

# **Sandoz-Rheinfonds**

## **Le Fonds Sandoz en faveur du Rhin**

Verhandlungen des Symposiums  
vom 3.–4. September 1992

Compte Rendu du Symposium  
du 3/4 septembre 1992

Hans Weidmann  
Hugo Meder

# Caractérisation et comportement des particules colloïdales dans le Rhin

## 1. Introduction

La caractérisation des particules minérales et organiques est d'une importance primordiale dans les études environnementales, en raison de leur influence sur la distribution des micropolluants et des nutriments dans les eaux naturelles. Les particules submicrométriques (colloïdes) possèdent une surface spécifique élevée et peuvent par conséquent jouer un rôle dominant dans le contrôle des substances dissoutes toxiques et vitales. Cependant, leur étude extensive est restreinte par de nombreuses limitations analytiques et par le fait que les colloïdes ne sont présents qu'en proportion faible de la masse totale des particules dans les eaux naturelles.

Nous avons développé un schéma complet d'échantillonnage, de fractionnement et d'analyse, qui nous a permis de caractériser les particules submicrométriques dans le Rhin (Perret et al., 1994). D'autre part, nous avons également modélisé le comportement de ces particules vis-à-vis des processus de coagulation/sédimentation; les résultats obtenus ont été comparés aux observations effectuées sur le terrain (Newman et al., 1994).

## 2. Procédure d'échantillonnage, de fractionnement et d'analyse

Le Rhin a été échantillonné entre septembre 1990 et octobre 1991, en aval de la centrale hydroélectrique de Birsfelden (Bâle, CH), 150 m en amont de l'embouchure de la rivière Birse.

Immédiatement après l'échantillonnage, l'eau brute était sédimentée durant 2 h dans des larges cellules de sédimentation thermostatées fabriquées dans nos laboratoires. Après sédimentation, une portion du surnageant était précautionneusement récupérée et fractionnée selon les 2 procédures suivantes.

L'eau sédimentée était fractionnée par 4 étapes de centrifugation séquentielle (le surnageant de la 1<sup>ère</sup> centrifugation est utilisé pour la 2<sup>ème</sup> centrifugation, etc.): les 2 premières étapes (0.5 h à 520 g; 5h à 3700 g) étaient effectuées sur le terrain et les 2 dernières étapes (1 h à 124 000 g; 14 h à 124 000 g) au laboratoire dans un délai de moins de 24 h.

L'eau sédimentée était également fractionnée par 2 étapes de filtration séquentielle (le filtrat de la 1<sup>ère</sup> filtration est utilisé pour la 2<sup>ème</sup> filtration) dans des cellules de filtration fabriquées spécialement pour cette application: la première étape (filtration sur membrane Nuclepore 0.8  $\mu\text{m}$  en polycarbonate) était effectuée sur le terrain et la seconde étape (membrane Nuclepore 0.05  $\mu\text{m}$ ) durant le transport du terrain au laboratoire.

A chaque étape de l'échantillonnage et du fractionnement, des échantillons étaient prélevés pour les analyses subséquentes. Les analyses étaient effectuées sans délai et incluaient des mesures de diffraction de la lumière (évolution de la concentration relative en particules durant les fractionnements), de spectrométrie de corrélation de photons et de micro-électrophorèse (détermination des distributions de tailles et des charges de surface des particules, à l'échelle de l'échantillon macroscopique), de microscopie électronique à transmission (détermination des tailles, morphologies et associations entre particules, à l'échelle de la particule individuelle) et à balayage (contrôle des membranes de filtration après utilisation), de spectrométrie d'émission atomique à plasma (détermination des concentrations en éléments minéraux) et des mesures du carbone organique total.

La justification, les avantages et limitations de ce schéma complet sont donnés ci-après.

Des tests préliminaires de stockage des échantillons en présence d'anticoagulants ou d'antibiotiques ont montré des résultats discutables. Dans un premier temps, l'hexamétaphosphate de sodium, utilisé comme anticoagulant, désagrègeait les particules initialement coagulées, mais accroissait la coagulation après 2–3 jours de stockage. Les antibiotiques utilisés (chlorure de mercure, azoture de sodium) diminuaient effectivement la croissance de bactéries dans les échantillons conservés plus de 5 jours à 4° C; cependant, le mercure précipite sous forme d'hydroxyde, tandis que l'azoture interfère lors des analyses de carbone organique. Pour les raisons mentionnées ci-dessus, les fractionnements et les analyses étaient pratiqués dans un délai de 48 h au maximum à partir de l'échantillonnage, en absence d'additifs chimiques.

Selon la loi de Stokes, une période de 2 h de sédimentation de l'eau brute permettait d'éliminer les particules denses ( $> 1.5\text{--}3\text{g/cm}^3$ ) et de grande taille (2–10  $\mu\text{m}$ ) de la strate supérieure d'eau qui était prélevée. Les mesures de diffraction de la lumière indiquent que 50–60% de la masse de particules était éliminée par sédimentation durant ce fractionnement de 2 h.

