

# L'analyse en chimie environnementale

## Du prélèvement au dosage

Sandrine Irace-Guigand et Jean-Jacques Aaron

**Résumé** Une des causes majeures de la dégradation de la qualité des écosystèmes provient de l'utilisation intensive et de l'occurrence de polluants organiques persistants dans l'environnement. Du fait de la diversité des échantillons environnementaux, on a généralement recours aux méthodes multirésidus afin d'analyser les micropolluants organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques : HAP, composés organiques volatils : COV, polychlorobiphényles : PCB et pesticides). Dans cet article, les principales étapes analytiques comprenant l'échantillonnage, l'extraction, la séparation et la détection sont décrites. Afin de rendre compte de la versatilité de l'analyse en chimie environnementale, nous avons comparé trois méthodes multirésidus : SPME-CG-SM pour les PCB et COV dans l'air et l'eau ; Soxhlet-CLHP-UV/visible et CG-SM pour les HAP dans les sédiments et SPE-CLHP-SM pour les pesticides dans les eaux. Les performances des procédures d'extraction, des séparations chromatographiques et des systèmes de détection ont été discutées vis-à-vis de ces familles de polluants organiques contenus dans les différents compartiments. La présentation générale et la prise en compte de méthodes multirésidus est une alternative prometteuse dans la résolution d'un grand nombre de problèmes pour l'analyse en chimie environnementale.

**Mots-clés** **Analyse environnementale, méthodes multirésidus, hydrocarbures aromatiques polycycliques, polychlorobiphényles, composés organiques volatils, pesticides.**

**Abstract** **Analysis in environmental chemistry: from sampling to quantification**  
One of the main causes of the degradation of the ecosystems quality is due to the utilization of persistent organic pollutants, which results in their more or less important occurrence in the environment. Because of the complexity of environmental samples, multiresidue methods are generally required for the analysis of organic pollutants (polycyclic aromatic hydrocarbons: PAH; volatile organic compounds: VOC; polychlorobiphenyls: PCB and pesticides). In this paper, the main analytical steps needed for these methods, including sampling, extraction, separation and detection are described. In order to illustrate the versatility of environmental analytical chemistry, we compare the efficiency of three multiresidue methods: SPME-GC-MS for PCB and VOC in air and water; Soxhlet-HPLC-UV/visible and GC-MS for PAH in sediments and SPE-HPLC-MS for pesticides in waters. The performance of the extraction procedures, chromatographic separation and detection systems are discussed in the case of several pollutants and the different compartments. The various multiresidue methods presented here constitute promising, alternative approaches to solve a number of environmental analytical chemistry problems.

**Keywords** **Environmental analysis, multiresidues methods, polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorobiphenyls, volatile organic compounds, pesticides.**

Le développement de méthodes d'analyse des polluants dans l'environnement a nécessité de rapprocher les compétences des biologistes, des chimistes et des physiciens. Sur le plan analytique, la chimie environnementale comprend deux aspects complémentaires :

- l'analyse chimique proprement dite fournit des informations concernant l'identification des polluants dans le milieu concerné, leurs propriétés physico-chimiques et biologiques, leurs niveaux de concentration... ;
- l'écotoxicologie concerne les impacts de ces contaminants et leurs niveaux de pollution sur l'écosystème et la santé humaine.

Afin d'appliquer les méthodes d'analyse à l'environnement, on définit une stratégie intégrée et globale de l'analyse

en chimie environnementale. Il s'agit d'établir un protocole analytique prenant en compte l'aspect environnemental, ce qui nécessite les études suivantes :

- identifier la nature des polluants présents dans l'écosystème (études de terrain afin de déterminer des listes prioritaires de surveillance...);
- sélectionner les méthodes d'analyse adaptées aux seuils de concentrations des polluants rencontrés dans le milieu ;
- choisir la période et la fréquence des prélèvements afin qu'ils soient représentatifs des variations spatiales et temporelles des concentrations des polluants dans l'environnement ;
- tracer des droites d'étalonnage sur une large échelle de concentration (analyse quantitative) ;

