaison sur le squelette de ces molécules est très proche de la position des fonctions alcools des précurseurs biologiques. Cette observation indique que les alcènes ont été formés par coupure pyrolytique des liaisons covalentes liant les précurseurs alcooliques au réseau humique (17). Les stérènes, par exemple, sont issus de la coupure des stérols liés à l'humine, probablement par des fonctions esters car les matières humiques sont très riches en groupes carboxyliques (Schnitzer, 1991).

17



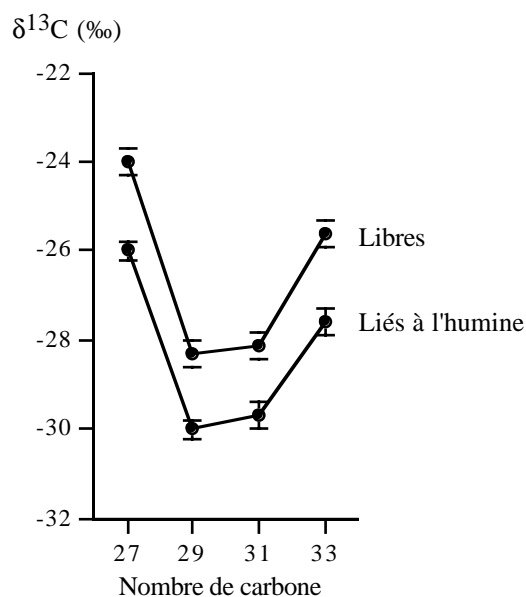
Cette hypothèse est confortée par l'identification de stérols dans les hydrolysats de fractions polaires du sol (Amblès *et al.*, 1991). Le processus d'estérification est aussi en accord avec plusieurs investigations structurales mettant en jeu des réactifs de coupure marqués (Rullkötter et Michaelis, 1990, Richnow *et al.*, 1992, Michaelis *et al.*, 1995). Les études moléculaires témoignent donc bien de l'existence de liaisons chimiques fortes au sein de l'humine. Néanmoins, nous allons voir maintenant que certaines molécules peuvent être séquestrées par des liaisons faibles.

## Des liaisons faibles

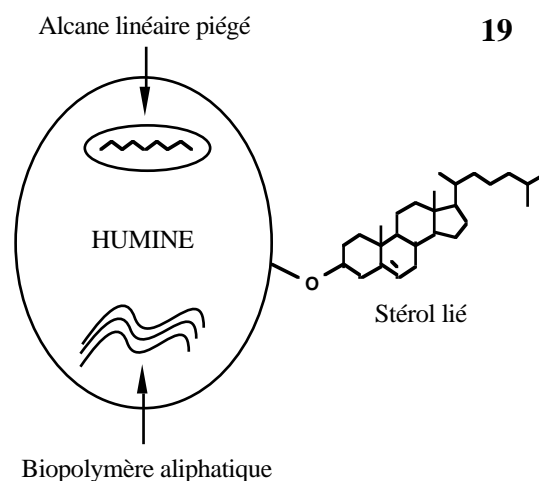
Plusieurs études suggèrent l'existence de liaisons faibles, non-covalentes, dans le réseau macromoléculaire des matières humiques. Ainsi Schnitzer et Neyroud (1975) observent que le traitement aux ultrasons des acides humiques libère des alcanes et des acides gras linéaires. Ici, bien qu'une rupture de liaisons fortes puisse expliquer la libération des acides, un tel mécanisme explique difficilement l'expulsion des alcanes, substances non-fonctionnalisées.

Par ailleurs, la préparation des kérogènes par dissolution de la matrice minérale des sédiments libère toujours une fraction organique dont une partie était probablement séquestrée par des liaisons faibles (Behar et Vandembroucke, 1988). Nanny *et coll.* (1997) mettent aussi en évidence des interactions non-covalentes entre l'acénaphthénone et les acides fulviques par résonance magnétique nucléaire. De même, Lichtfouse *et coll.* (1998a,b,c) identifient des alcanes linéaires d'origine végétale non seulement dans le sol total mais aussi dans l'extrait organique de l'humine et dans le pyrolysat de l'humine. Ces alcanes sont donc séquestrés dans le réseau de l'humine. Néanmoins, leur présence dans l'humine pourrait être éventuellement expliquée par un défaut d'extraction du sol à moins qu'un paramètre indépendant ne montrât leur appartenance à un compartiment différent. Or, Lichtfouse *et coll.* (1998c) observent que les compositions isotopiques en carbone 13 des alcanes piégés sont nettement inférieures à celles de leurs homologues libres (18). Ces différences montrent donc bien que les alcanes des cires végétales peuvent être séquestrés par des liaisons non-covalentes dans l'humus.

## 18 Alcanes linéaires du sol



En résumé, l'étude des fossiles moléculaires de l'humine a livré des informations concernant l'origine et les voies de genèse des matières humiques. Trois mécanismes de formation ont été mis en évidence (19) : la préservation sélective de biopolymères résistants à chaînes linéaires, la séquestration chimique par des liaisons fortes et la séquestration physique par des liaisons faibles.





## Étude de la dynamique moléculaire

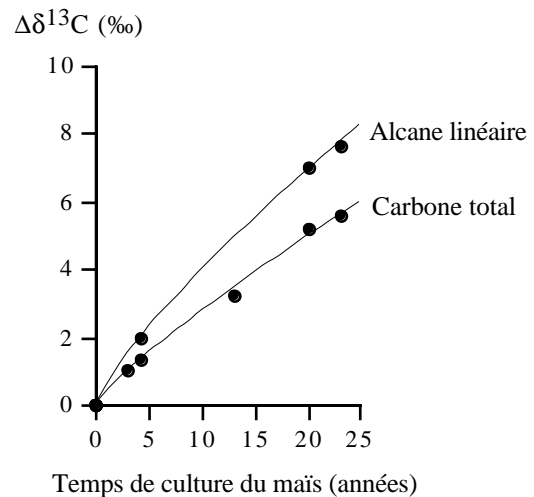
L'analyse isotopique du carbone renseigne sur la dynamique de l'humus (Jenkinson, 1965, 1968, Campbell *et al.*, 1967a,b, Nissenbaum et Kaplan, 1972, Martel et Paul, 1974, Jenkinson et Rayner, 1977, Scharpenseel et Schiffmann, 1977, Balesdent, 1987). Ainsi, la différence de teneur en carbone 13 des plantes de type C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> (Smith et Epstein, 1971, Bender, 1971, O'Leary, 1981) a suscité leur utilisation pour étudier le devenir des débris végétaux dans l'humus (Cerri *et al.*, 1985, Balesdent *et al.*, 1987, Cerling *et al.*, 1989, Mariotti et Peterschmitt, 1994). La datation au carbone 14 a aussi révélé l'existence de compartiments organiques à renouvellement très lent au sein de l'humus (Scharpenseel et Schiffmann, 1977).

En revanche, les acides fulviques se renouvellent plus rapidement (Campbell *et al.*, 1967a,b, Balesdent, 1987, Lichtfouse *et al.*, 1995c). Balesdent *et coll.* (1987) montrent aussi que les fractions granulométriques du sol ont un renouvellement très hétérogène. Enfin, Jenkinson et Rayner (1977) distinguent cinq compartiments organiques selon leur demi-vie: les matières décomposables (0,16 ans), résistantes (2,3 ans), stabilisées physiquement (50 ans) ou chimiquement (1980 ans). Ces investigations ont permis de mieux comprendre la dynamique de l'humus et de ses fractions grossières. Ici, une approche permettant d'étudier la dynamique au niveau moléculaire a été élaborée (Lichtfouse, 1995, 1997a).

Ainsi les alcanes linéaires à chaînes longues du sol, fossiles des cires végétales (Eglinton et Hamilton, 1967), sont marqués par culture du maïs (20, Lichtfouse, 1995). À cet égard, des analyses de lipides

de sédiments et des expériences de décomposition de végétaux (Freeman *et al.*, 1994, Huang *et al.*, 1997) permettent d'écarter un éventuel biais isotopique.

20



Le marquage isotopique permet de mesurer la part de carbone provenant du maïs. Ainsi l'alcane en C<sub>31</sub> du sol cultivé 23 ans contient 50% de carbone issu du maïs. Le renouvellement de cette molécule est déterminé avec une loi cinétique du premier ordre (Lichtfouse, 1997a). Ce calcul révèle que la demi-vie de l'alcane (22,4 ans) est plus courte que celle de l'humus (28,8 ans). Ce résultat est en accord avec la présence des alcanes dans la fraction extractible dont la disponibilité est *a priori* plus forte. En résumé, les fossiles moléculaires s'avèrent de puissants outils pour étudier les sources biologiques et les processus présidant à la formation de l'humus.

## 5. APPLICATION EN ENVIRONNEMENT

### Principe

Les écosystèmes modernes sont potentiellement contaminés à divers degrés par des produits fossiles d'origine naturelle ou anthropique. Dans les situations de contaminations à l'état de traces dans les milieux complexes, il est souvent difficile d'authentifier l'origine fossile de molécules présentes. Néanmoins, nous allons montrer ici que les investigations combinant l'identification de fossiles moléculaires, la datation au carbone 14 et le marquage au carbone 13 s'avèrent fructueuses. La structure des fossiles moléculaires renseigne sur la maturité de la matière organique, notamment en révélant la présence de dérivés pétroliers. De cette manière des contaminations de sédiments de surface ont été mis en évidence par identification de fossiles spécifiques (Dastillung et Albrecht, 1976, Hostettler *et al.*, 1992). Cette contribution de carbone ancien, *a fortiori* pétrolier, peut être confortée par datation au carbone 14 (Suess, 1955, Stuiver et Polach, 1977, Lichtfouse et Eglinton, 1995). Enfin, l'absence de variation isotopique lors d'expérience de marquage d'un écosystème peut témoigner d'une origine exogène (Lichtfouse *et al.*, 1997a,b).

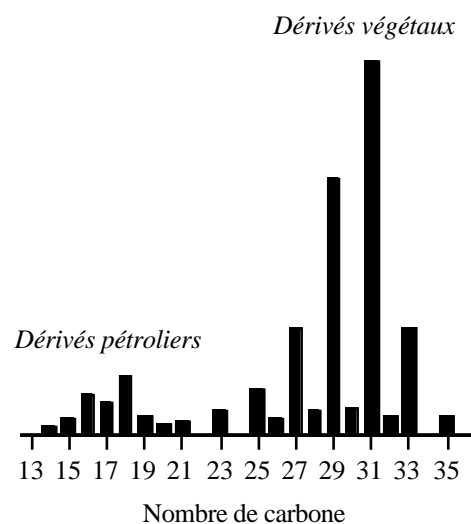
### Cas de contamination diffuse

Les alcanes linéaires des sols agricoles peuvent être classés dans deux catégories suivant leur source (21). Tout d'abord, les homologues à longues chaînes ( $C_{25}$ - $C_{33}$ ) proviennent des cires cuticulaires des plantes (Eglinton et Hamilton, 1967). Puis, les homologues à courtes chaînes ( $C_{15}$ - $C_{18}$ ) dont l'origine est généralement attribuée à des sources bactériennes, algues ou fongiques (Clark et Blumer, 1967, Gelpi *et al.*, 1968, 1970, Grimalt et Albaigés, 1987, Amblès *et al.*, 1989).

Néanmoins, les alcanes à chaînes courtes étant aussi les constituants majeurs des pétroles (Tissot *et al.*, 1971, 1974), une source pétrolière est aussi à considérer. C'est le cas de sols de la région Parisienne (Lichtfouse *et al.*, 1997a) où la faible prédominance paire-impair de ces molécules ressemble à celle des pétroles (Bray et Evans, 1961, Tissot *et al.*, 1971, 1974). De surcroît, le diesel et ses produits de combustion, sources possibles, montrent aussi des distributions analogues. Cette contribution de carbone ancien est confirmée par datation au carbone 14 de la fraction alkane du sol (>8510 ans).

21

### Alcanes linéaires de sols agricoles



Enfin, une éventuelle contribution microbienne peut être écartée car les alcanes à chaînes courtes ne présentent aucune variation isotopique ni lors du marquage au carbone 13 de l'humus pendant 23 ans, ni lors d'une incubation de sol avec du glucose- $^{13}C$  (Lichtfouse *et al.*, 1995a, 1997a). En fait, il peut s'agir soit d'une remontée lente de pétrole, soit d'un dépôt régulier d'aérosols. Cette contamination du sol est loin d'être négligeable car sa concentration est proche de celle des dérivés végétaux.