Les fractionnements séquentiels par centrifugation permettaient d'obtenir des échantillons dans lesquels les particules denses et de grande taille sont progressivement éliminées (voir la Table 1 ci-dessous). Les spécimens pour les analyses par microscopie électronique à transmission étaient directement préparés dans les

tubes de centrifugation, selon une procédure non perturbante décrite ailleurs (Perret et al., 1991).

Bien que les procédures de filtration peuvent être limitées par des artefacts de coagulation à la surface des membranes, il a été possible de fractionner les suspensions de particules sous des conditions rigoureusement contrôlées (filtrations séquentielles, flux de filtration typiquement  $< 10^{-4}\text{cm/sec}$ , membranes de grande surface,  $V_{\text{initial}}/V_{\text{concentrat}} < 5$ ; voir Buffle et al., 1992). L'efficacité du fractionnement était vérifiée en cours de filtration par des mesures de diffraction de la lumière et les membranes étaient contrôlées par microscopie électronique à balayage après filtration.

Les centrifugations et filtrations ont été utilisées en parallèle après l'étape de sédimentation afin d'obtenir des résultats complémentaires avec une grande représentativité. Le schéma complet d'analyse a permis la caractérisation des particules submicrométriques à l'échelle de l'échantillon macroscopique et de la particule individuelle. Le fractionnement de l'eau brute en échantillons de distributions de tailles de particules décroissantes a été nécessaire pour la caractérisation précise des particules submicrométriques, qui seraient autrement masquées par les particules de grande taille, particulièrement pour les analyses par spectrométrie de corrélation de photons et les déterminations par microscopie électronique à transmission.

	$\rho = 1.1\text{g/cm}^3$	$\rho = 1.5\text{g/cm}^3$	$\rho = 2.0\text{g/cm}^3$	$\rho = 3.0\text{g/cm}^3$
sédimentation ( $V_{\text{séd}} = 1\text{ cm/h}$ )	$> 9\mu\text{m}$	$> 4\mu\text{m}$	$> 3\mu\text{m}$	$> 2\mu\text{m}$
centrifugation étape 1 (0.5h; 1500t/min)	$> 2\mu\text{m}$	$> 900\text{nm}$	$> 600\text{nm}$	$> 450\text{nm}$
centrifugation étape 2 (5h; 4000t/min)	$> 230\text{nm}$	$> 110\text{nm}$	$> 75\text{nm}$	$> 15\text{nm}$
centrifugation étape 3 (1h; 30000t/min)	$> 65\text{nm}$	$> 30\text{nm}$	$> 20\text{nm}$	$> 13\text{nm}$
centrifugation étape 4 (14h; 30000t/min)	$> 20\text{nm}$	$> 8\text{nm}$	$> 6\text{nm}$	$> 3.5\text{nm}$

Table 1: Estimations des diamètres minimums de particules avec des densités différentes ( $\rho$ ) éliminées lors des processus de sédimentation gravitationnelle et de centrifugation à 4° C (loi de Stokes). Pour la sédimentation, les particules doivent sédimenter durant 2 h au travers d'une couche de 2 cm dans la cellule de sédimentation. Pour la centrifugation, les calculs tiennent compte du champ centrifuge croissant appliqué aux particules lorsqu'elles sédimenteront dans le tube de centrifugation.