## Glossaire

<b>APCI</b>	« atmospheric pressure chemical ionization » : ionisation chimique à pression atmosphérique
<b>CG</b>	chromatographie gazeuse
<b>CLHP</b>	chromatographie liquide haute performance
<b>COV</b>	composés organiques volatils
<b>ECD</b>	« electron capture detection » : détecteur à capture d'électrons
<b>ELL</b>	extraction liquide-liquide
<b>ESL</b>	extraction solide-liquide
<b>EPA</b>	« Environmental Protection Agency » : agence de protection de l'environnement (États-Unis)
<b>Fluo</b>	fluorimètre
<b>HAP</b>	hydrocarbures aromatiques polycycliques
<b>IF</b>	ionisation de flamme
<b>LOD</b>	limites de détection
<b>PCB</b>	polychlorobiphényles
<b>PSDVB</b>	cartouche d'extraction solide-liquide en polystyrène-divinylbenzène
<b>Rdt %</b>	rendements d'extraction (en %)
<b>RSD</b>	déviations relatives standard (en %)
<b>SM</b>	spectrométrie de masse
<b>SPE</b>	extraction sur support solide
<b>SPME</b>	« solid phase micro extraction » : microextraction en phase solide
<b>UV-DAD</b>	« UV-diode array detector » : détecteur UV à barrette de diodes

- évaluer sensibilité, sélectivité, efficacité, reproductibilité et robustesse de la (ou des) méthode(s) choisie(s) ;
- proposer un plan d'expériences comprenant différentes étapes analytiques (échantillonnage, extraction, séparation, détection, validation, valorisation des résultats).

Parmi les polluants ou xénobiotiques qui doivent être analysés dans l'environnement, on peut citer les hydrocarbures, les métaux, les médicaments, les pesticides... Les métaux et les produits pharmaceutiques font l'objet d'études détaillées dans ce numéro [1-2]. Dans le présent article, nous décrirons tout d'abord les principales étapes des méthodes d'analyse multirésidus pour les différents compartiments de l'environnement. Nous donnerons ensuite quelques exemples concernant l'analyse de micropolluants organiques (généralement présents à des concentrations inférieures au  $\mu\text{g/L}$ ), comprenant les composés organiques volatils (COV), les polychlorobiphényles (PCB), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les pesticides.

## Devenir des polluants organiques dans l'environnement

Les micropolluants organiques proviennent de diverses sources généralement d'origine anthropique (industrie, transport, agriculture...). Ils peuvent se rencontrer dans plusieurs compartiments de l'environnement : l'air, l'eau et/ou les sols et diffuser d'un compartiment à l'autre (figure 1). Qu'il s'agisse de matrices gazeuses, liquides ou solides, les techniques d'analyse doivent s'adapter à chaque forme de la matière.

Afin d'étudier les processus physico-chimiques, physiques, photochimiques et biologiques contribuant à la dégradation des polluants organiques et à la formation de leurs métabolites dans l'environnement, on adopte un plan

d'expériences qui comporte généralement cinq étapes dans le cas d'une méthode d'analyse multirésidus :

### Plan d'expériences

- Étape 1 : échantillonnage
- Étape 2 : extraction
- Étape 3 : séparation
- Étape 4 : détection
- Étape 5 : automatisation

## Échantillonnage et extraction

Les prélèvements sont collectés selon une stratégie d'échantillonnage établie à partir des études de terrain et des banques de données existantes sur la pollution par les contaminants d'intérêt. Les différentes techniques d'échantillonnage et d'extraction sont adaptées au compartiment dans lequel on trouve les polluants (air, sols, eaux).

### Air

Les composés contenus dans l'air sont échantillonnés et extraits quasi simultanément. Du fait de la volatilité des polluants contenus dans l'air, il est nécessaire de les retenir soit par liquéfaction, soit directement (sans changement d'état) par adsorption sur un support solide de type cartouche de résine, fibres polyuréthane ou filtres. Des techniques alternatives comme la micro-extraction sur support solide (SPME) peuvent être utilisées afin de retenir préférentiellement les hydrocarbures légers, les PCB ou les COV (figure 2) [3-7].