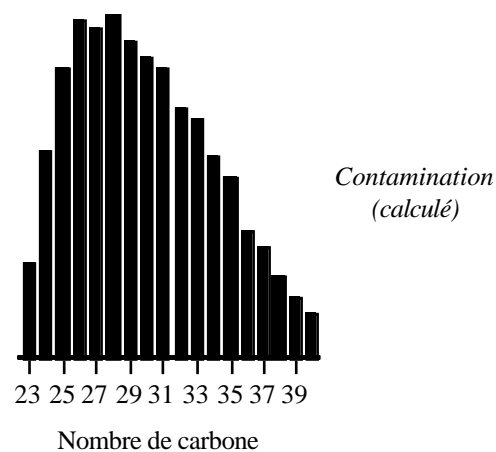
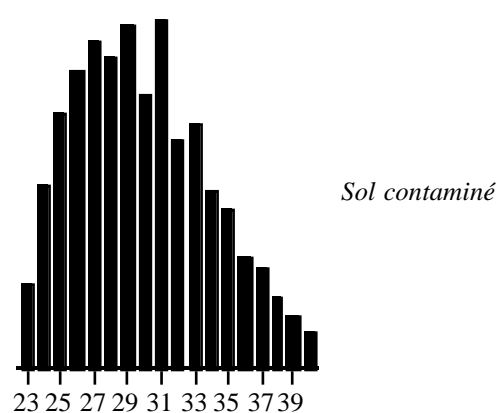
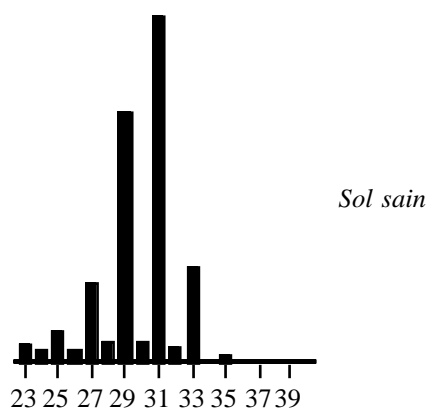
## Cas de contamination ponctuelle

Lors d'une étude de sols agricoles de la région Parisienne, nous avons aussi mis en évidence un cas de pollution ponctuelle par des alcanes à chaînes longues (Lichtfouse et Eglinton, 1995). Ici, la distribution des alcanes des sols contaminés se distingue nettement de celle des sols sains par une prédominance des homologues à nombre de carbone s'étendant de 23 à 40 (22). Une telle distribution est typique de produits pétroliers lourds (Bray et Evans, 1961, Tegelaar *et al.*, 1989). Cette contribution pétrolière est confirmée par analyse isotopique. Ainsi, la datation au carbone 14 de la fraction alcane (>8770 ans) montre une contribution notable de carbone ancien (>66%). De surcroît, les teneurs en carbone 13 des alcanes linéaires (-30‰) sont proches de celles des produits pétroliers (Clayton et Bjorøy, 1994, Wilhelms *et al.*, 1994, Lichtfouse *et al.*, 1994a), et se distinguent de celles des sols sains (-36‰).

En fait, la faible prédominance des alcanes en C<sub>29</sub>, C<sub>31</sub> et C<sub>33</sub> du sol contaminé (22) indique que la fraction analysée est un mélange de deux catégories d'alcanes : des molécules en C<sub>23</sub>-C<sub>40</sub> sans prédominance paire-impair, d'origine pétrolière, et des molécules en C<sub>27</sub>-C<sub>33</sub> avec une forte prédominance impaire, dérivées des plantes. Grâce aux concentrations relatives et aux teneurs en carbone 13, il est possible de calculer pour chaque molécule la part de la contribution pétrolière. Ainsi, l'alcane en C<sub>31</sub> contient 74% de carbone pétrolier. En soustrayant la contribution végétale on peut donc reconstruire la distribution de la contamination (Lichtfouse et Eglinton, 1995).

### Alcanes linéaires du sol

22



Nous allons maintenant découvrir d'autres molécules fossiles qui permettent d'authentifier les contaminations pétrolières des sols et des plantes.

## Hopanes et les stéranes pétroliers

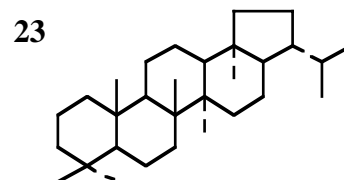
Les hopanes et les stéranes sont de bons marqueurs de contamination pétrolière en raison de leur structure moléculaire très spécifique témoignant de la maturation de la matière organique pendant des millions d'années (Van Dorsellaer *et al.*, 1974, Ensminger *et al.*, 1978, Mackenzie *et al.*, 1980, 1982). Leurs isomères sont couramment utilisés en géochimie pétrolière pour comparer la maturité des roches-mères avec celle des pétroles (Seifert et Moldowan, 1978, Peters et Moldowan, 1993).

Lors d'une étude préliminaire de végétaux poussant à proximité de voies autoroutières à Nancy, visant à mettre au point le dosage des hydrocarbures aromatiques (Henner *et al.*, 1997a), nous avons identifié des hopanes, des stéranes et des diastéranes dans cinq espèces (23, Bryselbout *et al.*, 1998). De telles molécules authentifient l'apport des combustibles fossiles aux plantes. Ainsi le ratio Ts/Tm basé sur les hopanes et utilisé couramment en géochimie pétrolière (Seifert et Moldowan, 1978, Peters et Moldowan, 1993) atteint une valeur de 56%, ce qui est typique de la matière organique géochimiquement très mature comme le pétrole.

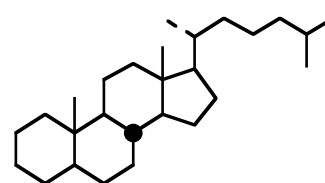
Nous avons aussi établi des paramètres basés sur les hopanes du pétrole et les alcanes des végétaux afin de mesurer l'ampleur de la contamination. Ainsi, le pourcentage du  $\alpha\beta$ -hopane en C<sub>30</sub> par rapport à l'alcane linéaire en C<sub>29</sub> est de 23% pour le pin noir d'Autriche localisé à environ 500m de l'autoroute. Au bord de l'autoroute cette valeur est de 66%. Ce résultat met donc en évidence une contribution plus élevée de combustibles fossiles au bord de la voie routière.

Des hopanes ont aussi été identifiés dans des sols agricoles de la région Parisienne (Lichtfouse *et al.*,

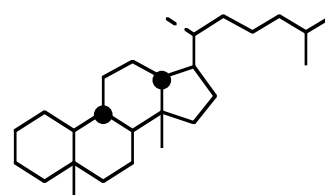
1997b). De manière analogue, la forte maturité géochimique mesurée à l'aide des isomères "biologiques" et "géochimiques" (Peters et Moldowan, 1993) atteste la contribution de produits pétroliers. Dans ce cas, la contamination peut être d'origine naturelle ou anthropique.



Hopane (C<sub>30</sub>)



Stéran (C<sub>29</sub>)

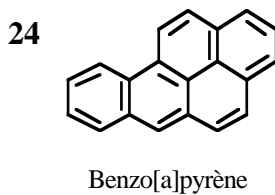


Diastéran (C<sub>29</sub>)

En résumé, de tels paramètres moléculaires s'avèrent très prometteurs pour étudier la diffusion des contaminations pétrolières dans les écosystèmes. Leur utilisation mériterait d'être étendue à l'étude des filières alimentaires : eau, plante, produit alimentaire, organisme vivant et boue de station d'épuration, par exemple. Nous allons maintenant montrer que les micropolluants aromatiques des sols ont aussi une origine ancienne.

## Hydrocarbures aromatiques polycycliques

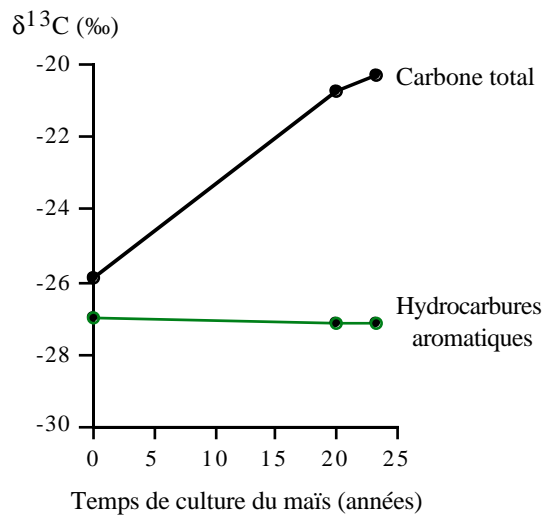
Des hydrocarbures aromatiques polycycliques ont été identifiés dans la plupart des écosystèmes (Edwards, 1983, Sicre *et al.*, 1987, Baek *et al.*, 1991, Garrigues et Lamotte, 1993). Ils peuvent être issus soit de sources naturelles telles que les remontées de pétroles et l'aromatisation rapide des terpènes végétaux, soit de sources anthropiques comme les accidents pétroliers et les gaz d'échappement (Henner *et al.*, 1997b, Lichtfouse *et al.*, 1997b). Certains homologues comme le benzo[a]pyrène (**24**) sont mutagènes et potentiellement cancérigènes (Pahlman et Pelkonen, 1987), notamment à cause des corrélations entre les sources d'hydrocarbures et la fréquence d'apparition des cancers (Lee *et al.*, 1976, Blumer *et al.*, 1977).



Dans les sols agricoles de la région Parisienne nous avons identifié des hydrocarbures aromatiques présents à l'état de traces (Lichtfouse *et al.*, 1997b). L'étude de leur structure et de leur distribution suggère une source fossile ou pyrolytique plutôt qu'une formation par aromatisation rapide au cours de l'humification. En outre, la datation au carbone 14 d'une fraction aromatique (>9820 ans) montre la présence d'une fraction majeure de carbone ancien (>70%). Ce résultat est appuyé par les paramètres de maturité basés sur les

isomères des méthylphénanthrènes, utilisés couramment en géochimie pétrolière (Radke *et al.*, 1986, Garrigues *et al.*, 1988, Lichtfouse *et al.*, 1994a), qui livrent des valeurs équivalentes à celles de sédiments profonds et de pétroles.

## 25

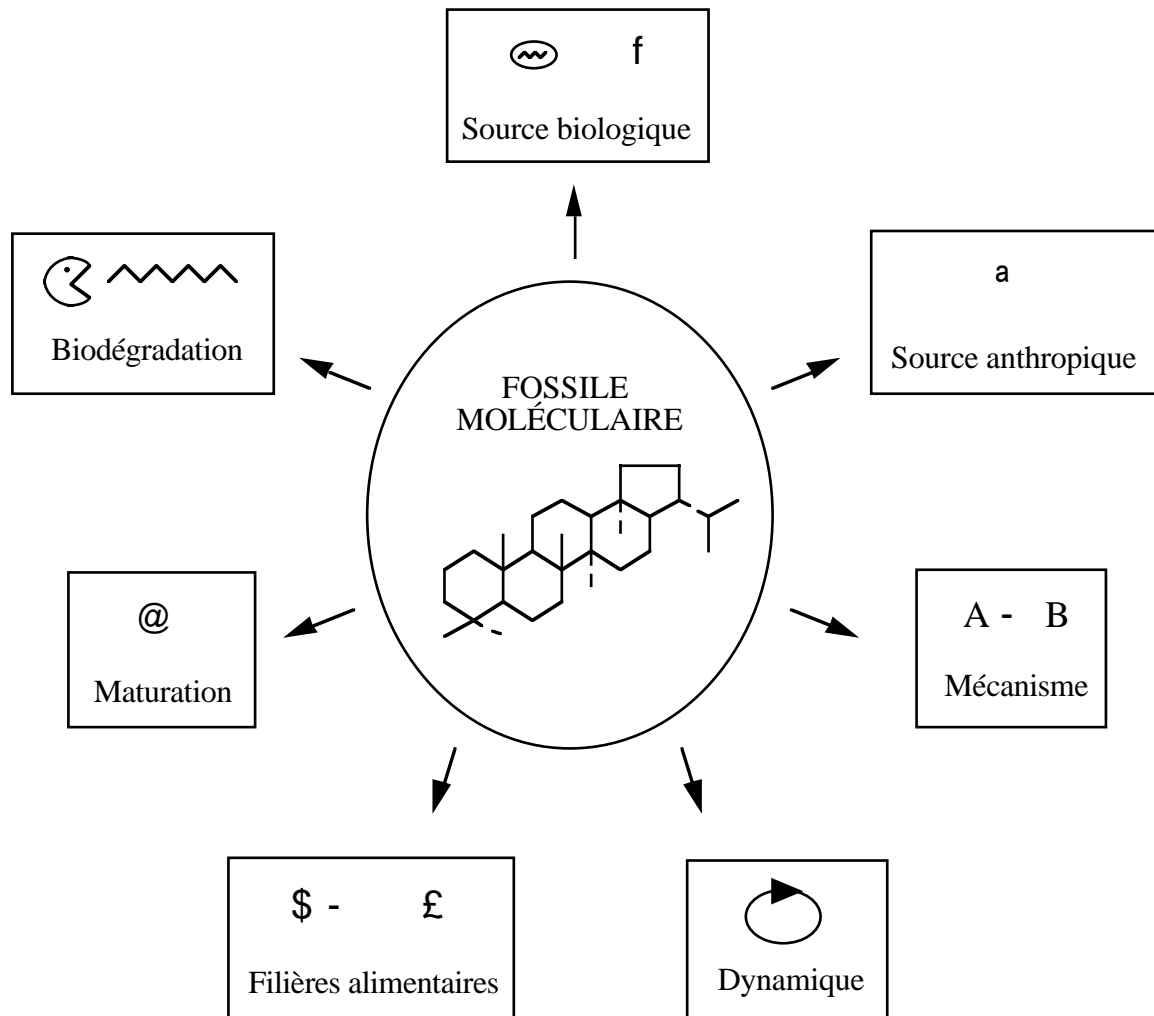


Enfin, nous observons une absence de variation isotopique des fractions aromatiques au cours d'une expérience de marquage du carbone du sol par culture du maïs pendant 23 ans (**25**). Ceci montre que ces molécules ne font pas partie du cycle du carbone du sol, du moins sur ce pas de temps. En fait, il peut s'agir soit d'une remontée lente et diffuse de pétrole, soit d'un dépôt régulier d'aérosols. En définitive, les fossiles moléculaires s'avèrent de puissants outils pour étudier la diffusion des contaminations pétrolières d'origine naturelle ou anthropique dans les écosystèmes.