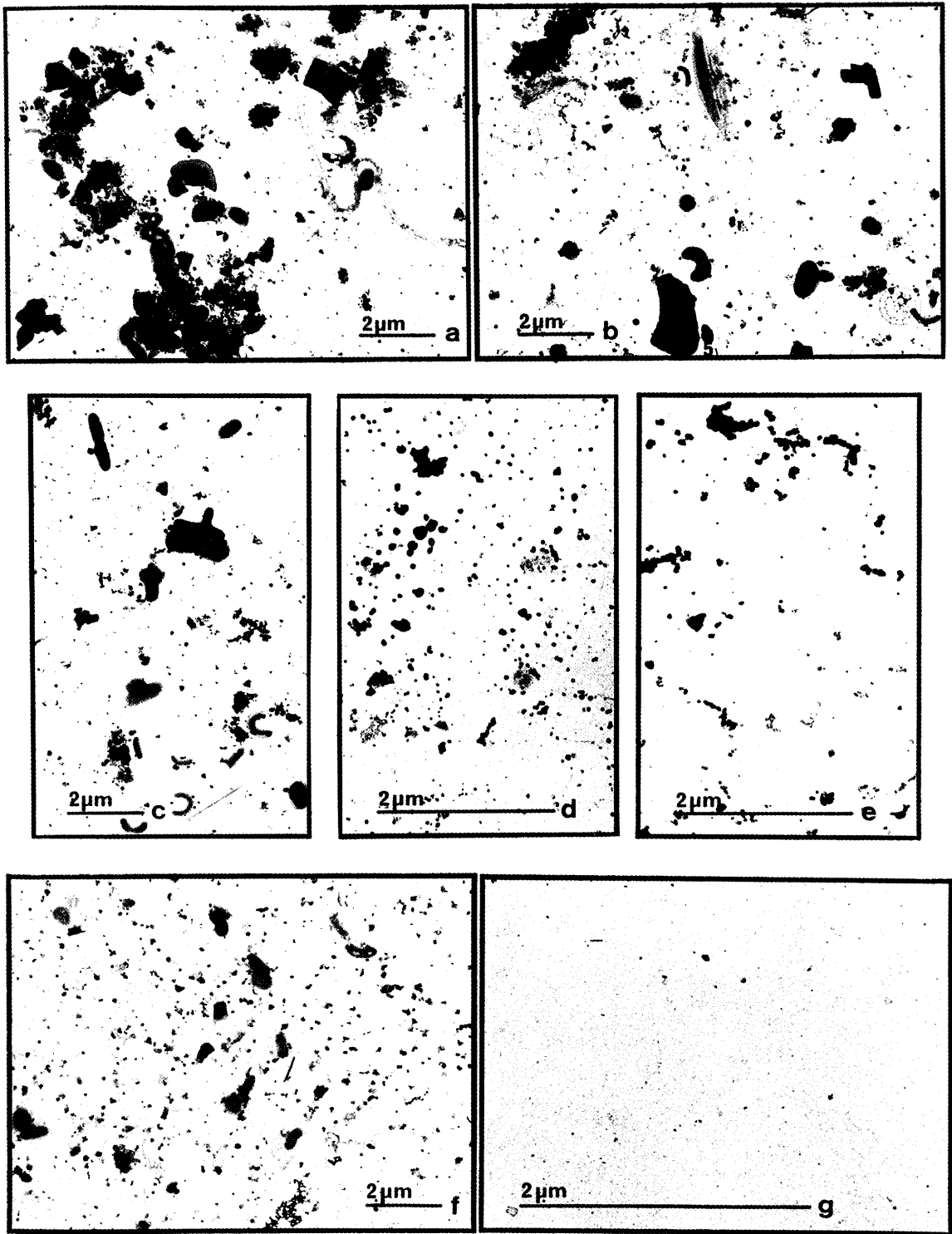


Figure 1: Micrographies électroniques à transmission typiques obtenues pour différentes fractions. (a) eau brute, (b) eau sédimentée, (c) surnageant de la 1<sup>ère</sup> étape de centrifugation, (d) surnageant de la 2<sup>ème</sup> étape de centrifugation, (e) surnageant de la 3<sup>ème</sup> étape de centrifugation, (f) filtrat de la 1<sup>ère</sup> étape de filtration, (g) filtrat de la 2<sup>ème</sup> étape de filtration. Les spécimens sont préparés par ultracentrifugation directe (14h, 124 000 g) des échantillons fractionnés, sur des grilles pour microscopie.

### 3. Résultats expérimentaux

Le schéma d'analyse multi-méthodes appliqué aux échantillons d'eau du Rhin a permis les observations suivantes:

#### Distributions de tailles, de masses et de nombres de particules

Les mesures par microscopie électronique à transmission et par spectrométrie de corrélation de photons (voir la Figure 1 et la Figure 2) des échantillons fractionnés par centrifugations et filtrations en cascade mettent en évidence l'existence de 3 classes principales de tailles de particules: plus grandes que  $1 \mu\text{m}$ , comprises entre  $0.2$  et  $0.7 \mu\text{m}$ , plus petites que  $0.2 \mu\text{m}$ . Ces résultats ont été obtenus durant toute la campagne de

prélèvements et n'ont pas été influencés par la saison ou le débit du fleuve.

Les distributions de masses et de nombres de particules (voir la Figure 3), obtenues à partir des mesures de tailles de particules par spectrométrie de corrélation de photons, indiquent clairement que la classe de tailles inférieure à  $0.2 \mu\text{m}$  ne représente qu'une proportion négligeable,  $< 2\%$  de la masse totale des particules, mais que ces particules submicrométriques peuvent représenter plus de  $80\%$  du nombre total de particules présentes dans le fleuve. La Figure 3 et la Table 2 montrent que ces résultats sont constants d'une fraction à l'autre et durant la saison.

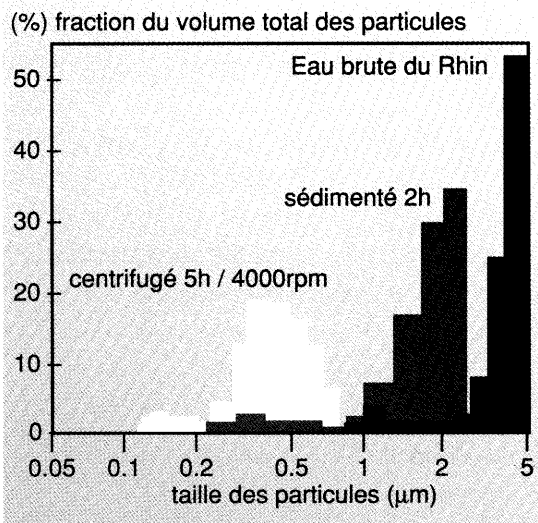


Figure 2: Distribution de tailles de particules typique obtenue par spectrométrie de corrélation de photons pour des échantillons d'eau brute, d'eau sédimentée et de surnageant de la seconde étape de centrifugation. La distribution se déplace vers les tailles plus petites lors du fractionnement. La limite supérieure de taille est imposée par l'instrument, bien que des tailles plus élevées soient couramment observées par microscopie électronique à transmission.