### Sols

Le prélèvement des composés d'intérêt des matrices solides s'effectue de la façon suivante :

- par carottage dans la matrice solide pour les fractions granulométriques ayant des diamètres particuliers de l'ordre du mm ou de la centaine de  $\mu\text{m}$ , ce qui correspond à quelques g ou mg de matière sèche ;
- par filtration sur des filtres en papier poreux ou traitement physico-chimique et floculation des fractions de l'ordre du  $\mu\text{m}$ , c'est-à-dire quelques mg de matière sèche.

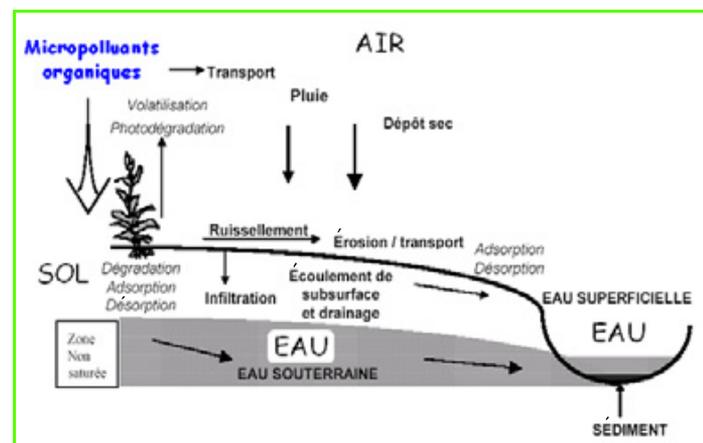


Figure 1 - Dispersion des micropolluants organiques dans les eaux, l'air et les sols (d'après [26]).

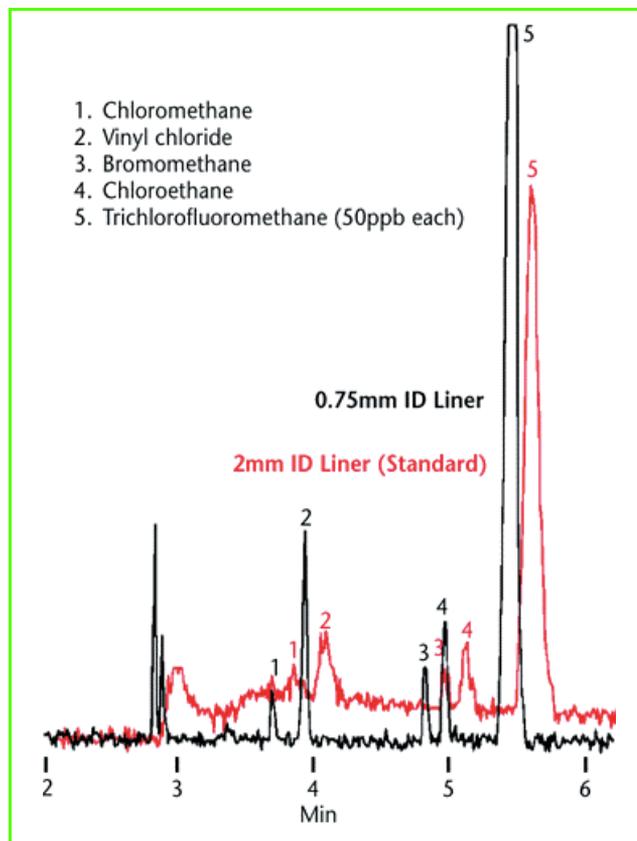


Figure 2 - Exemple d'analyse de COV par SPME sur fibre polydiméthylsiloxane, 100  $\mu$ m film (© Supelco sur <http://www.sigmaaldrich.com/>).

Quelle que soit la technique spécifique de prélèvement utilisée, qui est donc fonction de la taille des substances d'intérêt, les composés solides devront être solubilisés préalablement à l'extraction. Les deux extractions dédiées aux matrices solides les plus fréquemment utilisées sont l'extraction par ultrasons et le Soxhlet. Cependant, l'extraction supercritique et l'extraction par solvant chaud sous pression (PSE) sont actuellement privilégiées car elles s'avèrent plus économes en solvant, plus efficaces et plus reproductibles, ce qui facilite leur automatisation (figure 3) [8-11].