## 6. CONCLUSION

Les fossiles moléculaires sont de puissants outils pour étudier l'origine, la transformation et le transfert de la matière organique dans les écosystèmes modernes et anciens (26). Marqueurs d'origine, ils livrent des informations sur le milieu de dépôt, en précisant notamment les sources de la matière organique et la place de leur précurseurs biologiques dans les chaînes alimentaires. De manière surprenante, la découverte de certains fossiles "orphelins" peut conduire à l'identification de nouvelles substances biologiques. D'autre part, l'analyse isotopique de marqueurs végétaux dans les sols a permis d'étudier la dynamique de l'humus au niveau moléculaire. Marqueurs de processus, leur structure moléculaire et leur composition isotopique permettent d'identifier la nature des réactions géochimiques opérant dans les milieux très complexes. Marqueurs de maturité, les fossiles moléculaires permettent de mesurer l'intensité du stress thermique subi par la matière organique au cours de l'enfouissement dans les sédiments. À cet égard, ils s'avèrent utiles à la fois pour la recherche pétrolière et pour authentifier la présence de contamination pétrolière dans les écosystèmes modernes. D'une manière plus générale, le concept de marqueur développé en géochimie pétrolière grâce aux fossiles moléculaires est à la base d'un domaine scientifique en émergence, la géochimie organique environnementale.

26



## 7. PERSPECTIVES : GÉOCHIMIE ORGANIQUE ENVIRONNEMENTALE

### Introduction

L'étude moléculaire des sols, des sédiments et des plantes s'est avérée utile pour préciser les sources, les processus de transformation et le devenir de la matière organique. Nos résultats s'intègrent ainsi dans un domaine scientifique en émergence rapide : la géochimie organique environnementale (Eganhouse, 1997). Les premières percées bénéficient largement des concepts et des techniques analytiques fines développés en géochimie pétrolière depuis 1960 (Bray et Evans, 1961, Eglinton et Murphy, 1969, Albrecht et Ourisson, 1971, Eglinton, 1973, Tissot et Welte, 1984, Moldowan *et al.*, 1992, Peters et Moldowan, 1993, Engel et Macko, 1993, Killops et Killops, 1993).

Ces acquis m'amènent à envisager l'étude **du devenir des molécules organiques dans l'environnement** et, en particulier, le **cycle des micropolluants organiques dans le système sol-plante** en faisant appel aux outils suivants :

- les marqueurs de **source** et la **datation au carbone 14** pour authentifier les contaminations,
- les marqueurs de **biodégradation** pour étudier la dégradation des polluants, et
- les marqueurs de **maturité** pour mesurer le degré de maturation des matières organiques.

### Marqueurs de source anthropique

De nombreux micropolluants organiques contaminent actuellement les écosystèmes. Comme les processus qui président à leur diffusion sont encore peu connus, il est souvent difficile de préciser leur origine. Ces interrogations pourraient être levées par des études au niveau moléculaire. Par exemple, des marqueurs pétroliers ont été identifiés dans les sols et dans les plantes poussant à proximité des voies routières (Lichtfouse *et al.*, 1997b, Bryselbout *et al.*, 1998). À cet égard, je propose d'étendre la recherche de ces fossiles pétroliers à l'ensemble des filières alimentaires : pluies, solution du sol, amendements, sols, plantes, produits alimentaires, tissus biologiques, boues de stations d'épuration et sédiments de rivière. Ces informations structurales seraient avantageusement complétées par la datation au carbone 14 des molécules (Eglinton *et al.*, 1996) car tous les produits pétroliers n'en contiennent presque plus. Il conviendra aussi de s'intéresser aux micropolluants liés aux matrices organiques macromoléculaires car ces substances sont susceptibles d'être transférées vers les organismes vivants à la faveur des transformations de la matière organique (Schiavon *et al.*, 1978, Chappe *et al.*, 1979, Bollag et Loll, 1983, Roberts, 1984, Richnow *et al.*, 1994, Schiavon *et al.*, 1997, Lichtfouse, 1997b, Houot *et al.*, 1997, Nanny *et al.*, 1997). Enfin, de manière plus générale, l'étude moléculaire peut s'avérer un puissant moyen d'investigation de l'authentification, de la biodisponibilité et des mécanismes de transfert des micropolluants organiques.

## Marqueurs de biodégradation

De part leur structure carbonée, tous les micropolluants organiques pourraient être biodégradés dans des conditions adéquates. Néanmoins, étant donné la complexité des écosystèmes, les facteurs qui contrôlent la dégradation sont encore peu connus, notamment à cause du manque d'outils permettant d'étudier ce phénomène au niveau moléculaire. Or, des études récentes suggèrent que ces interrogations pourraient être levées à l'aide de marqueurs moléculaires de biodégradation. Par exemple, les molécules pétrolières ont des aptitudes différentes à se biodégrader selon leur structure moléculaire (Connan et Restlé, 1984, Peters et Moldowan, 1993). De telles différences ont été exploitées pour mesurer l'intensité de la biodégradation du pétrole dans les réservoirs et dans les sols des raffineries (Peters et Moldowan, 1993, Moldowan *et al.*, 1995). Un tel concept s'appliquerait donc bien aux situations de contamination ponctuelle des sols par les produits pétroliers. Il permettrait non seulement d'évaluer l'intensité de la dépollution par atténuation naturelle, mais aussi de mesurer l'efficacité des technologies de réhabilitation, notamment l'épandage, l'incinération, la désorption thermique, les bioréacteurs, les biotertres et les cultures (Chaîneau *et al.*, 1995, 1997). De manière plus générale, des investigations de la filière alimentaire pourraient livrer de puissants outils moléculaires pour étudier la dégradation des polluants organiques.

## Marqueurs de maturité

Les facteurs qui contrôlent la maturation des matières organiques impliquées dans les différentes étapes de la filière alimentaire sont peu connus, notamment dans le cas des déchets où il n'existe actuellement aucun indice moléculaire de transformation, à ma connaissance. Or, de nombreuses études sédimentaires ont conduit à la définition de puissants paramètres moléculaires permettant de mesurer la maturité de la matière organique au cours des temps géologiques (Schroeder et Bada, 1976, Peters et Moldowan, 1993, Lichtfouse et Rullkötter, 1994, Lichtfouse *et al.*, 1994a). Aussi je propose d'étudier les matières organiques en décomposition pour identifier des substances organiques dont les changements moléculaires ont lieu sur des pas de temps plus courts (de l'heure à la centaine d'années). De tels paramètres moléculaires s'avéreraient utiles pour mesurer et authentifier l'état de maturation des matières organiques impliquées dans des processus divers : le compostage des déchets, l'épandage des boues, l'humification des sols, le mûrissement des fruits, la vinification des jus de raisins, l'affinement des fromages, la cuisson des aliments, etc. Le concept de paramètre moléculaire de maturité pourrait donc trouver des applications dans la plupart des domaines de la recherche agronomique, à condition de maîtriser l'analyse fine des traces organiques.



## 8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abelson P.H. et Hoering T.C. (1961) Carbon isotopic fractionation in formation of amino acids by photosynthetic organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **47**, 623-632.
- Albrecht P. et Ourisson G. (1971) Biogenic substances in sediments and fossils. *Angewandte Chemie International Edition* **10**, 209-225.
- Almendros G., Sanz J., González-Vila F.J. et Martin F. (1991) Evidence for a polyalkyl nature of soil humin. *Naturwissenschaften* **78**, 359-362.
- Amblès A., Magnoux P., Jambu P., Jacquesy R. et Fustec E. (1989) Effects of addition of bentonite on the hydrocarbon fraction of a podzol soil (A<sub>1</sub> Horizon). *Journal of Soil Science* **40**, 685-694.
- Amblès A., Jambu P. et Ntsikoussalabongui B. (1990) Evolution des acides gras d'un podzol forestier induite par l'apport d'engrais minéraux. *Science du Sol* **28**, 27-42.
- Amblès A., Jacquesy J.C., Jambu P., Joffre J. et Maggi-Churin R. (1991) Polar lipid fraction in soil: a kerogen-like matter. *Organic Geochemistry* **17**, 341-349.
- Amblès A., Parienti E., Jambu P., Mayoungou P. et Jacquesy J.-C. (1994) *n*-Alkane oxidation in soil. Formation of internal monoalkenes. *Geoderma* **64**, 111-124.
- Aquino Neto F.R., Restlé A., Connan J., Albrecht P. et Ourisson G. (1982) Novel tricyclic terpanes (C<sub>19</sub>, C<sub>20</sub>) in sediments and petroleum. *Tetrahedron Letters* **23**, 2027-2030.
- Baek S.O., Field R.A., Goldstone M.E., Kirk P.W., Lester J.N. et Perry R. (1991) A review of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: sources, fate and behavior. *Water, Air, and Soil Pollution* **60**, 279-300.
- Balesdent J. (1987) The turnover of soil organic fractions estimated by radiocarbon dating. *The Science of the Total Environment* **62**, 405-408.
- Balesdent J., Mariotti A. et Guillet B. (1987) Natural <sup>13</sup>C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biology and Biochemistry* **19**, 25-30.
- Barrie A., Bricout J. et Koziat J. (1984) Gas chromatography-stable isotope ratio analysis. A technique for <sup>13</sup>C tracer studies at low isotopic enrichments. *Spectroscopy International Journal* **3**, 259-260.
- Behar F.H. et Albrecht P. (1984) Correlations between carboxylic acids and hydrocarbons in several crude oils. Alteration by biodegradation. *Organic Geochemistry* **6**, 597-604.
- Behar F., Pelet R. et Roucaché J. (1984) Geochemistry of asphaltenes. *Organic Geochemistry* **6**, 587-595.
- Behar F. et Vandenbroucke M. (1988) Characterization and quantification of saturates trapped inside kerogen: implications for pyrolysate composition. *Organic Geochemistry* **13**, 927-938.
- Bender M.M. (1971) Variations in the <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratios of plants in relation to the pathway of photosynthetic carbon dioxide. *Phytochemistry* **10**, 1239-1244.
- Benner R., Fogel M.L., Spargue E.K. et Hodson R.E. (1987) Depletion of <sup>13</sup>C in lignin and its implications for stable carbon isotope studies. *Nature* **329**, 708-710.
- Blumer M., Blumer W. et Reich T. (1977) Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of a mountain valley. Correlation with highway traffic and cancer incidence. *Environmental Science and Technology* **11**, 1082-1084.
- Bollag J.-M. et Loll M.J. (1983) Incorporation of xenobiotics into soil humus. *Experientia* **39**, 1221-1231.
- Bray E.E. et Evans E.D. (1961) Distribution of *n*-paraffins as a clue to recognition of source beds. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **22**, 2-15.

- Bryselbout C., Henner P. et Lichtfouse E. (1998) Fossil fuel biomarkers in plant waxes as pollution parameters. *The Science of the Total Environment*, sous presse.
- Campbell C.A., Paul E.A., Rennie D.A. et McCallum K.J. (1967a) Applicability of the carbon-dating method of analysis to soil humus studies. *Soil Science* **104**, 217-224.
- Campbell C.A., Paul E.A., Rennie D.A. et McCallum K.J. (1967b) Factors affecting the accuracy of the carbon-dating method in soil humus studies. *Soil Science* **104**, 81-85.
- Cerling T.E., Quade J., Wang Y. et Bowman J.R. (1989) Carbon isotopes in soils and palaeosols as ecology and palaeoecology indicators. *Nature* **342**, 138-139.
- Cerri C., Feller C., Balesdent J., Victoria R. et Plenecassagne A. (1985) Application du traçage isotopique naturel en  $^{13}\text{C}$  à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* **300**, 423-428.
- Chaîneau C.H., Morel J.L. et Oudot J. (1995) Microbial degradation in soil microcosms of fuel oil hydrocarbons from drilling cuttings. *Environmental Science and Technology* **29**, 1615-1621.
- Chaîneau C.H., Morel J.L. et Oudot J. (1997) Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. *Journal of Environmental Quality* **26**, 1478-1483.
- Chappe B., Michaelis W., Albrecht P. et Ourisson G. (1979) Fossil evidence for a novel series of archaeobacterial lipids. *Naturwissenschaften* **66**, 522-523.
- Clark R.C. et Blumer M. (1967) Distribution of *n*-paraffins in marine organisms and sediment. *Limnology and Oceanography* **12**, 79-87.
- Clayton C.J. et Bjorøy M. (1994) Effect of maturity on  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of individual compounds in North Sea oils. *Organic Geochemistry* **21**, 737-750.
- Collister J.W., Summons R.E., Lichtfouse E. et Hayes J.M. (1992) An isotopic biogeochemical study of the Green River oil shale. *Organic Geochemistry* **19**, 265-276.
- Collister J.W., Lichtfouse E., Hieshima G. et Hayes J.M. (1994a) Partial resolution of sources of *n*-alkanes in the saline portion of the Parachute Creek Member, Green River Formation (Piceance Creek Basin, Colorado). *Organic Geochemistry* **21**, 645-659.
- Collister J.W., Rieley G., Stern B., Eglinton G. et Fry B. (1994b) Compound-specific  $\delta^{13}\text{C}$  analyses of leaf lipids from plants with differing carbon dioxide metabolisms. *Organic Geochemistry* **21**, 619-627.
- Connan J. et Restlé A. (1984) La biodégradation des hydrocarbures dans les réservoirs. *Bulletin du Centre de Recherche Exploration-Production d'Elf-Aquitaine* **8**, 291-302.
- Connan J., Nissenbaum A. et Dessort D. (1992) Molecular archaeology: export of Dead Sea asphalt to Canaan and Egypt in the Chalcolithic-Early Bronze Age (4th-3rd millennium BC). *Geochim. et Cosmochim. Acta* **56**, 2743-2759.
- Cooper J.E. (1962) Fatty acids in recent and ancient sediments and petroleum reservoir waters. *Nature* **193**, 744-746.
- Cooper J.E. et Bray E.E. (1963) A postulated role of fatty acids in petroleum formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **27**, 1113-1127.
- Dahl J., Moldowan J.M., McCaffrey M.A. et Lipton P.A. (1992) A new class of natural products revealed by  $3\beta$ -alkyl steranes in petroleum. *Nature* **355**, 154-157.
- Dany F., Riolo J., Trendel J.-M. et Albrecht P. (1990)  $3\beta$ -Carboxysteranes, a novel family of fossil steroids. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1228-1230.