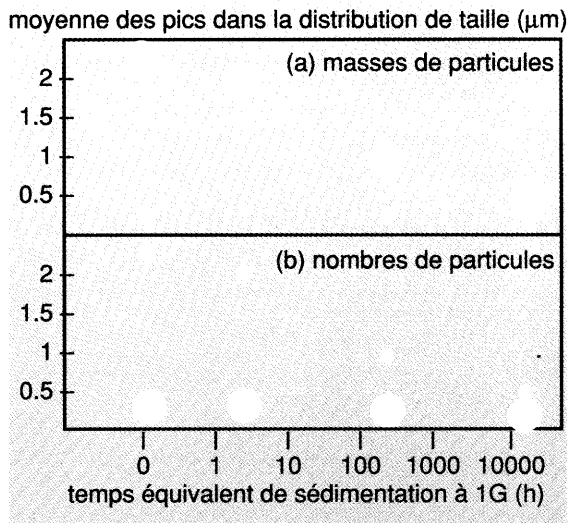


Figure 3: Résultats typiques de spectrométrie de corrélation de photons obtenus pour l'eau du Rhin brute, sédimentée et centrifugée (étapes 1 et 2). (a) distribution de masses de particules, (b) distribution de nombres de particules. Les temps de centrifugation sont convertis en temps équivalents de sédimentation à 1 g. Pour chaque temps équivalent, la surface des disques représente la proportion de particules de la taille considérée. La variabilité est de l'ordre de 10–15% pour (a), 50% pour (b).

Date	Classe de tailles (nm)	Masse (mg/l)	Proportion de la masse totale (%)
22.01.1991	> 3000	2.4	38.8
	3000 – 1000	2.8	46.6
	1000 – 700	0.2	2.9
	700 – 200	0.5	9.3
	< 200	0.2	2.4
12.03.1991	> 3000	1.8	28.5
	3000 – 1000	3.7	57.2
	1000 – 700	0.2	3.2
	700 – 200	0.7	10.1
	< 200	0.1	1.1
30.04.1991	> 3000	2.9	54.0
	3000 – 1000	0.9	16.6
	1000 – 700	0.6	11.5
	700 – 200	0.9	17.3
	< 200	0.1	0.6
17.06.1991	> 3000	637.6	91.0
	3000 – 1000	16.1	2.3
	1000 – 700	1.4	0.2
	700 – 200	45.5	6.5
	< 200	0	0
13.08.1991	> 3000	8.8	81.7
	3000 – 1000	0.7	6.8
	1000 – 700	0.3	2.8
	700 – 200	0.8	7.1
	< 200	0.2	1.7
22.10.1991	> 3000	4.2	60.0
	3000 – 1000	2.0	27.7
	1000 – 700	0.1	1.8
	700 – 200	0.5	6.9
	< 200	0.2	3.0

Table 2: Masses de particules obtenues par spectrométrie de corrélation de photons dans chaque classe de tailles des échantillons du Rhin durant la saison.

### Composition des particules

La distribution brute des éléments dans les particules, telle qu'elle a été mesurée par spectrométrie d'émission atomique à plasma, ainsi

que l'évolution saisonnière des concentrations de particules dans les différentes fractions de tailles, sont données dans la Table 3 et sur la Figure 4.

Ces résultats montrent que la composition des particules minérales est largement dominée par des espèces riches en calcium. La Figure 4 indique que la composition des particules dans les différentes classes de tailles n'est pas fortement influencée par la saison ou le débit du

Rhin, les particules minérales de différents types étant graduellement éliminées des échantillons fractionnés sans discrimination. Cependant, des concentrations élevées, sans différenciation préférentielle entre les éléments mesurés, sont expliquées par des pluies torrentielles (juin 1991).