## Eaux

L'échantillonnage et l'extraction des micropolluants organiques, présents à l'état de traces dans les eaux et pouvant être associés ou non à la matière minérale ou organique, nécessitent deux étapes successives :

- pour l'échantillonnage, une succession de filtrations frontales et tangentielles afin de choisir la fraction granulométrique dans laquelle sont concentrés les produits d'intérêt ;
- pour la séparation, une extraction solide/liquide (ESL) ou liquide/liquide (ELL) afin de concentrer les micropolluants et d'éliminer les interférents.

L'échantillonnage impose d'opérer des fractionnements granulométriques dans le continuum de tailles et de masses moléculaires des espèces organiques présentes dans les eaux. On distingue ainsi, selon la taille des particules, plusieurs systèmes de filtrations :



Figure 3 - Dispositif d'extraction des solides par solvant à chaud (le carrousel gris est le porteur des échantillons).

conventionnelle (frontale), microfiltration, ultrafiltration... (figure 4).

Pour séparer les micropolluants, les techniques d'extraction en ligne ou en différé sur supports solides poreux sont plus utilisées que l'ELL, car elles permettent de diminuer la consommation de solvant, d'augmenter les rendements et d'améliorer la reproductibilité [12-15]. Cependant, si la concentration en carbone organique total [COT] de l'échantillon est supérieure à 2-3 mg/L, cette matrice organique est suffisamment importante pour saturer, voire colmater le support en ligne, le rendant ainsi inefficace ; dans ce cas, il faudra appliquer l'ESL en différé sur les cartouches. Le choix du type de greffage du support s'effectue en fonction de l'hydrophobicité des polluants. Pour les micropolluants polaires, on préférera la phase normale (Si, CN...) ; pour les contaminants apolaires, la phase inverse (C8, C18...) ; pour les produits ioniques, des résines échangeuses d'ions (SAX, SCX...) ; et pour l'analyse multirésidus, des supports polymères (polystyrène, divinylbenzène, PRP1, PLRPS...) et/ou hybrides (fonction amide, amine ou ammonium quaternaire...). Il est évidemment essentiel de sélectionner parmi ces supports d'ESL la phase la mieux adaptée à la forme chimique (atomique, ionique, moléculaire ou polymère) des micropolluants rencontrés dans les eaux.

D'autres techniques d'extraction comme l'immuno-adsorption, fondée sur le principe d'une reconnaissance

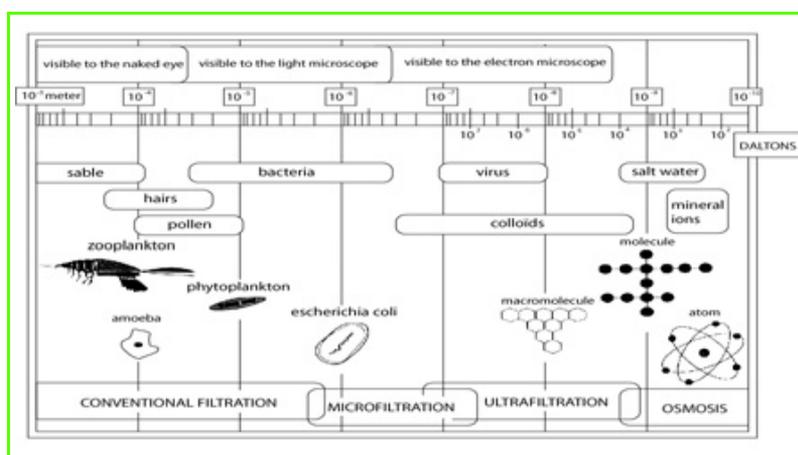


Figure 4 - Dispositifs d'échantillonnage dans le continuum de tailles et de masses moléculaires de la matière organique des eaux naturelles (© [26]).

antigène (polluant)-anticorps (antipolluant) constituent de nouvelles alternatives [16-18]. Ces techniques semblent prometteuses, mais sont actuellement en phase d'évaluation et d'optimisation.