- Dastillung M. et Albrecht P. (1976) Molecular test for oil pollution in surface sediments. *Marine Pollution Bulletin* **7**, 13-15.
- Deines P. (1980) The isotopic composition of reduced organic carbon. In *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry* (Edité par P. Fritz et J.C. Fontes). Elsevier. Pages 329-406.
- Derenne S., Largeau C., Casadevall E., Berkloff C. et Rousseau B. (1991) Chemical evidence of kerogen formation in source rocks and oil shales via selective preservation of thin resistant outer walls of microalgae: origin of ultralaminae. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **55**, 1041-1050.
- Derenne S., Le Berre F., Largeau C., Hatcher P., Connan J. et Raynaud J.F. (1992) Formation of ultralaminae in marine kerogens via selective preservation of thin resistant outer walls of microalgae. *Organic Geochemistry* **19**, 345-350.
- De Rosa M., Gambacorta A. et Gliozzi A. (1986) Structure, biosynthesis, and physicochemical properties of archaeobacterial lipids. *Microbiological Reviews* **50**, 70-80.
- Dinel H., Schnitzer M. et Mehuys M. (1990) Soil lipids: origin, nature, content, decomposition, and effect on soil physical properties. In *Soil Biochemistry* (Edité par J.-M. Bollag et G. Stotzky). Marcel Dekker.
- Duchaufour P. (1994) *Pédologie*. Masson.
- Durand B. (1980) (Editeur) *Kerogen*. Technip.
- Edwards N.T. (1983) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH's) in the terrestrial environment. A review. *Journal of Environmental Quality* **12**, 427-441.
- Eganhouse R.P. (1997) *Molecular Markers in Environmental Geochemistry*. ACS.
- Eglinton G. et Hamilton R.J. (1967) Leaf epicuticular waxes. *Science* **156**, 1322-1335.
- Eglinton G. et Murphy M.T.J. (Editeurs) (1969) *Organic Geochemistry. Methods and Results*. Springer.
- Eglinton G. (1973) Chemical fossils: a combined organic geochemical and environmental approach. *Pure and Applied Chemistry* **34**, 611-632.
- Eglinton T.I., Aluwihare L.I., Bauer J.E., Druffel E.R.M. et McNichol A.P. (1996) Gas chromatographic isolation of individual compounds from complex matrices for radiocarbon dating. *Analytical Chemistry* **68**, 904-912.
- Engel M.H. et Macko S.A. (Editeurs) (1993) *Organic Geochemistry, Principles and Applications*. Plenum.
- Ensminger A., Joly G. et Albrecht P. (1978) Rearranged steranes in sediments and crude oils. *Tetrahedron Letters* **18**, 1575-1578.
- Espitalié J., Marquis F., Sage, L. et Barsony I. (1987) Géochimie organique du bassin de Paris. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* **42**, 271-302.
- Espitalié J., Maxwell J.R., Chenet Y. et Marquis F. (1988) Aspects of hydrocarbons migration in the Mesozoic in the Paris Basin as deduced from an organic geochemical survey. *Organic Geochemistry* **13**, 467-481.
- Freeman K.H., Boreham C.J., Summons R.E. et Hayes J.M. (1994) The effect of aromatization on the isotopic compositions of hydrocarbons during early diagenesis. *Organic Geochemistry* **21**, 1037-1049.
- Fukushima K. (1982) Vacuum pyrolysis of recent sedimentary humic acids and kerogens. *Geochemical Journal* **16**, 43-49.
- Garrigues P., De Sury R., Angelin M.L., Bellocq J., Oudin J.L. et Ewald M. (1988) Relation of the methylated aromatic hydrocarbon distribution pattern to the maturity of organic matter in ancient sediments from the Mahakam delta. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **52**, 375-384.
- Garrigues P. et Lamotte M. (1993) (Editeurs) *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*. OPA.
- Gelpi E., Schneider H.J., Mann J. et Oró J. (1968) Olefins of high molecular weight in two microscopic algae. *Science* **161**, 700-702.

- Gelpi E., Schneider H.J., Mann J. et Oró J. (1970) Hydrocarbons of geochemical significance in microscopic algae. *Phytochemistry* **9**, 603-612.
- Grimalt J.O. et Albaigés J. (1987) Sources and occurrences of C<sub>12</sub>-C<sub>22</sub> n-alkane distributions with even carbon-number preference in sedimentary environments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **51**, 1379-1384.
- Grimalt J.O. et Saiz-Jimenez C. (1989) Lipids of soil humic acids. I. The humatmelanic acid fraction. *The Science of the Total Environment* **81/82**, 409-420.
- Grimalt J.O., Hermosin B., Yruela I. et Saiz-Jimenez C. (1989) Lipids of soil humic acids. II. Residual components after humatmelanic acid extraction. *The Science of the Total Environment* **81/82**, 421-428.
- Hatcher P.G., Maciel G.E. et Dennis L.W. (1981) Aliphatic structures of humic acids; a clue to their origin. *Organic Geochemistry* **3**, 43-48.
- Hayes J.M., Freeman K.H., Popp B.N. et Hoham C.H. (1990) Compound-specific isotopic analyses: a novel tool for reconstruction of ancient biogeochemical processes. *Organic Geochemistry* **16**, 1115-1128.
- Hayes J.M. (1993) Factors controlling <sup>13</sup>C contents of sedimentary organic compounds: principles and evidence. *Marine Geology* **113**, 111-125.
- Hayes M.H.B., MacCarthy P., Malcolm R.L. et Swift R.S. (1989) (Éditeurs) *Humic Substances II. In Search of Structure*. Wiley.
- Heissler D., Ocampo R., Albrecht P., Riehl J.-J. et Ourisson G. (1984) Identification of long-chain tricyclic terpene hydrocarbons (C<sub>21</sub>-C<sub>30</sub>) in geological samples. *Journal of the Chemical Society, Chemical Commun.*, 496-498.
- Henner P., Schwartz C. et Lichtfouse E. (1997a) Pipette Pasteur extraction: a fast, convenient, exhaustive and environmentally friendly method for the extraction of solid samples. *Analisis* **25**, 51-52.
- Henner P., Schiavon M., Morel J.L. et Lichtfouse E. (1997b) Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) occurrence and remediation methods. *Analisis* **25**, 56-59.
- Houot S., Benoit P., Charnay M.P. et Barriuso E. (1997) Experimental techniques to study the fate of organic pollutants in soils in relation to their interactions with soil organic constituents. *Analisis* **25**, 41-45.
- Hostettler F.D., Rapp J.B. et Kvenvolden K.A. (1992) Use of geochemical biomarkers in bottom sediment to track oil from a spill, San Francisco Bay, California. *Marine Pollution Bulletin* **24**, 15-20.
- Huang W.-Y. et Meinschein W.G. (1976) Sterols as source indicators of organic materials in sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **40**, 323-330.
- Huang W.-Y. et Meinschein W.G. (1979) Sterols as ecological indicators. *Geochimica et Cosmoch. Acta* **40**, 323-330.
- Huang Y., Eglinton G., Ineson P., Latter P.M., Bol R. et Harkness D.D. (1997) Absence of carbon isotope fractionation of individual n-alkanes in a 23-year field decomposition experiment with *Calluna vulgaris*. *Organic Geochemistry* **26**, 497-501.
- Huc A.Y. (1976) Mise en évidence de provinces géochimiques dans les schistes bitumineux du Toarcien de l'est du Bassin de Paris. *Revue de l'Institut du Pétrole* **31**, 933-953.
- Huc A.Y. (1980) Origin and formation of organic matter in recent sediments and its relation to kerogen. In *Kerogen* (Edité par B. Durand). Technip. Pages 445-474.
- Jambu P., Fustec E. et Jacquesy R. (1978) Les lipides des sols: nature, origine, évolution, propriétés. *Science du Sol* **4**, 229-240.
- Jasper J.P. et Hayes J.M. (1990) A carbon isotope record of CO<sub>2</sub> levels during the late Quaternary. *Nature* **347**, 462-464.

- Jenkinson D.S. (1965) Studies on the decomposition of plant material in soil. I. Losses of carbon from  $^{14}\text{C}$  labelled ryegrass incubated with soil in the field. *Journal of Soil Science* **16**, 104-115.
- Jenkinson D.S. (1968) Studies on the decomposition of plant material in soil. III. The distribution of labelled and unlabelled carbon in soil incubated with  $^{14}\text{C}$ -labelled ryegrass. *Journal of Soil Science* **19**, 25-39.
- Jenkinson D.S. et Rayner J.H. (1977) The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science* **123**, 298-305.
- Killops S.D. et Killops V.J. (1993) *An Introduction to Organic Geochemistry*. Longman.
- Kögel-Knabner I., De Leeuw J.W. et Hatcher P.G. (1992) Nature and distribution of alkyl carbon in forest soil profiles: implication for the origin and humification of aliphatic biomacromolecules. *The Science of the Total Environment* **117/118**, 175-185.
- Kolattukudy P.E. (1976) (Editeur) *Chemistry and Biochemistry of Natural Waxes*. Elsevier.
- Kolattukudy P.E. (1980) Biopolyester membranes of plants: cutin and suberin. *Science* **208**, 990-1000.
- Largeau C., Derenne S., Casadevall E., Berkaloff C., Corolleur M., Lugardon B., Raynaud J.F. et Connan J. (1990) Occurrence and origin of ultralaminae structures in amorphous kerogens of various source rocks and oil shales. *Organic Geochemistry* **16**, 889-895.
- Larter S.R., Solli H., Douglas A.G., De Lange F. et De Leeuw J.W. (1979) Occurrence and significance of prist-1-ene in kerogen pyrolysates. *Nature* **279**, 405-408.
- Lee M.L., Novotny M. et Bartle K.D. (1976) Gas chromatography/mass spectrometric and nuclear magnetic resonance determination of polynuclear aromatic hydrocarbons in airborne particulates. *Analytical Chemistry* **48**, 1566-1572.
- Lichtfouse E. (1989) Nouveaux stéroïdes aromatiques fossiles. *Thèse de Doctorat*, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 189 pages, 1989. Technip, 1990.
- Lichtfouse E., Riolo J. et Albrecht P. (1990) Occurrence of 2-methyl-, 3-methyl- and 6-methyltri-aromatic steroid hydrocarbons in geological samples. *Tetrahedron Letters* **31**, 3937-3940.
- Lichtfouse E., Freeman K.H., Collister J.W. et Merritt D.A. (1991) Enhanced resolution of organic compounds from sediments by isotopic gas chromatography-combustion-mass spectrometry. *Journal of Chromatography* **585**, 177-180.
- Lichtfouse E. et Collister J.W. (1992) Tracing biogenic links of natural organic substances at the molecular level with stable carbon isotopes: *n*-alkanes and *n*-alkanoic acids from sediments. *Tetrahedron Letters* **33**, 8093-8094.
- Lichtfouse E., Littke R., Disko U., Willsch H., Rullkötter J. et Stein R. (1992) Geochemistry and petrology of organic matter in Miocene to Quaternary deep sea sediments from the Japan Sea (Sites 798 and 799). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* **127/128**, 667-675.
- Lichtfouse E., Albrecht P. et Behar F. (1993) 3-Methyltri-aromatic steroids in sediments, molecular fossils with unknown precursors. *Polycyclic Aromatic Compounds* **3**, 635-638.
- Lichtfouse et Albrecht P. (1994) Synthesis of tri-aromatic steroid hydrocarbons methylated at position 2, 3 or 6: molecular fossils of yet unknown biological origin. *Tetrahedron* **50**, 1731-1744.
- Lichtfouse E. et Rullkötter J. (1994) Accelerated transformation of organic matter below the silica transition zone in immature sediments from the Japan Sea. *Organic Geochemistry* **21**, 517-523.
- Lichtfouse E., Albrecht P., Behar F. et Hayes J.M. (1994a) A molecular and isotopic study of the organic matter from the Paris Basin, France. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **58**, 209-221.