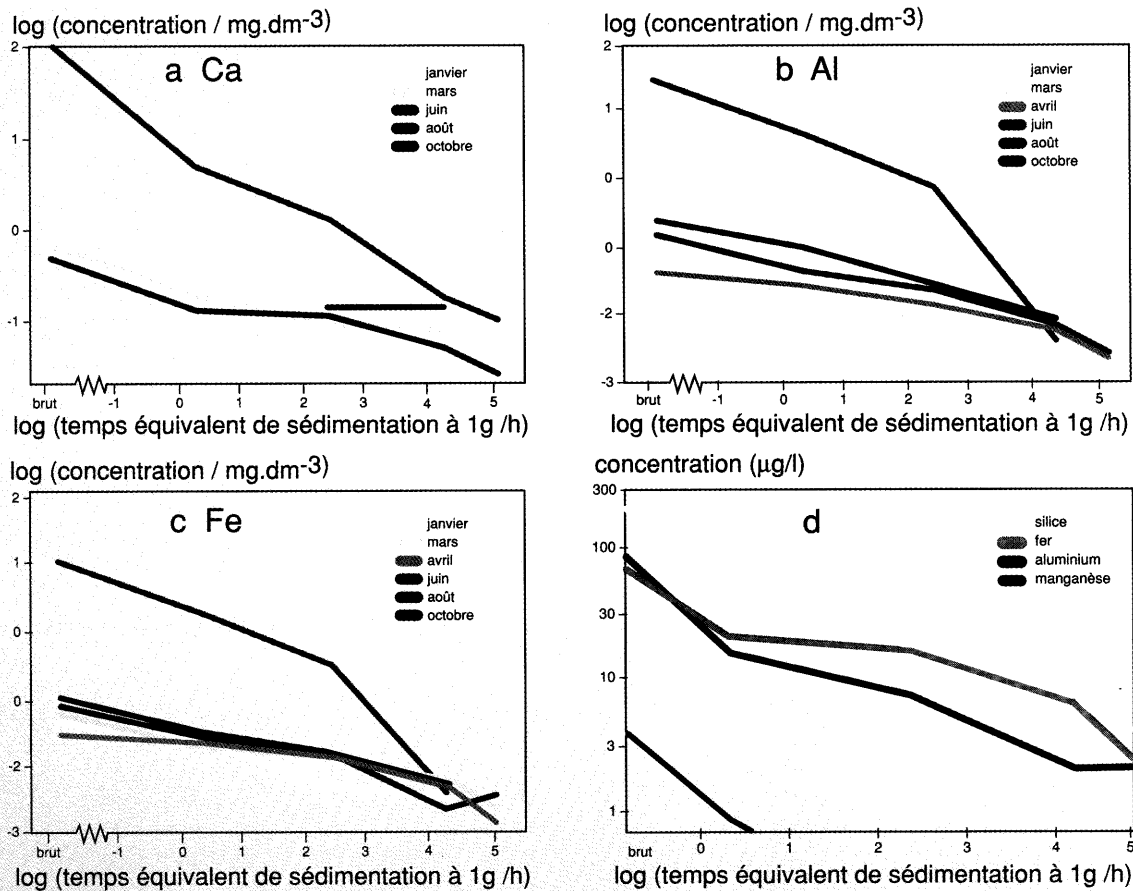


Figure 4: Concentrations en masses de (a) calcium), (b) aluminium et (c) fer, en fonction des étapes de fractionnement pour l'eau brute, sédimentée et centrifugée (étapes 1, 2 et 3), mesurées par spectrométrie d'émission atomique à plasma aux différentes dates de prélèvements. Les concentrations élevées ont été mesurées en juin, durant des pluies torrentielles. (d) Composition élémentaire typique (silicium, fer, aluminium, manganèse) des particules lors des étapes de fractionnement, pour l'eau brute, sédimentée et centrifugée (étapes 1, 2 et 3).

Manganèse	Fer	Aluminium	Silicium	Magnésium	Calcium	Carbone Organique
< 1%	5-10%	5-10%	10-15%	10%	55-70%	2.5mg/l

Table 3: Distribution moyenne en éléments dans les particules durant la saison et dans les différentes classes de tailles, obtenues par spectrométrie d'émission atomique à plasma. La variabilité des mesures est de l'ordre de 20 à 25%.

D'autre part, une concentration constante de matière organique, proche de 2.5 mg/l (excepté durant les pluies torrentielles; environ 20 mg/l) a été mesurée dans les différentes classes de tailles, ce qui suggère une proportion élevée d'entités organiques colloïdales de petite taille et de faible densité.

Ces résultats sont en accord avec les observations par microscopie électronique à transmission, qui ont montré des proportions élevées de particules de calcite dans les différentes fractions; les autres types de particules rencontrés sont les argiles (larges distributions de tailles), les fragments de diatomées (0.1–1  $\mu\text{m}$ ) et les particules riches en fer et en silicium (< 0.5  $\mu\text{m}$ ).

#### **Associations entre composés particulaires minéraux et organiques**

Les particules plus petites que 50–100 nm n'ont jamais été mesurées par spectrométrie de corrélation de photons, tandis qu'elles étaient couramment observées par microscopie électronique à transmission dans les fractions de centrifugation et occasionnellement dans les fractions de filtration. D'autre part, la microscopie électronique à transmission à haute résolution a clairement indiqué la présence de longues fibrilles et de larges réseaux organiques (tailles: 50–300 nm) dans les échantillons centrifugés.