### Couplage : séparation-détection

En vue de définir un protocole pour l'analyse qualitative et quantitative en chimie environnementale, il convient de distinguer trois composantes :

- le (ou les) analyte(s), les micropolluants ;
- la matrice, la matière organique ;
- l'environnement, le milieu.

Il faut aussi souligner que la mise au point d'une stratégie d'analyse chimique dans l'environnement présente des difficultés inhérentes aux interactions mutuelles de ces trois composantes. Ainsi, le grand nombre et la variété des substances polluantes organiques obligent à développer des méthodes multirésidus comprenant un couplage entre un système de séparation et un (ou des) détecteur(s) qui soient reproductibles. De plus, la matière organique se trouvant dans la matrice ou le milieu peut être responsable de fortes interactions matrice/polluants ou milieu/polluants et, par conséquent, détermine le choix judicieux des techniques d'échantillonnage et d'extraction décrites précédemment. Lorsque les micropolluants organiques présentent des différences d'occurrence dans l'environnement, on cherche à développer des méthodes de couplage séparation-détection automatisables de surveillance de la contamination.

Depuis le début des années 90, plusieurs équipes ont présenté et discuté des avantages et des inconvénients des méthodes d'analyse multirésidus des micropolluants organiques [19-21]. En effet, par rapport aux méthodes classiques d'analyse, les méthodes multirésidus s'avèrent généralement plus efficaces, plus robustes, plus reproductibles et plus facilement automatisables, car elles permettent de coupler la séparation et la détection. Il s'agit généralement de couplage entre les méthodes chromatographiques et spectroscopiques. Parmi les méthodes chromatographiques, on citera la chromatographie gazeuse (CG) et la chromatographie liquide à haute performance (CLHP) adaptée à l'analyse

des composés thermolabiles (figure 5). Sur le plan de la détection, les techniques spectroscopiques couplées avec la CLHP les plus utilisées sont : la fluorescence, l'absorption UV classique et la barrette de diodes (UV-DAD), la spectrométrie de masse (SM) avec ionisation chimique à pression atmosphérique (APCI) ou électrospray. Les principaux détecteurs en CG comprennent la capture d'électrons (ECD), l'ionisation de flamme (FID) ou encore la spectrométrie de masse avec impact électronique (IE). Les spectromètres de masse peuvent être utilisés en mode SIM (sélection du pic moléculaire ou « single ion monitoring ») ou SCAN (sélection de l'échelle  $m/z = 40-400$ ).

### Exemples d'analyses de polluants organiques

En fait, le choix de la méthode d'analyse multirésidus dépend de plusieurs critères, à savoir : le type d'échantillon (air, eau, sol) et/ou la (ou les) famille(s) chimique(s) des analytes (HAP, PCB, COV, pesticides).

Nous présenterons ici trois exemples d'analyses de polluants organiques dans l'environnement :

#### Analyses de polluants organiques dans des échantillons environnementaux

Exemple 1 : Composés organiques volatils (COV) et polychlorobiphényles (PCB) dans les eaux par SPME-CG-SM.

Exemple 2 : Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sédiments par Soxhlet-CG-SM ou Soxhlet-CLHP-UV/fluor.

Exemple 3 : Pesticides dans les eaux par SPE (PSDVB)-CLHP-SM.

#### Les COV et les PCB dans les eaux

Les performances de la micro-extraction en phase solide (SPME) couplée à la CG-ECD ou SM ont été examinées pour l'analyse de 21 PCB et 13 COV dans les eaux [6, 22]. Quels que soient les techniques et les polluants analysés, les limites de détection sont du même ordre de grandeur (environ  $10^{-10}$  g/L) ; les déviations relatives (RSD) sont comprises entre 14-26 % et 1-14 %, respectivement, pour les PCB et les COV. A titre d'exemple, un chromatogramme montrant l'analyse de 21 PCB par la méthode SPME couplée à la CG-ECD est présenté dans la figure 6.

#### Les HAP dans les sédiments

Pour l'analyse des HAP, on emploie en général deux méthodes de séparation, à savoir la CLHP en phase normale avec détection UV-visible ou fluorimétrique, et la CG en phase apolaire avec détection par ionisation de flamme ou spectrométrie de masse.