- Lichtfouse E., Derenne S., Mariotti A. et Largeau C. (1994b) Possible algal origin of long chain odd *n*-alkanes in immature sediments as revealed by distributions and carbon isotope ratios. *Organic Geochemistry* **22**, 1023-1027.
- Lichtfouse E., Elbisser B., Balesdent J., Mariotti A. et Bardoux G. (1994c) Isotope and molecular evidence for direct input of maize leaf wax *n*-alkanes into crop soils. *Organic Geochemistry* **22**, 349-351.
- Lichtfouse E. (1995) <sup>13</sup>C labelling of soil *n*-hentriacontane (C<sub>31</sub>) by maize cultivation. *Tetrahedron Letters* **36**, 529-530.
- Lichtfouse E. et Budzinski H. (1995) <sup>13</sup>C analysis of molecular organic substances, a novel breakthrough in analytical sciences. *Analisis* **23**, 263-265.
- Lichtfouse E. et Eglinton T.I. (1995) <sup>13</sup>C and <sup>14</sup>C evidence of pollution of a soil by fossil fuel and reconstruction of the composition of the pollutant. *Organic Geochemistry* **23**, 969-973.
- Lichtfouse E., Berthier G., Houot S., Barriuso E., Bergheaud V. et Vallaey T. (1995a) Stable carbon isotope evidence for the microbial origin of C<sub>14</sub>-C<sub>18</sub> *n*-alkanoic acids in soils. *Organic Geochemistry* **23**, 849-852.
- Lichtfouse E., Dou S., Girardin C., Grably M., Balesdent J., Behar F. et Vandenbroucke M. (1995b) Unexpected <sup>13</sup>C-enrichment of organic components from wheat crop soils: evidence for the *in situ* origin of soil organic matter. *Organic Geochemistry* **23**, 865-868.
- Lichtfouse E., Dou S., Houot S. et Barriuso E. (1995c) Isotope evidence for soil organic carbon pools with distinct turnover rates. II. Humic substances. *Organic Geochemistry* **23**, 845-847.
- Lichtfouse E., Chenu C. et Baudin F. (1996) Resistant ultralaminae in soils. *Organic Geochemistry* **25**, 263-265.
- Lichtfouse E. (1997a) Heterogeneous turnover of molecular organic substances from crop soils as revealed by <sup>13</sup>C labeling at natural abundance with *Zea mays*. *Naturwissenschaften* **84**, 23-25.
- Lichtfouse E. (1997b) Soil, a sponge for pollutants. *Analisis* **25**, 16-23.
- Lichtfouse E., Bardoux G., Mariotti A., Balesdent J., Ballentine D.C. et Macko S.A. (1997a) Molecular, <sup>13</sup>C, and <sup>14</sup>C evidence for the allochthonous and ancient origin of C<sub>16</sub>-C<sub>18</sub> *n*-alkanes in modern soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **61**, 1891-1898.
- Lichtfouse E., Budzinski H., Garrigues P. et Eglinton T.I. (1997b) Ancient polycyclic aromatic hydrocarbons in modern soils: <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C and biomarker evidence. *Organic Geochemistry* **26**, 353-359.
- Lichtfouse E. (1998) Isotope and biosynthetic evidence for the origin of long-chain aliphatic lipids in soils. *Naturwissenschaften* **85**, 76-77.
- Lichtfouse E., Chenu C., Baudin F., Leblond C., Da Silva M., Behar F., Derenne S., Largeau C., Wehrung P. et Albrecht P. (1998a) A novel pathway of soil organic matter formation by selective preservation of resistant straight-chain biopolymers: chemical and isotope evidence. *Organic Geochemistry* **28**, 411-415.
- Lichtfouse E., Leblond C., Da Silva M. et Behar F. (1998b) Occurrence of biomarkers and straight-chain biopolymers in humin: implication for the origin of soil organic matter. *Naturwissenschaften* **85**, 497-501.
- Lichtfouse E., Wehrung P. et Albrecht P. (1998c) Plant wax *n*-alkanes trapped in soil humin by noncovalent bonds. *Naturwissenschaften* **85**, 449-452.
- Mackenzie A.S., Patience R.L., Maxwell J.R., Vandenbroucke M. et Maxwell J.R. (1980) Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris Basin, France. I. Changes in the configurations of acyclic isoprenoid alkanes, steranes and triterpanes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **44**, 1709-1721.
- Mackenzie A.S., Brassell S.C., Eglinton E. et Maxwell J.R. (1982) Chemical fossils: the geological fate of steroids. *Science* **217**, 491-504.
- Maillard L.C. (1916) Synthèse des matières humiques par action des acides aminés sur les sucres réducteurs.

- In *Annales de Chimie de Paris* (Editées par A. Haller et Ch. Moureu). Masson. Tome V, pages 258-317.
- Maillard L.C. (1917) Identité des matières humiques de synthèse avec les matières humiques naturelles.  
In *Annales de Chimie de Paris* (Editées par A. Haller et Ch. Moureu). Masson. Tome VI, pages 113-152.
- Mariotti A. et Peterschmitt E. (1994) Forest savanna ecotone dynamics in India as revealed by carbon isotope ratios of soil organic matter. *Oecologia* **97**, 475-480.
- Martel Y.A. et Paul E.A (1974) Effects of cultivation on the organic matter of grassland soils as determined by fractionation and radiocarbon dating. *Canadian Journal of Soil Science* **54**, 419-426.
- Matthews D.E. et Hayes J.M. (1978) Isotope-ratio-monitoring gas chromatography-mass spectrometry. *Analytical Chemistry* **50**, 1465-1473.
- Michaelis W., Richnow H.H. et Seifert R. (1995) Chemically bound chlorinated aromatics in humic substances. *Naturwissenschaften* **82**, 139-142.
- Moldowan J.M., Seifert W.K., Seifert W.K. et Gallegos E. (1983) Identification of an extended series of tricyclic terpanes in petroleum. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **47**, 1531-1534.
- Moldowan J.M., Albrecht P. et Philp R.P. (Editeurs) (1992) *Biological Markers in Sediments and Petroleum*. Prentice Hall.
- Moldowan J.M., Dahl J., McCaffrey M.A., Smith W.J. et Fetzer J.C. (1995) Application of biological marker technology to bioremediation of refinery by-products. *Energy & Fuels* **9**, 155-162.
- Morrisson R.I. (1969) Soil lipids. In *Organic Geochemistry, Methods and Results* (Edité par G. Eglinton et M.T.J. Murphy). Springer. Pages 558-575.
- Moucawi J., Fustec E., Jambu P. et Jacquesy R. (1981) Decomposition of lipids in soils: free and esterified fatty acids, alcohols and ketones. *Soil Biology and Biochemistry* **13**, 461-468.
- Nanny M.A., Bortiatynski J.M. et Hatcher P.G. (1997) Noncovalent interactions between acenaphthenone and dissolved fulvic acid as determined by <sup>13</sup>C NMR T<sub>1</sub> relaxation measurements. *Environmental Science and Technology* **31**, 530-534.
- Nissenbaum A. et Kaplan I.R. (1972) Chemical and isotopic evidence for the *in situ* origin of marine humic substances. *Limnology and Oceanography* **17**, 570-582.
- O'Leary M.H. (1981) Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry* **20**, 553-567.
- Ourisson G., Albrecht P. et Rohmer M. (1979) The hopanoids. Palaeochemistry and biochemistry of a group of natural products. *Pure and Applied Chemistry* **51**, 709-729.
- Ourisson G., Albrecht P. et Rohmer M. (1982) Predictive microbial biochemistry, from molecular fossils to procaryotic membranes. *TIBS* 236-239.
- Ourisson G., Rohmer M. et Poralla K. (1987a) Microbial lipids betrayed by their fossils. *Microbiological Sciences* **4**, 52-57.
- Ourisson G., Rohmer M. et Poralla K. (1987b) Prokaryotic hopanoids and other polyterpenoid sterol surrogates; *Annual Reviews of Microbiology* **41**, 301-333.
- Ourisson G. et Albrecht P. (1992) Geohopanoids: the most abundant natural products on Earth? *Accounts of Chemical Research* **25**, 398-402.
- Pahlman R. et Pelkonen O. (1987) Mutagenicity studies of different polycyclic aromatic hydrocarbons: the significance of enzymatic factors and molecular structure. *Carcinogenesis* **8**, 773-778.
- Park R. et Epstein S. (1961) Metabolic fractionation of C<sup>13</sup> and C<sup>12</sup> in plants. *Plant Physiology* **36**, 133-138.
- Parker P.L. et Leo R.F. (1965) Fatty acids in blue-green algal mat communities. *Science* **148**, 373-374.

- Parker P.L., Van Baalen C. et Maurer L. (1967) Fatty acids in eleven species of blue-green algae: geochemical significance. *Science* **155**, 707-708.
- Perry G.J., Volkman J.K., Johns R.B. et Bavor H. J. (1979) Fatty acids of bacterial origin in contemporary marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **43**, 1715-1725.
- Peters K.E. et Moldowan J.M. (1993) *The Biomarker Guide*. Prentice Hall.
- Radke M., Welte D.H. et Willsch H. (1986) Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: influence of the organic matter type. *Organic Geochemistry* **10**, 51-63.
- Richnow H.H., Jenish A. et Michaelis W. (1992) Structural investigations of sulphur-rich macromolecular oil fractions and a kerogen by sequential chemical degradation. *Organic Geochemistry* **19**, 351-370.
- Richnow H.H., Seifert R., Hefter J., Kästner M., Mahro B. et Michaelis W. (1994) Metabolites of xenobiotica and mineral oil constituents linked to macromolecular organic matter in polluted environments. *Organic Geochemistry* **22**, 671-681.
- Rieley G., Collier R., Jones D.M., Eglinton G., Eakin P.A. et Fallick A.E. (1991) Sources of sedimentary lipids deduced from stable carbon-isotope analyses of individual compounds. *Nature* **352**, 425-426.
- Rieley G., Collister J.W., Stern B. et Eglinton G. (1993) Gas chromatography/isotope ratio mass spectrometry of leaf wax *n*-alkanes from plants of differing carbon dioxide metabolisms. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* **7**, 488-491.
- Ries-Kautt M. et Albrecht P. (1989) Hopane-derived triterpenoids in soils. *Chemical Geology* **76**, 143-151.
- Riolo J., Hussler G., Albrecht P. et Connan J. (1986) Distribution of aromatic steroids in geological samples: their evaluation as geochemical parameters. *Organic Geochemistry* **10**, 981-990.
- Roberts T.R. (1984) Non-extractable pesticide residues in soils and plants. *Pure and Applied Chemistry* **56**, 945-956.
- Rohmer M. et Ourisson G. (1976a) Structure des bactériohopanétérols d'*Acetobacter xylinium*. *Tetrahedron Letters* **40**, 3633-3636.
- Rohmer M. et Ourisson G. (1976b) Dérivés du bactériohopane: variations structurales et répartition. *Tetrahedron Letters* **40**, 3637-3640.
- Rohmer M. et Ourisson G. (1976c) Méthylhopanes d'*Acetobacter xylinium* et d'*Acetobacter rancens*. *Tetrahedron Letters* **40**, 3641-3644.
- Rohmer M., Bouvier-Nave P. et Ourisson G. (1984) Distribution of hopanoid triterpenes in prokaryotes. *Journal of General Microbiology* **130**, 1137-1150.
- Rullkötter J. et Philip P. (1981) Extended hopanes up to C<sub>40</sub> in Thornton bitumen. *Nature* **292**, 616-618.
- Rullkötter J. et Michaelis W. (1990) The structure of kerogen and related materials. A review of recent progress and future trends. *Organic Geochemistry* **16**, 829-852.
- Schaeffer P., Poinot J., Hauke V., Adam P., Wehrung P., Trendel J.-M., Albrecht P., Dessort D. et Connan J. (1994) Novel optically active hydrocarbons in sediments: evidence for an extensive biological cyclisation of higher regular polyprenols. *Angewandte Chemie International Edition* **33**, 1166-1169.
- Sano M., Yotsui Y., Abe H. et Sasaki S. (1976) A new technique for the detection of metabolites labelled by the isotope <sup>13</sup>C using mass fragmentometry. *Biomedical Mass Spectrometry* **3**, 1-3.
- Scharpenseel H.W. et Schiffmann H. (1977) Radiocarbon dating of soils, a review. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **140**, 159-174.
- Schiavon M., Jacquin F. et Goussault C. (1978) Blocage de molécules s-triaziniques par la matière organique.