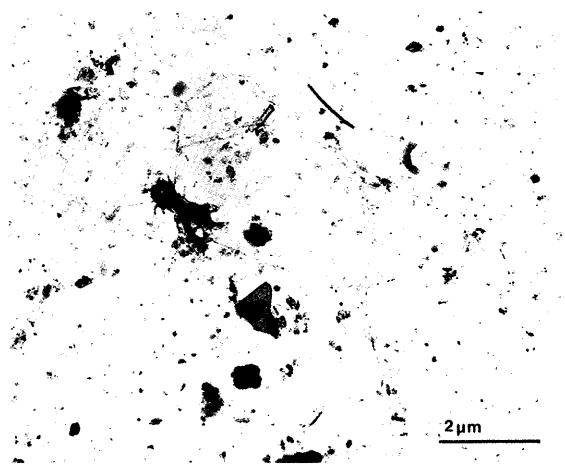


Figure 5: Micrographie électronique à transmission typique d'associations entre des particules minérales submicrométriques et des fibrilles et réseaux organiques.

La Figure 5 montre que des microparticules minérales (5–100 nm) sont associées à ces larges matrices organiques. Les observations ci-dessus suggèrent que ces associations entre microparticules minérales et larges composés organiques sont couramment rencontrées dans le Rhin: la spectrométrie de corrélation de photons ne mesure que la taille des matrices organiques, sans distinguer les petites particules minérales qui y sont associées; les microparticules attachées aux larges matrices organiques sont retenues par les membranes de filtration de 0.05  $\mu\text{m}$  et ne sont par conséquent pas observées dans le filtrat de la seconde étape de filtration.

Finalement, les mesures de mobilité électrophorétique effectuées par micro-électrophorèse à 3 dates de prélèvement indiquent que les particules dans les échantillons sédimentés et centrifugés sont chargées négativement (valeurs moyennes de potentiels zeta: –15 à –20 mV). Ces valeurs correspondent aux résultats obtenus par d'autres auteurs pour des particules minérales recouvertes de matière organique dans différents milieux naturels.

#### **4. Comportement des particules submicrométriques**

Un modèle classique de coagulation et sédimentation des particules a été utilisé dans le but de prédire et expliquer le comportement des particules dans le Rhin.

La méthodologie du modèle consiste à déterminer la vitesse à laquelle la concentration en nombre de particules d'une taille donnée varie dans le temps, en considérant les mécanismes de coagulation orthocinétique (cisaillement du fluide), péricinétique (agitation thermique) et de sédimentation différentielle des particules, ainsi que le mécanisme de sédimentation pure.

Des paramètres expérimentaux (propriétés physiques du fleuve et des particules), déterminés à partir du Rhin ou estimés à partir d'autres auteurs, ont été utilisés dans le modèle. La Figure 6 décrit l'évolution de 2 distributions de tailles de particules (initialement tridispersée et initialement continue) en fonction du temps.