Comme exemple, nous avons présenté l'analyse dans les sédiments de 16 HAP de la liste EPA (naphtalène, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène, benz(a)anthracène, chrysène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, benz(a,h)anthracène, benzo(g,h,i)perylène, indeno(1,2,3-cd)pyrène). Les performances des méthodes utilisées sont résumées dans le tableau 1. L'extraction a été réalisée à



Figure 5 - Exemples de types de supports pour l'extraction solide-liquide en différé (à gauche) et en ligne (à droite).

A gauche : cartouches SPE surmontées de réservoirs à positionner sur le manifold indiqué par la flèche noire ; à droite : capsules SPE en ligne à fixer dans le rak du bas indiqué par la flèche bleue.

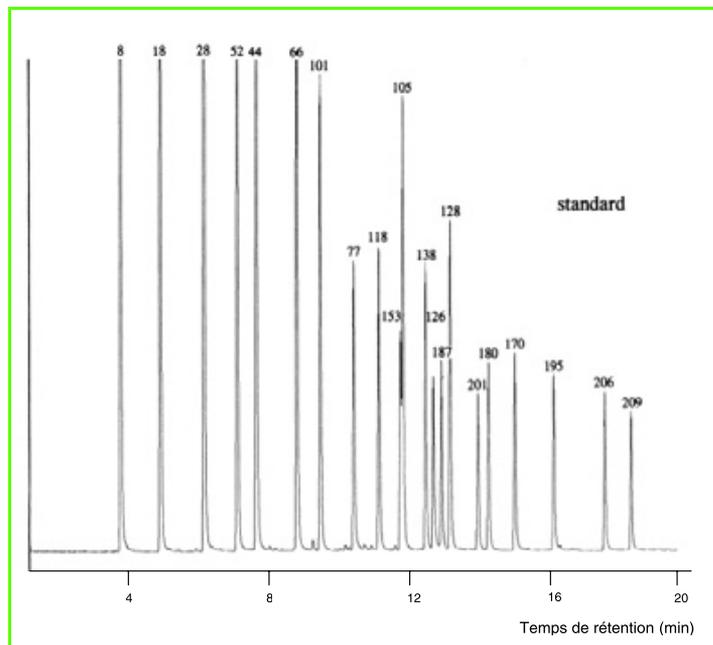


Figure 6 - Analyse dans une eau milli-Q des 21 PCB en SPME-CG-ECD (© [3]).

Identification des pics : PCB-8 : 2,4'-dichlorobiphényl ; PCB-18 : 2,2',5'-trichlorobiphényl ; PCB-28 : 2,4,4'-trichlorobiphényl ; PCB-52 : 2,2',5,5'-tétrachlorobiphényl ; PCB-44 : 2,2',3,5'-tétrachlorobiphényl ; PCB-66 : 2,3',4,4'-tétrachlorobiphényl ; PCB-101 : 2,2',4,5,5'-pentachlorobiphényl ; PCB-77 : 3,3',4,4'-tétrachlorobiphényl ; PCB-118 : 2,3',4,4',5-pentachlorobiphényl ; PCB-153 : 2,2',4,4',5,5'-hexachlorobiphényl ; PCB-105 : 2,3,3',4,4'-pentachlorobiphényl ; PCB-138 : 2,2',3,4,4',5'-hexachlorobiphényl ; PCB-126 : 3,3',4,4',5-pentachlorobiphényl ; PCB-187 : 2,2',3,4',5,5',6-heptachlorobiphényl ; PCB-128 : 2,2',3,3',4,4'-hexachlorobiphényl ; PCB-201 : 2,2',3,3',4,5',6,6'-octachlorobiphényl ; PCB-180 : 2,2',3,4,4',5,5'-heptachlorobiphényl ; PCB-170 : 2,2',3,3',4,4',5-heptachlorobiphényl ; PCB-195 : 2,2',3,3',4,4',5,6-octachlorobiphényl ; PCB-206 : 2,2',3,3',4,4',5,5',6-nonachlorobiphényl ; PCB-209 : 2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'-décachlorobiphényl.

Tableau II - Rendements d'extraction et LOD obtenues par SM pour les dix pesticides les plus utilisés en France.