- Schiavon M., Barriuso E., Lichtfouse E. et Morel J.-L. (1997) Contamination des sols et des productions agricoles par les produits phytosanitaires et les micropolluants organiques. 155-169. In *Actes des Troisièmes Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'Analyse de Terre* (Edité par G. Thevenet et P. Riou). Blois, 1997.
- Schnitzer M. et Neyroud J.A. (1975) Alkanes and fatty acids in humic substances. *Fuel* **54**, 17-19.
- Schnitzer M. et Khan S.U. (1978) (Editeurs) *Soil Organic Matter*. Elsevier.
- Schnitzer M., Hindle C.A. et Meglic M. (1986) Supercritical gas extraction of alkanes and alkanolic acids from soils and humic materials. *Soil Science Society American Journal* **50**, 913-919.
- Schnitzer M. (1991) Soil organic matter, the next 75 years. *Soil Science* **151**, 41-58.
- Schoell M. (1980) The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **44**, 649-661.
- Schreiner O. et Shorey E.C. (1909) The presence of a cholesterol substance in soils; agosterol. *Journal of the American Chemical Society* **31**, 116-118.
- Schreiner O. et Shorey E.C. (1911) Cholesterol bodies in soils: phytosterol. *Journal of Biological Chemistry* **9**, 9-12.
- Schroeder R.A. et Bada J.L. (1976) A review of the geochemical applications of the amino acid racemization reaction. *Earth Science Reviews* **12**, 347-391.
- Schulten H.-R. et Schnitzer M. (1990) Aliphatics in soil organic matter in fine-clay fractions. *Soil Science Society of America Journal* **54**, 98-105.
- Seifert W.K. (1978) Steranes and terpanes in kerogen pyrolysis for correlation of oils and source rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **42**, 473-484.
- Seifert W.K. et Moldowan J.M. (1978) Application of steranes, terpanes and monoaromatics to the maturation, migration and source of crude oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **42**, 77-95.
- Seifert W.K. et Moldowan J.M. (1979) The effect of biodegradation on steranes and terpanes in crude oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **43**, 111-126.
- Seifert W.K. et Moldowan J.M. (1981) Paleoreconstruction by biological markers. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **45**, 783-794.
- Shimoyama A. et Johns W.D. (1972) Formation of alkanes from fatty acids in the presence of CaCO<sub>3</sub>. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **36**, 87-91.
- Sicre M.A., Marty J.C., Saliot A., Aparicio X., Grimalt J. et Albaiges J. (1987) Aliphatic and aromatic hydrocarbons in different sized aerosols over the mediterranean sea: occurrence and origin. *Atmospheric Environment* **21**, 2247-2259.
- Sinninghe Damsté J.S. et De Leeuw J.S. (1990) Analysis, structure and geochemical significance of organically-bound sulphur in the geosphere: state of the art and future research. *Organic Geochemistry* **16**, 1077-1101.
- Smith B.N. et Epstein S. (1971) Two categories of <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratios for higher plants. *Plant Physiology* **47**, 380-384.
- Stuiver M. et Pollach H.A. (1977) Discussion: reporting of <sup>14</sup>C data. *Radiocarbon* **19**, 355-363.
- Suess H.E. (1955) Radiocarbon concentration in modern wood. *Science* **122**, 415-417.
- Summons R.E. et Capon R.J. (1988) Fossil steranes with unprecedented methylation in ring-A. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **52**, 2733-2736.

- Summons R.E. et Capon R.J. (1991) Identification and significance of 3 $\beta$ -ethyl steranes in sediments and petroleum. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **55**, 2391-2395.
- Summons R.E., Jahnke L.L. et Roksandic Z. (1994) Carbon isotopic fractionation in lipids from methanotrophic bacteria: relevance for interpretation of the geochemical record of biomarkers. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **58**, 2853-2863.
- Tegelaar E.W., Matthezing R.M., Jansen J.B.H., Horsfield B. et De Leeuw J.W. (1989) Possible origin of *n*-alkanes in high wax crude oils. *Nature* **342**, 529-531.
- Thompson I.P., Bailey M.J., Ellis R.J. et Purdy K.J. (1993) Subgrouping of bacterial populations by cellular fatty acid composition. *FEMS Microbiology Ecology* **102**, 75-84.
- Tissot B., Califet-Debyser Y., Deroo G. et Oudin J.L. (1971) Origin and evolution of hydrocarbons in Early Toarcian shales, Paris Basin, France. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* **55**, 2177-2193.
- Tissot B., Durand B., Espitalié J. et Combaz A. (1974) Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* **58**, 499-506.
- Tissot B.P. et Welte D.H. (1984) *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer.
- Van Dorsselaer A., Ensminger A., Spycckerelle C., Dastillung M., Sieskind O., Arpino P., Albrecht P. et Ourisson G. (1974) Degraded and extended hopane derivatives (C<sub>27</sub> to C<sub>35</sub>) as ubiquitous geochemical markers. *Tetrahedron Letters* **14**, 1349-1352.
- Van Dorsselaer A., Albrecht P. et Ourisson G. (1977) Identification of novel (17 $\alpha$ H)-hopanes in shales, coals, lignites, sediments and petroleum. *Bulletin de la Société Chimique de France* **5**, 165-170.
- Welte D.H. (1970) Organischer Kohlenstoff und die Entwicklung der Photosynthese auf der Erde. *Naturwissenschaften* **57**, 17-23.
- Wilhelms A., Larter S.R. et Hall K. (1994) A comparative study of the stable carbon isotopic composition of crude oil alkanes and associated crude oil asphaltene pyrolysate alkanes. *Organic Geochemistry* **21**, 751-759.

# CURRICULUM VITAE

**LICHTFOUSE Éric**, né le 2 avril 1960 à Strasbourg, Bas-Rhin. Marié, 38 ans.

Laboratoire Sols et Environnement associé à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)  
École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA-INPL)  
2, avenue de la Forêt de Haye, BP 172, 54505 Vandoeuvre-Lès-Nancy  
Tél. 03 83 59 58 99 (-58 45), Fax 03 83 59 57 91, lichtfouse@ensaia.u-nancy.fr

## Fonction actuelle

Chargé de Recherche 1<sup>re</sup> classe INRA affecté au Laboratoire Sols et Environnement le 1<sup>er</sup> septembre 1996.

## Diplômes

- 1982 DUT spécialité Chimie, Université de Grenoble I.
- 1984 Licence de Chimie, mention AB, Université Claude Bernard, Lyon.
- 1985 DEA spécialité Chimie Organique, Université Claude Bernard, Lyon.
- 1985 Ingénieur Chimiste de l'École Française de Tannerie (EFT).  
École Supérieure de Chimie Industrielle de Lyon (ESCIL) en 3<sup>e</sup> année.
- 1989 Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I. "Nouveaux Stéroïdes Aromatiques Fossiles"  
Jury: G. Ourisson, P. Albrecht, A. Huc, J. Maxwell et J. Sommer.
- 1997 Autorisation à co-encadrer des thèses à l'INPL.

## Certificats

- 1989 Attestation d'initiation au geste élémentaire de survie, Département du Bas-Rhin.
- 1989 Certificat de Sauveteur-Secouriste du Travail de l'INRS, Strasbourg.
- 1990 Certificate of Attendance Level 2, Cours d'Anglais à l'Université de l'Indiana.

## Carrière

- 1986 Ingénieur de Recherche et Développement, Société agro-alimentaire Perlamande, Oraison. (8 mois).
- 1986 Boursier de l'École Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs (1986-87). (1 an).  
Ingénieur Allocataire de Recherche de l'Institut Français du Pétrole (1987-89). (2 ans).  
Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg. Responsable de la sécurité du laboratoire.
- 1990 Postdoctorat. Université de l'Indiana. (1 an).
- 1991 Postdoctorat. KFA, Jülich. (20 mois)
- 1992 Chargé de Recherche 1<sup>re</sup> classe à l'INRA, Université Pierre et Marie Curie à partir du 1<sup>er</sup> septembre 1992.

## Distinctions

- 1994 Prix Philip Morris, attribué au Laboratoire de Biogéochimie Isotopique.
- 1995 Prix de la Division de Chimie Analytique de la Société Française de Chimie.

## Langues étrangères

Anglais, Allemand, Espagnol (notions).

## ACTIVITÉS D'ADMINISTRATION

### Fonctions électives

Conseil Scientifique du Département de Science du Sol de l'INRA. 1993-1997.  
Secrétaire-Trésorier de la Division de Chimie Analytique de la Société Française de Chimie. 1995-  
Conseil d'Administration de la Société Française de Spectrométrie de Masse. 1996-  
Comité Scientifique de l'ENSAIA. 1996-

### Autres fonctions

Agent chargé de la prévention INRA. 1996-  
Membre du comité hygiène et sécurité de l'ENSAIA. 1997-

### Activité associative

#### *Associations professionnelles*

Association Fraternelle des Anciens Élèves de l'Institution Robin AFAE, Ste-Colombe. 1978-  
Association des Anciens Élèves de l'ESCIL-ITECH. 1985-  
Société Française de Chimie. 1986-  
Société Française de Spectrométrie de Masse. 1989-  
Association Bernard Grégory. 1989-  
Association "Alcanes" Université Louis Pasteur de Strasbourg. 1990-  
Association Latino-Américaine de Géochimie Organique ALAGO. 1990-  
Association Européenne de Géochimie Organique EAOG. 1993-  
Groupe de Spectrométrie de Masse de l'INRA. 1993-  
Société de Science du Sol Américaine SSSA. 1993-95.  
Association Nationale des Docteurs Ès Sciences ANDÈS. 1995-  
Association Française pour l'Étude du Sol AFÉS. 1996-

#### *Associations non professionnelles*

Donneur de sang bénévole. 1980-  
Association Française des Coureurs de Fond. 1992-  
Association Sportive de l'Université Pierre et Marie Curie. 1992-96.  
Adhérent à la Fédération Française de Triathlon. 1992-96.  
Mouvement de Défense de la Bicyclette. 1995-  
Spiridon Club Alsace/Trophée des Vosges. 1997-

## ACTIVITÉS D'ENCADREMENT

(E : Encadrement , PE : participation à l'encadrement , CE : co-encadrement)

### Diplôme Universitaire de Technologie

1993 Jérôme Landré (E). Stage du DUT de Chimie. Université Pierre et Marie Curie. 2 mois.

### Technicien

1992-96 Gérard Bardoux (PE). Technicien INRA. Université Pierre et Marie Curie. 4 ans.

### Ingénieur

1992 Cyril Girardin (PE). Ingénieur d'Étude INRA. 4 ans.

1996 Emilie Gérard, Marie-Ferréole Menu, Fahide Si Tahar, Élèves-Ingénieur ENSAIA (E). 4 mois.

1997 Marie-France Michel, Sophie Perbet, David Clause, Élèves-Ingénieur ENSAIA (E). 4 mois.

### Magistère

1993 Christèle Cauvin (E). Stage de 1<sup>e</sup> année de Magistère de Géologie. Université Pierre et Marie Curie.

### Diplômes d'Études Approfondies

1989 Christine Reiss (PE). DEA de Chimie Organique. Université de Strasbourg.

1993 Clémence Bosc (PE). DEA d'Écologie Générale et Production Végétales. Université Pierre et Marie Curie.

1994 Gersende Berthier (E). DEA de Chimie Analytique. Université Pierre et Marie Curie.

1997 Pascale Henner (E). DEA de Sciences Agronomiques. INPL.

1998 Carine Bryselbout (E), DEA de Sciences Agronomiques. INPL.

### Thèses

1989 Philippe Schaeffer (PE). Thèse. Université de Strasbourg. 4 mois.

1989 Pierre Adam (PE). Thèse. Université de Strasbourg. 1 an.

1990 Katherine Freeman (PE). Université de l'Indiana. Thèse. 1 an.

1990 Dawn Merritt (PE). Université de l'Indiana. Thèse. 1 an.

1990 James Collister (PE). Université de l'Indiana. Thèse . 1 an.

1992 Frank Hormes (PE). Thèse. Université d'Aachen. 1 an et demi.

1994 Véronique Créach (PE). Thèse. Université de Rennes. 2 ans.

1997 Anne Jaffrézic (PE). Thèse. Université de Rennes. 2 ans.

1997- Pascale Henner (CE). Thèse de l'INPL, en cours.

1998- Carine Bryselbout (CE). Thèse de l'INPL, en cours.

### Post-doctorat

1994 Sen Dou (E). Université Pierre et Marie Curie. 1 an et demi.

1998- Baïkova Svetlana (PE). INPL. 3 mois.

### Participation à des comités de pilotage INRA

1993-97 Anne Jaffrézic. Unité de Science du Sol de Rennes

1998- Christine Verge. INA. Thiverval-Grignon.

## ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

1985 Cours particuliers de mathématiques niveau 3<sup>e</sup>-Terminale, 3-4 h. le samedi.

1997 Introduction à la géochimie organique.

Cours du DEA de Sciences Agronomiques, UV Polluants dans le système sol-plante (3 h).

La sécurité en milieu professionnel. Cours-TD de 3<sup>ème</sup> année ENSAIA (2 h)

1998 Introduction à la géochimie organique.

Cours du DEA de Sciences Agronomiques, UV Polluants dans le système sol-plante (4 h).

La sécurité en milieu professionnel. Cours-TD de 3<sup>ème</sup> année ENSAIA (2 h).

## ANIMATION DE LA RECHERCHE

### Participation à des programmes de recherche

- 1986 Etude géochimique du bassin de Paris. Institut Français du Pétrole/ Université Louis Pasteur. 4 ans.
- 1990 Programme Américain de valorisation des schistes bitumineux. Université de l'Indiana. 1 an.
- 1991 "Ocean Drilling Program". Institut de Géochimie de Jülich. 1 an et demi.
- 1992 Action Incitative Programmée INRA "ECOPOL". Université Pierre et Marie Curie. 3 ans.
- 1993 Action Incitative Programmée INRA "AGRIGES". Université Pierre et Marie Curie. 3 ans.