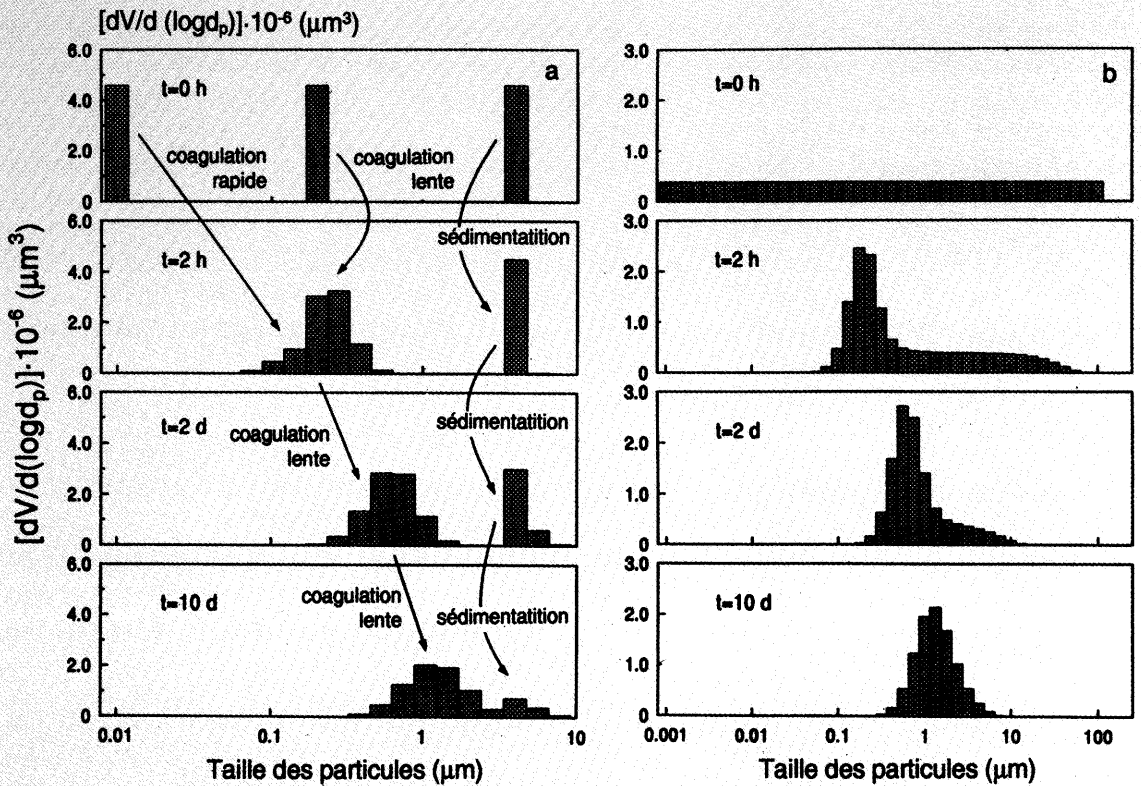


Figure 6: Simulations de la coagulation et de la sédimentation de distributions de tailles de particules (a) initialement tridispersée (10 nm, 200 nm, 4  $\mu\text{m}$ ) avec une concentration initiale de particule de 1 mg/l pour chaque classe de tailles (concentration totale: 3 mg/l) et (b) initialement continue (1 nm à 100  $\mu\text{m}$ ) avec une concentration initiale de particules de 3 mg/l.

Cette Figure indique que les particules submicrométriques (10 nm dans la distribution tridispersée; < 100 nm dans la distribution continue) disparaissent rapidement de la solution; les particules comprises entre 100 nm et 1  $\mu\text{m}$  se déplacent lentement vers des tailles plus élevées (0.5–10  $\mu\text{m}$ ); finalement, les particules plus grandes que 10  $\mu\text{m}$  sédimentent rapidement et disparaissent totalement des masses d'eau.

Le temps de résidence des particules submicrométriques individuelles < 100 nm est estimé à partir des calculs de modélisation à quelques heures. Ces microparticules coagulent en entités plus larges qui sont caractérisées par un temps de résidence élevé dans la solution (10 jours; le temps nécessaire pour que le Rhin soit transporté de Bâle à l'océan est approximativement de 7 jours).

Ce modèle est en accord complet avec les résultats expérimentaux obtenus sur les particules du Rhin, où il a été montré que les particules de grande taille et denses initialement présentes dans l'eau brute sédimentent rapidement; les particules plus petites que 100 nm sont rarement observées sous forme de particules isolées, mais bien sous forme d'agrégats et associées à de larges entités organiques.

Lors d'un prélèvement, des mesures voltamétriques préliminaires ont montré que plus de 95% du plomb total présent dans l'eau brute est adsorbé à la surface de la matière particulaire. En tenant compte du fait que les particules submicrométriques représentent plus de 80% du nombre total de particules dans le Rhin, leur surface disponible pour les processus d'adsorption peut représenter 50% au moins de la surface

totale des particules dans le fleuve (ce résultat est certainement sous-estimé, puisqu'il est obtenu en considérant les particules comme des sphères rigides).

L'estimation ci-dessus suggère que le plomb adsorbé est approximativement distribué de manière égale entre les particules plus petites et plus grandes que 1 µm. Le plomb adsorbé sur les particules de grandes tailles sédimente par conséquent rapidement, tandis que le plomb adsorbé sur les particules submicrométriques sera transporté dans les masses d'eau du Rhin.

## 5. Conclusions

Des particules minérales submicrométriques plus petites que 100 nm sont observées dans le Rhin en tant que particules isolées et agrégées, mais plus fréquemment sous forme de particules incluses dans de larges réseaux organiques et attachées à des fibrilles organiques.

Bien que leur masse soit négligeable (moins de 2% de la masse totale de particules), les particules submicrométriques sont présentes en

## Références

BUFFLE J., PERRET D., NEWMAN M. The use of filtration and ultrafiltration for size fractionation of aquatic particles, colloids and macromolecules. In *Environmental Particles I*. Lewis, Chelsea, 1992.  
NEWMAN M., FILELLA M., CHEN Y., NÈGRE J.-C., PERRET D., BUFFLE J. Submicron particles in the Rhine River: II. Comparison of field observations and model predictions. *Wat. Res.* **28**, 107, 1994.

## Résumé

La caractérisation des particules minérales et organiques est d'importance primordiale en raison de leur influence sur la distribution des micropolluants et des nutriments dans les eaux naturelles. Nous avons développé un schéma complet d'échantillonnage, de fractionnement et d'analyse.

Le Rhin a été échantillonné en amont de Bâle. L'eau brute était sédimentée durant 2 h et le surnageant fractionné selon deux procédures, une centrifugation séquentielle en quatre étapes et une filtration séquentielle sur membrane en deux étapes. A chaque étape, des analyses ont été

grand nombre (plus de 80% du nombre total de particules); ainsi, leur surface estimée peut représenter plus de 50% de la surface totale disponible de particules dans le fleuve.

La composition et la distribution de tailles des particules submicrométriques du Rhin n'est pas affectée par la saison ou le débit du fleuve. Ces microparticules coagulent lentement et sont caractérisées par une distribution de tailles stable dans le temps et un temps de rétention élevé dans les masses d'eau.

Par conséquent, les particules minérales submicrométriques jouent un rôle dominant dans les processus d'adsorption des micropolluants.