Pesticide	Rendement sur PSDVB (%) [23]	LOD (ng/L) [24]
Atrazine	95	10
Déséthylatrazine	50	20
Simazine	75	20
Diuron	95	10
Chlortoluron	90	20
Isoproturon	110	30
Cabétamide	100	10
Méthabenzthiazuron	100	10
2,4 D	90	30
Bromacil	70	10

### Les pesticides dans les eaux

Dans le cas de l'analyse des pesticides dans les eaux, l'une des méthodes multirésidus les plus performantes est la CLHP équipée de détecteur UV-DAD ou SM couplée avec l'extraction solide-liquide [23-27]. Le *tableau II* indique les rendements d'extraction sur support polymère (polystyrène divinylbenzène) et les limites de détection (LOD) obtenues par SM pour les dix pesticides les plus utilisés en France [23-24]. Les rendements d'extraction sont compris entre 50 et 110 % selon les pesticides. Ils s'avèrent satisfaisants pour sept des dix pesticides car supérieurs ou égaux à 90 % ; toutefois, ils sont relativement faibles pour trois pesticides (déséthylatrazine, simazine et bromacil). Les valeurs des LOD, qui vont de 10 à 30 ng/L, sont suffisamment basses pour permettre d'évaluer de manière rigoureuse la contamination des eaux naturelles par ces pesticides.

### Conclusion

Nous avons montré dans cet article la complexité de l'analyse environnementale qui nécessite de développer des stratégies d'analyse multirésidus des micropolluants organiques très spécifiques. En effet, il est nécessaire de tenir compte des différentes formes des contaminants (ions, molécules, polymères...) et des compartiments susceptibles d'être pollués (air, eaux, sols) afin de différencier et d'adapter les méthodes multirésidus les plus efficaces couplant les techniques d'extraction et de séparation-détection. Les méthodes utilisées pour l'étude des principaux polluants organiques, à savoir les HAP, PCB, COV et les pesticides, sont suffisamment sélectives, sensibles et précises pour permettre d'évaluer la contamination de

l'environnement dans des conditions optimales. Dans le cadre du développement durable, la surveillance de la contamination à court et à long terme implique également de développer des méthodes d'analyse automatisables, afin de pouvoir modéliser et prévoir le devenir des micropolluants organiques dans l'environnement.

### Références

- [1] Bermond A., *L'Act. Chim.*, **2004**, 277-278, p. 27.  
 [2] Levi Y., Cargouët M., *L'Act. Chim.*, **2004**, 277-278, p. 49.

Tableau I - Performances des méthodes d'analyse de 16 HAP dans les sédiments.

Matrice		
Matériaux de référence	CRM 481 (sédiment certifié) Sédiment avec 16 HAP	IAEA 408 (sédiment certifié) Sédiment avec 21 HAP
Sédiments	Bassin de la Seine [10]	Lagune de Bizerte, Tunisie [9]
Extraction au Soxhlet		
Solvant d'extraction - durée	5 g hexane/CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> - 24 h	7 g hexane/CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> - 12 h
Rendements (%)	75 - 85	90 - 106
Purification		
Agent de désulfuration	mercure	cuivre
Quantification		
Technique	CLHP - UV/Visible	CG-FID ou SM
Concentration des HAP dans les sédiments	450 - 5 650 ng/g	10 - 2 500 ng/g

l'aide de la technique du Soxhlet. Selon les HAP, les rendements d'extraction sont compris entre 75 et 85 % [10] et entre 90 et 106 % [9]. Ces différences de rendements pourraient s'expliquer par la diversité des matrices sédimentaires étudiées (sédiment fluviaux ou marins), ainsi que par les différences de procédures d'analyse employées. Les concentrations de HAP présents dans les sédiments du bassin de la Seine et de la lagune de Bizerte en Tunisie varient respectivement de 450 à 5 650 ng/g et de 10 à 2 500 ng/g. La contamination des deux types de sédiments par les 16 HPA s'avère donc du même ordre de grandeur.