### Co-rédaction de programmes de recherche

- 1998- Action Incitative Programmée INRA "AGREDE".  
Participation à la coordination de 4 unités.
- 1998- Contrat de recherche avec les sociétés GDF et ELF.
- 1998 Contrat de recherche avec la SETRA.
- 1998- Programme PNETOX, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.  
Coordinatrice: S. Houot, INRA Grignon.

### Organisation de séminaires

À l'Université de l'Indiana, en 1990, j'ai organisé les séminaires internes de biogéochimie isotopique. Je devais aussi animer une discussion tous les vendredis avec les chercheurs, sur la base de publications récentes. À l'Université Pierre et Marie Curie, j'ai organisé 6 séminaires (1994-1995)

### Organisation de colloques

- 1994 Journée d'étude de la matière organique des sols et des sédiments. Université Pierre et Marie Curie.
- 1998 The Biogeochemistry of Aromatic Hydrocarbons. Session du congrès international de la Société de Chimie Américaine. Dallas, 29 mars-2 avril 1998. Co-organisateur avec M. Nanny et S. Apitz (Etats-Unis).
- 1999 16<sup>e</sup> Journées Française de Spectrométrie de Masse. Nancy, 6-9 septembre 1999 (en cours).

### Animation de colloques

- 1997 Président d'une session au colloque IHSS, Dijon.
- 1998 Co-président de 3 sessions au colloque ACS, Dallas.

### Participation à des jurys scientifiques

#### Stage de fin d'étude des élèves-ingénieurs agronomes de l'ENSAIA (DAA)

Participation à 6 jurys en 1996 et à 6 jurys en 1997.

#### DEA

- 1994 Gersende Berthier. DEA de Chimie Analytique. Université Pierre et Marie Curie.
- 1997 Pascale Henner. DEA de Sciences Agronomiques. INPL.
- 1998 Carine Bryselbout. DEA de Sciences Agronomiques. INPL.
- 1998 Karine Markewitz. DEA de Sciences Agronomiques. INPL.

#### Thèse de doctorat

Philippe Schmitt. INPL. 1996.

### Correction d'articles scientifiques

Analisis 11, Analytica Chimica Acta 1, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 1, European Journal of Soil Science 1, Geochimica et Cosmochimica Acta 1, Organic Geochemistry 12, Paleoceanography 1, Proceedings of the Ocean Drilling Program 2, Proceedings of the 2nd International Symposium on 'Mineral-Organic-Microorganisms Interactions' 1.

### Activité d'édition

- Dossier "Soil pollutants". *Analisis* (1997). 13 articles, 72 pages.
- Dossier "Humic Substances". *Analisis* (1999). 14 articles, en cours.
- Dossier "Biogeochemistry of Aromatic Hydrocarbons". *Organic Geochemistry* (1999). 10 articles, en cours.

## LISTE DES COMMUNICATIONS

### Thèse

Lichtfouse E. (1989) Nouveaux stéroïdes aromatiques fossiles. *Thèse de Doctorat*, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 189 pages, 1989. Technip, 1990.

### Articles

- Lichtfouse E., Riolo J. et Albrecht P. (1990) Occurrence of 2-methyl-, 3-methyl- and 6-methyltriaromatic steroid hydrocarbons in geological samples. *Tetrahedron Letters* **31**, 3937-3940.
- Lichtfouse E., Freeman K.H., Collister J.W. et Merritt D.A. (1991) Enhanced resolution of organic compounds from sediments by isotopic gas chromatography-combustion-mass spectrometry. *J. of Chromatog.* **585**, 177-180.
- Lichtfouse E. et Collister J.W. (1992) Tracing biogenic links of natural organic substances at the molecular level with stable carbon isotopes: *n*-alkanes and *n*-alkanoic acids from sediments. *Tetrahedron Letters* **33**, 8093-8094.
- Lichtfouse E., Littke R., Disko U., Willsch H., Rullkötter J. et Stein R. (1992) Geochemistry and petrology of organic matter in Miocene to Quaternary deep sea sediments from the Japan Sea (Sites 798 and 799). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* **127/128**, 667-675.
- Collister J.W., Summons R.E., Lichtfouse E. et Hayes J.M. (1992) An isotopic biogeochemical study of the Green River oil shale. *Organic Geochemistry* **19**, 265-276.
- Lichtfouse E., Albrecht P. et Behar F. (1993) 3-Methyltriaromatic steroids in sediments, molecular fossils with unknown precursors. *Polycyclic Aromatic Compounds* **3**, 635-638.
- Lichtfouse E. et Rullkötter J. (1994) Accelerated transformation of organic matter below the silica transition zone in immature sediments from the Japan Sea. *Organic Geochemistry* **21**, 517-523.
- Lichtfouse et Albrecht P. (1994) Synthesis of triaromatic steroid hydrocarbons methylated at position 2, 3 or 6: molecular fossils of yet unknown biological origin. *Tetrahedron* **50**, 1731-1744.
- Lichtfouse E., Albrecht P., Behar F. et Hayes J.M. (1994) A molecular and isotopic study of the organic matter from the Paris Basin, France. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **58**, 209-221.
- Lichtfouse E., Derenne S., Mariotti A. et Largeau C. (1994) Possible algal origin of long chain odd *n*-alkanes in immature sediments as revealed by distributions and carbon isotope ratios. *Organic Geochemistry* **22**, 1023-1027.
- Lichtfouse E., Elbisser B., Balesdent J., Mariotti A. et Bardoux G. (1994) Isotope and molecular evidence for direct input of maize leaf wax *n*-alkanes into crop soils. *Organic Geochemistry* **22**, 349-351.
- Collister J.W., Lichtfouse E., Hieshima G. et Hayes J.M. (1994) Partial resolution of sources of *n*-alkanes in the saline portion of the Parachute Creek Member, Green River Formation. *Organic Geochemistry* **21**, 645-659.
- Lichtfouse E. (1995) D'où viennent les substances organiques du sol? *Mensuel de l'INRA* **80**, 4-5.
- Lichtfouse E. (1995) <sup>13</sup>C labelling of soil *n*-hentriacontane (C<sub>31</sub>) by maize cultivation. *Tetrahedr. Lett.* **36**, 529-530.
- Lichtfouse E. et Budzinski H. (1995) <sup>13</sup>C analysis of molecular organic substances, a novel breakthrough in analytical sciences. *Analyses* **23**, 263-265.
- Lichtfouse E. et Eglinton T.I. (1995) <sup>13</sup>C and <sup>14</sup>C evidence of pollution of a soil by fossil fuel and reconstruction of the composition of the pollutant. *Organic Geochemistry* **23**, 969-973.
- Lichtfouse E., Berthier G., Houot S., Barriuso E., Bergheaud V. et Vallaëys T. (1995) Stable carbon isotope evidence for the microbial origin of C<sub>14</sub>-C<sub>18</sub> *n*-alkanoic acids in soils. *Organic Geochemistry* **23**, 849-852.



- Lichtfouse E., Dou S., Girardin C., Grably M., Balesdent J., Behar F. et Vandenbroucke M. (1995) Unexpected  $^{13}\text{C}$ -enrichment of organic components from wheat crop soils: evidence for the *in situ* origin of soil organic matter. *Organic Geochemistry* **23**, 865-868.
- Lichtfouse E., Dou S., Houot S. et Barriuso E. (1995) Isotope evidence for soil organic carbon pools with distinct turnover rates. II. Humic substances. *Organic Geochemistry* **23**, 845-847.
- Lichtfouse E., Chenu C. et Baudin F. (1996) Resistant ultralaminae in soils. *Organic Geochemistry* **25**, 263-265.
- Lichtfouse E. (1997) Heterogeneous turnover of molecular organic substances from crop soils as revealed by  $^{13}\text{C}$  labeling at natural abundance with *Zea mays*. *Naturwissenschaften* **84**, 23-25.
- Lichtfouse E. (1997) Soil, a sponge for pollutants. *Analisis* **25**, 16-23.
- Henner P., Schwartz C. et Lichtfouse E. (1997) Pipette Pasteur extraction: a fast, convenient, exhaustive and environmentally friendly method for the extraction of solid samples. *Analisis* **25**, 51-52.
- Henner P., Schiavon M., Morel J.L. et Lichtfouse E. (1997) Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) occurrence and remediation methods. *Analisis* **25**, 56-59.
- Lichtfouse E., Bardoux G., Mariotti A., Balesdent J., Ballentine D.C. et Macko S.A. (1997) Molecular,  $^{13}\text{C}$ , and  $^{14}\text{C}$  evidence for the allochthonous and ancient origin of  $\text{C}_{16}$ - $\text{C}_{18}$  *n*-alkanes in modern soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **61**, 1891-1898.
- Lichtfouse E., Budzinski H., Garrigues P. et Eglinton T.I. (1997) Ancient polycyclic aromatic hydrocarbons in modern soils:  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$  and biomarker evidence. *Organic Geochemistry* **26**, 353-359.
- Lichtfouse E. (1998) Isotope and biosynthetic evidence for the origin of long-chain aliphatic lipids in soils. *Naturwissenschaften* **85**, 76-77.
- Lichtfouse E., Chenu C., Baudin F., Leblond C., Da Silva M., Behar F., Derenne S., Largeau C., Wehrung P. et Albrecht P. (1998) A novel pathway of soil organic matter formation by selective preservation of resistant straight-chain biopolymers: chemical and isotope evidence. *Organic Geochemistry* **28**, 411-415.
- Lichtfouse E., Leblond C., Da Silva M. et Behar F. (1998) Occurrence of biomarkers and straight-chain biopolymers in humin: implication for the origin of soil organic matter. *Naturwissenschaften* **85**, 497-501.
- Lichtfouse E., Wehrung P. et Albrecht P. (1998) Plant wax *n*-alkanes trapped in soil humin by noncovalent bonds. *Naturwissenschaften* **85**, 449-452.
- Bryselbout C., Henner P. et Lichtfouse E. (1998) Fossil fuel biomarkers in plant waxes as pollution parameters. *The Science of the Total Environment*, sous presse.

#### **Actes de colloques avec comité de lecture**

- Lichtfouse E. et Proix N. (1994) Constituants organiques du sol: nature, propriétés et interactions avec les constituants minéraux. Compte-rendu des Journées de Formation Jeunes Chercheurs, Toulouse.
- Lichtfouse E., Dou S., Mariotti A., Behar F. et Vandenbroucke M. (1995) A novel isotopic approach to study soil organic substances. In *Organic Geochemistry: Developments and Applications to Energy, Climate, Environment and Human History*. Eds. J.O. Grimalt and C. Dorronsoro. 37-38. AIGOA, Donastia, Espagne.
- Lichtfouse E. et Baudin F. (1995) Geochemical changes at the organic-rich/organic-poor boundary in Akkuyu limestones. *Ibid.*, 837-839.
- Lichtfouse E., Dou S., Berthier G. et Peakman T. (1995) Bound alcohols in soil humic substances. *Ibid.*, 974-975.

Lichtfouse E., Perrin O. et Arrouays D. (1997) Dynamique de la matière organique des sols à l'échelle régionale.

*Compte-rendu des Journées de Formation Jeunes Chercheurs*, Orléans, mai 1997.

Schiavon M., Barriuso E., Lichtfouse E. et Morel J.-L. (1997) Contamination des sols et des productions agricoles par les produits phytosanitaires et les micropolluants organiques. Actes des 3<sup>e</sup> rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre. Blois. Édité par G. Thevenet et P. Riou. Pages 155-169.

Morel J.-L., Chaîneau C.H., Schiavon M. et Lichtfouse E. (1999) The role of plants in the remediation of contaminated soils. Phytoremediation of soils. In *ASI Bioavailability of Organic Xenobiotics in the Environment*. NATO Advanced Study Institute. Jeseník, Czech Republic, August 18-29, 1997. Sous presse.

### **Communications courtes à des colloques internationaux**

Lichtfouse E., Riolo J., Albrecht P. et Behar F. (1989) Short chain 3-methyltriaromatic steroids in marine shales from Paris basin, a novel maturity indicator. Résumé et exposé oral. 14<sup>th</sup> Internat. Meet. on Org. Geochem., Paris.

Lichtfouse E., Collister J. et Hayes J.M. (1990) A comparison of *n*-alkanes and *n*-fatty acids in Green River sediments. Résumé et affiche. Gordon Research Conferences, Plymouth, New Hampshire.

Lichtfouse E. et Albrecht P. (1990) Synthesis of 2-methyl-, 3-methyl- and 6-methyltriaromatic steroids.

Résumé et affiche. Amoco/University Poster Session, Naperville, Illinois.

Lichtfouse E. et Albrecht P. (1990) Occurrence of 2-methyl-, 3-methyl- and 6-methyltriaromatic steroids in sediments and petroleum. Résumé et exposé oral. 2<sup>nd</sup> Latin American Congress on Organic Geochemistry, Caracas.

Collister J., Lichtfouse E., Summons R. et Hayes J.M. (1991) An isotopic biogeochemical study of the Green River oil shale. Résumé et exposé oral. 15<sup>th</sup> Internat. Meet. on Organic Geochemistry, Manchester.

Lichtfouse E., Albrecht P. et Behar F. (1991) Triaromatic steroids in sediments. Identification, origin and use as geochemical parameters. Résumé et exposé oral. 13<sup>th</sup> Polyaromatic Hydrocarbons Symposium, Bordeaux.

Lichtfouse E. et Rullkötter J. (1992) Molekulare Stratigraphie in unreifen Sedimenten aus der Japan See.