Ce travail a été coordonné par le Prof. J. Buffle (Département de Chimie Minérale, Analytique et Appliquée; Université de Genève). Les expériences sur le terrain et en laboratoire ont été effectuées par l'auteur, Dr. J.-C. Nègre, Dr. M. Newman, Y. Chen et occasionnellement par Dr. M. Filella et M.-L. Tercier.

PERRET D., LEPPARD G.G., MÜLLER M., BELZILE N., DE VITRE R., BUFFLE J. Electron microscopy of aquatic colloids: non-perturbing preparation of specimens in the field. *Wat. Res.* **25**, 1333, 1991.  
PERRET D., NEWMAN M., NÈGRE J.-C., CHEN Y., BUFFLE J. Submicron particles in the Rhine River: I. Physico-chemical characterization. *Wat. Res.* **28**, 91, 1994.

## Zusammenfassung

Kenntnisse über die Schwebstoffe im Wasser sind wegen ihrer Bedeutung für die Verteilung und den Transport der Nähr- und der Mikroschadstoffe von grosser Wichtigkeit. Es wurde deshalb ein vollständiges Schema für die Probenahme, die Fraktionierung und die Analyse kolloidaler Partikel im Wasser des Rheins entwickelt.

Oberhalb Basels wurden im Rhein Proben genommen, zwei Stunden sedimentieren gelassen und anschliessend der Überstand nach zwei verschiedenen Verfahren untersucht. Beim einen handelt es sich um eine sequentielle Zentrifugierung in vier Stufen, beim andern um eine

exécutées (diffraction de la lumière, spectrométrie de corrélations de photons et microélectrophorèse, microscopie électronique à transmission et à balayage, spectrométrie d'émission atomique à plasma et mesure du carbon organique total).

Les particules se trouvent dans trois classes principales de taille: plus grandes que 1000 nm, comprises entre 200 et 700 nm et plus petites que 200 nm. Cette distribution n'a pas été influencée ni par la saison ni par le débit du fleuve. Les particules minérales sont éliminées graduellement par la fractionation sans discrimination des différents types. La concentration de la matière organique est proche de 2,5 mg/l dans les différentes classes de taille.

Selon un modèle aussi bien que selon les résultats expérimentaux, les particules de grande taille disparaissent rapidement par sédimentation. Les particules plus petites que 100 nm sont observées surtout sous forme d'agrégats et associées à de larges entités organiques.

Plus de 95% du plomb total présent dans l'eau brute est adsorbé à la surface de la matière particulaire. Les particules submicrométriques représentant plus de 80% du nombre total, leur surface disponible peut représenter 50% au moins de la surface totale des particules dans le fleuve. Cette estimation suggère que la moitié du plomb est adsorbé sur des particules de grande taille et par conséquent sédimente rapidement tandis que le plomb adsorbé sur les particules submicrométriques sera transporté dans les masses d'eau du Rhin.

zweistufige sequentielle Filtrierung über Membranfilter. Der jeweilige Überstand wurde teils für die nächste Stufe verwendet, teils der Analyse unterworfen. Angewendet wurden die Messung der Lichtstreuung, die Photonen-Korrelations-Spektrometrie, die Mikro-Elektrophorese, die Transmissions- und die Raster-Elektronenmikroskopie, die Plasma-Atomemissions-Spektrometrie und die Messung des gesamten organischen Kohlenstoffs.

Grössenmässig befinden sich die Teilchen in drei Hauptklassen: grösser als 1000 nm, zwischen 200 und 700 nm und unter 200 nm. Diese Verteilung ist nicht von der Jahreszeit oder der Wasserführung abhängig. Die mineralischen Teilchen nehmen mit der Fraktionierung schrittweise ab, ohne dass sich im Verhältnis der verschiedenen Metalle Unterschiede ergäben, während der organische Kohlenstoff in allen Teilchen-Grössenklassen in der Nähe von 2,5 mg/l bleibt.

In den mineralischen Teilchen herrscht das Calcium vor. Auch bezüglich der Zusammensetzung der Partikel ist kein wesentlicher Einfluss der Wasserführung oder der Jahreszeit zu erkennen, wenn man von sturzbachartigen Regenfällen im Juni 1991 absieht. Die Mikropartikel zwischen 5 und 100 nm liegen im allgemeinen als Aggregate vor oder sind grösseren organischen Teilchen angelagert.

Sowohl ein Modell als auch die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die grösseren und dichteren Teilchen rasch sedimentieren und dadurch aus dem freien Wasser verschwinden.

Die Mikropartikel machen zwar weniger als 2% der gesamten Teilchenmasse aus, bieten durch ihre grosse Zahl (mehr als 80% der Teilchen) aber über 50% der für die Adsorption verfügbaren Oberfläche an. Diese Verhältnisse ändern sich weder mit der Jahreszeit noch mit der Wasserführung. Da über 95% des im Rohwasser befindlichen Gesamtbleis an Teilchenoberflächen adsorbiert ist, muss man annehmen, dass die Hälfte des Bleis rasch im Sediment verschwindet, während die andere Hälfte vom Wasser abtransportiert wird.