- [3] Sarrion M.N., Santos F.J., Galceran M.T., *Anal. Chem.*, **2000**, *72*, p. 4865.
- [4] Ezquerro O., Pons B., Tena M.T., *J. of Chromato. A*, **2003**, *1020*, p. 189.
- [5] Zygmunt B., Namiesnik J., *J. Fresenius Anal. Chem.*, **2001**, *370*, p. 1096.
- [6] Ezquerro O., Pons B., Tena M.T., *J. of Chromato. A*, **2003**, *985*, p. 247.
- [7] Namiesnik J., Zygmunt B., Jastrzebska A., *J. of Chromato. A*, **2000**, *885*, p. 405.
- [8] Harper M., *J. of Chromato. A*, **2000**, *885*, p. 129.
- [9] Mzoughi N., Hellal F., Dachraoui M., Villeneuve J.P., Cattini C., de Mora S.J., El Abed A., *Geoscience*, **2002**, *334*, p. 893.
- [10] Motelay-Massei A., Ollivon D., Garban B., Teil M.J., Blanchard M., Chevreuil M., *Chemosphere*, **2004**, *55*, p 555.
- [11] Dean J.R., Xiong G., *Trends Anal. Chem.*, **2000**, *19*, p. 553.
- [12] Pichon V., *Analisis*, **1998**, *26*, p. M91.
- [13] Hennion M.-C., *Analisis*, **1998**, *26*, p. M131.
- [14] *Sample Handling Techniques*, D. Barcelo, M.-C. Hennion (éds), Elsevier, Amsterdam, **1997**, p. 249.
- [15] Sabrik H., Jeannot R., Rondeau B., *J. of Chromato. A*, **2000**, *885*, p. 217.
- [16] Pichon V., Bouzige M., Miege C., Hennion M.-C., *Trends Anal. Chem.*, **1999**, *18*, p. 219.
- [17] Bouzige M., Pichon V., Hennion M.-C., *Environ. Sci. Technol.*, **1999**, *33*, p. 1916.
- [18] Dalluge J., Hankemeier T., Vreuls J.J., Brinkman U.A.T., *J. of Chromato. A*, **1999**, *830*, p. 377.
- [19] Hankemeier T., van Leeuwen S.P.J., Vreuls J.J., Brinkman U.A.T., *J. of Chromato. A*, **1998**, *811*, p. 117.
- [20] Steen R.J.C.A., Hogenboom A.C., Leonards P.E.G., Peerboom R.A.L., Cofino W.P., Brinkman U.A.T., *J. of Chromato. A*, **1999**, *857*, p. 157.
- [21] Geerdink R.B., Niessen W.M.A., Brinkman U.A.T., *J. of Chromato. A*, **2002**, *1*, p. 66.
- [22] Yang Y., Miller D.J., Hawthorne S.B., *J. of Chromato. A*, **1998**, *800*, p. 257.
- [23] Geerdink R.B., Kooistra-Sijpersma A., Tiesnitsch J., Kienhuis P.G.M., Brinkman U.A.T., *J. of Chromato. A*, **1999**, *863*, p. 147.
- [24] Geerdink R.B., Kienhuis P.G.M., *Trends in Ana. Chem.*, **2000**, *19*, p. 460.
- [25] Hogenboom A.C., Hofman M.P., Jolly D.A., Niessen W.M.A., Brinkman U.A.T., *J. of Chromato. A*, **2000**, *885*, p. 377.
- [26] Irace S., doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, **1998**.
- [27] Irace-Guigand S., Aaron J.-J., Scribe P., Barcelo D., *Chemosphere*, **2004**, *55*, p. 973.



**S. Irace-Guigand**

**Sandrine Irace-Guigand**

est post-doctorante à l'ITODYS, Université Paris 7\*.

**Jean-Jacques Aaron**

est professeur des universités. Il est responsable du DESS « procédés pour la qualité de l'environnement » à l'université Marne-la-Vallée et dirige un groupe de recherche au Laboratoire ITODYS\*, Université Paris 7.



**J.-J. Aaron**

\* ITODYS, CNRS UMR 7086, Université Paris 7-Denis Diderot, 1 rue Guy de la Brosse, 75005 Paris.  
Fax : 01 44 27 68 14.  
Courriel : aaron@paris7.jussieu.fr