Résumé et affiche. Kolloq. des DFG-Schwerpunktprog. Ocean Drilling Program. Hamburg.

Lichtfouse E. et Rullkötter J. (1992) Diagenesis of organic matter in siliceous sediments from the Japan Sea.

Résumé et affiche. 4<sup>th</sup> International Conference on Paleooceanography, Kiel.

Lichtfouse E. et Collister J. (1992) Tracing biogenic links of natural organic substances at the molecular level with stable carbon isotopes. Résumé et affiche. 18<sup>th</sup> IUPAC Symp. on the Chem. of Nat. Prod., Strasbourg.

Lichtfouse E., Behar F., Hayes J. et Albrecht P. (1992) Oil-source rock correlation in the Paris basin, a molecular and isotopic approach. Résumé et affiche. 3<sup>rd</sup> Latin American Congress on Organic Geochemistry, Manaus.

Lichtfouse E. et Rullkötter J. (1992) Molecular stratigraphy in immature sediments from the Japan Sea.

Résumé et exposé oral. 3<sup>rd</sup> Latin American Congress on Organic Geochemistry, Manaus.

Lichtfouse E., Balesdent J. et Mariotti A. (1994) The fate of organic matter and individual organic substances from soils by <sup>13</sup>C tracing at natural abundance. Résumé et exposé oral, 4<sup>th</sup> Lat. Am. Cong. on Org. Geoch., Bucaramanga.

Lichtfouse E., Dou S. et Mariotti A. (1994) Molecular structure of humic substances by chemical degradation.

Résumé et affiche, 4<sup>th</sup> Latin American Cong. on Org. Geochem., Bucaramanga.

Lichtfouse E., Chenu C., Behar F., Derenne S., Largeau C., Baudin F. et Balesdent J. (1996) On the origin of soil organic carbon. Résumé et Affiche, 2<sup>nd</sup> International Symposium ISMOM, Nancy.

Lichtfouse E. (1996) Soil organic matter : new insights from molecular and <sup>13</sup>C studies.

Résumé et exposé oral. Informal European Stable Isotope Meeting III, Nancy.

Lichtfouse E., Henner P., Florentin L., Schwartz C., Schiavon M., Morel J.-L. et Druelle V. (1998) Plant growth on PAH contaminated soils. Résumé et exposé oral. ACS International Meeting, Dallas.

### **Communications à des colloques nationaux**

Lichtfouse E., Dany F. et Albrecht P. (1989) Identification de 3-méthylstérane, de 3-méthylstéroïdes triaromatiques et de 3-carboxystérane dans les sédiments et les pétroles. Affiche, Réunion de l'URA 31 du CNRS, Strasbourg.

Budzinski H., Garrigues P., Lichtfouse E., Mariotti A. et Hayes J.M. (1993) Couplage CG/SM isotopique du carbone : accès aux signatures isotopiques ( $^{13}\text{C}$ ) moléculaires. Résumé et exposé oral, Deauville Conf., Symp. on Anal. Sci.

Budzinski H., Garrigues P., Lichtfouse E., Mariotti A. et Hayes J.M. (1993) Couplage chromatographie en phase gazeuse-combustion-spectrométrie de masse (CG-C-SM) isotopique du carbone: application à la géochimie pétrolière. Résumé et affiche, 10<sup>e</sup> Journées Françaises de Spectrométrie de Masse, Paris.

Lichtfouse E., Mariotti A., Budzinski H., Garrigues P., Collister J. et Hayes J.M. (1993) Traçage de molécules biologiques avec les isotopes stables du carbone. Résumé et exposé oral, 10<sup>e</sup> J. Fr. de Spectrom. de Masse, Paris.

Lichtfouse E., Dou S. et Mariotti A. (1994) Bound alcohols released by mild alkaline hydrolysis of humic substances. Résumé et affiche, Gordon Research Conferences, Plymouth, New Hampshire.

Lichtfouse E. (1994) Une nouvelle méthode d'étude de mélanges lipidiques par traçage au carbone 13.

Résumé et affiche, 11<sup>e</sup> Journées Françaises de Spectrométrie de Masse, Rouen.

Lichtfouse E., Berthier G., Dou S., Mariotti A., Bardoux G., Girardin C. et Grably M. (1994) Analyse isotopique  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  des alcools du sol et des plantes. Résumé et affiche, *Ibid.*

Lichtfouse E., Dou S., Berthier G. et Mariotti A. (1994) Des stérols liés à l'humus. Résumé et exposé oral, *Ibid.*

Lichtfouse E. et Rullkötter J. (1994) Une nouvelle transition détectée dans les sédiments par CG-SM.

Résumé et affiche, *Ibid.*

Lichtfouse E., Albrecht P., Behar F. et Hayes J.M. (1994) Des "coelacanthés moléculaires" dans les sédiments du bassin de Paris. Résumé et affiche, *Ibid.*

Jaffrézic A., Lichtfouse E., Dou S. et Bourrié G. (1994) Analyse de substances humiques par spectrométrie de masse en mode électrospray. Résumé et affiche, *Ibid.*

Lichtfouse E., Balesdent J. et Mariotti A. (1995) D'où viennent les molécules organiques du sol? Une approche moléculaire et isotopique. Résumé et exposé oral, 12<sup>e</sup> Journées Françaises de Spectrométrie de Masse, Bordeaux.

Lichtfouse E. (1996) Biogéochimie isotopique et moléculaire du sol. Résumé et exposé oral.

16<sup>e</sup> Réunion des Sciences de la Terre, Orléans.

Lichtfouse E., Budzinski H., Garrigues P. et Eglinton T. (1996) Des vieux aromatiques dans les sols modernes.

Résumé et exposé oral, 13<sup>e</sup> Journées Françaises de Spectrométrie de Masse, Orléans.

Baudin F., Tribouvillard N., Laggoun-Defarge F., Boussafir M., Lichtfouse E., Monod O. et Gardin S. (1996)

Environnement de dépôt d'un niveau carbonaté noir du Kimméridgien. Résumé et affiche. Séd. de la Mat. Org., Paris.

Henner P., Caron S. et Lichtfouse E. (1997) Analyse par GC-MS des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) de sols contaminés. Résumé et exposé oral, 14<sup>e</sup> Journées Françaises de Spectrométrie de Masse, Lille.

Lichtfouse E., M. Schiavon M. et J.-L. Morel J.L. (1997) Humic substances, a trap for pollutants. Résumé et exposé oral, Colloque IHSS, Dijon.

Lichtfouse E. (1998) Des compartiments temporels de molécules organiques dans les sols.

Résumé et exposé oral, 15<sup>e</sup> Journées Françaises de Spectrométrie de Masse, Lyon.

Bryselbout C. et Lichtfouse E. (1998) Des molécules fossiles dans les plantes. Résumé et exposé oral, *Ibid.*

## Séminaires de recherche

Utilisation des stéroïdes aromatiques comme marqueurs biologiques dans les pétroles du bassin de Paris.

Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison, juin 1987.

Isomérisation du 1-méthylphénanthrène catalysée par l'argile.

Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison, juin 1988.

Diagenèse des stéroïdes.

Séminaire de Géochimie Organique, Institut de Chimie, Strasbourg, avril 1989.

Identification of methyltriaromatic steroids in Paris basin shales.

Séminaire de Biogéochimie Isotopique, Université de l'Indiana, Bloomington, février 1990.

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  isotopic study of *n*-alkanes in oils and shales from the Paris basin.

Séminaire de Biogéochimie Isotopique, Université de l'Indiana, Bloomington, décembre 1990.

Oil-source rock correlations in Paris basin using biomarkers and carbon isotopes.

Institut de Chimie et Dynamique de la Géosphère, Jülich, septembre 1991.

Molecular stratigraphy in immature sediments from the Japan Sea (ODP Sites 798 & 799).

Institut de Chimie et Dynamique de la Géosphère, Jülich, mars 1992.

Origine et transformation de la matière organique du sol: une étude moléculaire et isotopique.

Journées Jeunes Chercheurs INRA, Station Biologique de Paimpont, octobre 1993.

Labelling soil organic matter with  $^{13}\text{C}$  by maize cropping.

Séminaire de Biogéochimie Organique, Université de Bristol, mai 1994.

An isotopic and molecular study of soil *n*-alkanes.

Universités de l'Indiana, de l'Utah, de Caroline du Sud, de Pennsylvanie, août 1994.

Étude des acides humiques du sol.

Séminaire de Biogéochimie Isotopique, Université Pierre et Marie Curie, octobre 1994.

Étude isotopique et moléculaire des constituants organiques du sol.

Séminaire de Géochimie Organique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, novembre 1994.

Sols et sédiments: les mêmes questions.

Journée d'étude de la matière organique du sol et des sédiments, Univ. Pierre et Marie Curie, nov. 1994.

Une nouvelle approche isotopique pour l'étude des sols et des sédiments.

Journée d'étude de la matière organique du sol et des sédiments, Univ. Pierre et Marie Curie, nov. 1994.

Étude moléculaire et isotopique des matières organiques du sol.

Journées de formation des Jeunes Chercheurs de Science du Sol, Toulouse, novembre 1994.

D'où viennent les molécules organiques du sol?

Station de Science du Sol, INRA, Centre de Versailles, mars 1995.

La sécurité au laboratoire. ENSAIA, novembre 1996.

Géochimie organique et environnementale du sol. ENSAIA, novembre 1996.

Compartiments temporels de molécules organiques dans l'humus. ENSAIA, mai 1998.

## Documents pour l'enseignement et la diffusion de la recherche

Lichtfouse E. (1989) Diagenèse des stéroïdes. Laboratoire de Géochimie Organique, Univ. de Strasbourg. 11 pages.

Lichtfouse E. (1990)  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  isotopic study of *n*-alkanes, phytanes in petroleum and shales from the Paris basin.

Laboratoire de Biogéochimie Isotopique, Université de l'Indiana. 22 pages.

Lichtfouse E. (1991) Oil-source rock correlations in the Paris basin using biomarkers and carbon isotopes. Institut de Chimie et Dynamique de la Géosphère, Jülich. 25 pages.

Lichtfouse E. (1997) Introduction à la géochimie organique. Cours du DEA de Sciences Agronomiques. 103 pages.

Lichtfouse E. (1997) Questionnaire ludique sur la sécurité en milieu professionnel. Cours de 3ème année ENSAIA. 1 p.

Henner P., Lichtfouse E. et Morel J.-L. (1997) Dépollution des sols par culture de plantes. La Science en Fête. 1 p.

### **Rapports**

Synthèse d'un polymère complexant. Stage au CRM. Strasbourg, 20 pages, 1982.

Synthèse asymétrique d'époxydes de chalcones substituées. DEA. Univ. C. Bernard, Lyon, 56 pages, 1985.

Rapport de recherche et développement de produits agro-alimentaires. Société Perlamande, Oraison, 55 pages, 1986.

Analyse et utilisation de marqueurs biologiques dans le bassin de Paris. Rapport IFP. 25 pages, 1987.

Étude géochimique du bassin de Paris à l'aide de marqueurs biologiques. Rapport IFP. 33 pages, 1988.

### **Conférences invitées**

Gordon Research Conferences on Organic Geochemistry, Plymouth, New Hampshire, USA. 10-14 août 1992.

Dr. J. K. Whealan, Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts.

American Chemical Society Symposium, Denver, Colorado, USA. 28 mars- 2 avril 1993. Geochemistry Division.

Dr. T. Goldstein, Mobil, Princeton, NJ, & Dr. F. P. Miknis, Laramie, WY.

Gordon Research Conferences on Organic Geochemistry, Plymouth, New Hampshire, USA. 14-19 août 1994.

Dr. M. Lewan, US Geological Survey, Denver, CO.

University of South Carolina, USA. Juillet 1994.

Dr. D. A. Wavrek, Earth Sci. and Res. Inst., University of South Carolina, Columbia.

American Chemical Society Symposium, Chicago, Illinois, USA. 20-24 août 1995.

Dr. K. H. Freeman, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania.

SEPM Congress on Sedimentary Geology, St. Petersburg, Florida, USA. 13 août 1995.

Drs. P. Ostrom & L. Robbins, Geol. Sci., Michigan University, East Lansing.

Geochemistry Unit, Université de Bristol. Mai 1994.

Prof. G. Eglinton, University of Bristol, Bristol, UK.

British Organic Geochemical Society Meeting, Bristol, UK. 12-14 juillet 1995.

Prof. J. Maxwell, University of Bristol, Bristol, UK.

Gordon Research Conferences on Organic Geochemistry, Plymouth, New Hampshire, USA. 11-16 août 1996.

Prof. R. Alexander, Perth, Australia.

American Chemical Society Symposium, Orlando, Florida, USA. 25-30 août 1996.

Dr. P. G. Hatcher, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania.

Colloque du groupe français de l'IHSS : Analyse et diversité des substances humiques naturelles. 27-28 nov. 1997.

Drs. J. Lévêque, F. Andreux et P. Amiotte-Suchet, Université de Bourgogne.

### **Divers**

Lichtfouse E. (1986) Accréditation de deux formulations de confitures au service des fraudes de Marseille. Société Perlamande, Oraison, 4 pages.

Schwartz C. et Lichtfouse E. (1996) Cette note peut vous sauver la vie. Note mnémotechnique de sécurité du laboratoire. 1 page. Novembre 1996.