

# Évaluation des risques liés aux résidus d'assainissement routier sur les écosystèmes aquatiques à partir d'essais écotoxicologiques en microcosmes

Bernard CLÉMENT\*  
Valérie RAEVEL, Wenwen XU,  
Lynda SOUKI  
Université de Lyon, École Nationale des  
Travaux Publics de l'Etat,  
Laboratoire des Sciences de l'Environnement,  
Vaulx-en-Velin, France

## ■ RÉSUMÉ

La gestion des résidus d'assainissement pluvial routier constitue une problématique environnementale, économique et sociale importante. Outre la radicalisation de la réglementation en matière de déchets, ces matériaux hétérogènes, produits en grande quantité à l'échelle du territoire, présentent des caractéristiques physico-chimiques et des charges en polluants (métaux lourds et hydrocarbures) qui limitent leur valorisation.

Le LCPC de Nantes a développé une procédure de traitement de ces matrices dans une optique de réemploi sur le domaine routier (remblais routiers, régilage, aménagements paysagers). Cette technique vise à séparer les sédiments en plusieurs fractions valorisables et à récupérer les particules fines, libres et agglomérées, où se localise majoritairement la pollution métallique et organique. Se pose alors le problème de savoir si les fractions valorisables présentent ou non un risque pour l'environnement. Des essais monospécifiques et plurispécifiques (microcosmes) sont menés afin de simuler les effets de ces matériaux lors de certains scénarii, sur des milieux aquatiques lenticques. Les résultats sur quelques échantillons et leurs fractions granulométriques suggèrent une absence de toxicité aiguë à des teneurs < 50 % et des effets nuls ou seulement légers à 10 % en microcosmes (exposition 21 ou 28 jours d'organismes pélagiques et benthiques) sauf pour un échantillon. Analyse des teneurs en métaux et essais écotoxicologiques concordent pour situer la concentration sans effets chroniques autour de 1 %, mais des essais supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ou non cette hypothèse. Du point de vue écotoxicologique, le criblage granulométrique ne permet pas de distinguer une fraction valorisable qui serait systématiquement écocompatibile.

## Evaluation of risks generated from road drainage residue on aquatic ecosystems using ecotoxicological testing in microcosms

### ■ ABSTRACT

Managing road drainage residue offers major environmental, economic and social challenges. Beyond making regulations more stringent in the area of wastes, these heterogeneous materials, which are produced in large quantities over the scale of an entire territory, display physicochemical characteristics and pollutant loads (in terms of heavy metals and hydrocarbons) that limit their reuse potential. LCPC's Nantes Center has developed a treatment procedure for these material matrices, with the aim of eventual reuse in road work applications (embankments, leveling, landscaping features). This technique is intended to separate sediments into several granular fractions for reprocessing as well as to recover fine, unbound and clustered particles, where the majority of metal and organic pollution is found. The next problem to be solved is knowing whether the reusable fractions present a risk or not for the environment. Both monospecific and multispecific (microcosm) testing has been conducted to simulate the effects of these materials under certain scenarios specific to lentic aquatic environments. The results derived on a few samples, along with their corresponding particle size distributions, suggest an absence of severe toxicity at content levels of <50% and either no effects or just slight effects at a 10% threshold in the microcosms (a 21 or 28-day exposure of pelagic and benthic organisms), with the exception of a single sample. Metal content analysis and ecotoxicological tests agree in placing the concentration threshold without chronic effects at around 1%, yet additional testing would be necessary to confirm or reject this hypothesis. From an ecotoxicological standpoint, particle size screening does not serve to distinguish a reusable fraction in any systematically eco-compatible manner.

\* AUTEUR À CONTACTER :  
Bernard CLÉMENT  
clement\_b@entpe.fr

## INTRODUCTION

Que ce soit en milieu urbain ou en zone rurale, le ruissellement sur les chaussées génère des effluents plus ou moins pollués mais toujours en volumes importants. Le recours aux réseaux existants étant de plus en plus problématique, des techniques dites alternatives (bassins de rétention ou d'infiltration des eaux pluviales, noues, fossés...) se développent. Outre qu'elles permettent une gestion quantitative (écrêtement des débits) voire qualitative (abattement de la pollution) de l'eau, elles se rapprochent de son cycle naturel par sa prise en compte au plus près de sa source. Elles apparaissent de plus économiquement avantageuses et s'intègrent plus facilement dans le paysage que les techniques traditionnelles.

Cependant ces ouvrages doivent faire l'objet d'un entretien régulier afin de préserver leurs performances épuratoires. Cette maintenance consiste essentiellement en l'extraction des sédiments ou résidus accumulés au fond de ces dispositifs. Or la contamination de ces matériaux en métaux lourds, hydrocarbures et autres polluants organiques est avérée [1].

Le nettoyage des chaussées poreuses ou classiques, souvent considéré comme une mesure efficace pour réduire la pollution urbaine, engendre aussi des quantités de matériaux non négligeables.

L'origine commune des particules composant les balayures des chaussées et les matériaux issus de l'assainissement routier conduit à penser leur gestion comme un même problème. Or les enjeux économiques et environnementaux liés à ces sédiments ainsi que l'évolution constante des réglementations dans le domaine des déchets et de l'eau remettent en cause leurs filières d'élimination. Le recyclage de ces produits en matériaux de génie civil et leur épandage sur les domaines routiers semblent être les voies de valorisation les plus pertinentes. Cependant les connaissances actuelles sur ces matrices et les réglementations en vigueur interdisent leur usage à l'état brut. Des techniques de traitement sont donc à l'étude. Parmi elles, une méthode visant à séparer les fractions valorisables par criblage granulométrique des fractions les plus fines non valorisables et à y concentrer la pollution a été développée au Laboratoire central des Ponts et Chaussées [2]. Mais il reste à savoir si ces traitements et ces *scenarii* de réemploi sont acceptables pour l'environnement.

Cette étude, menée au Laboratoire des Sciences de l'Environnement (LSE) de l'ENTPE, s'inscrit dans le cadre de l'opération « caractérisation et gestion des résidus de l'assainissement pluvial routier urbain » de la troisième orientation Environnement et Risques Naturels du contrat quadriennal 2005-2008 du LCPC. Ce programme de recherche proposé pour une durée de 3 ans poursuit quatre objectifs :

- ① réduire la pollution à la source en identifiant les polluants
- ② comprendre les mécanismes de transferts des polluants
- ③ évaluer la toxicité des résidus et les risques liés à leur gestion
- ④ identifier les filières de traitement et de réutilisation des résidus.

Le travail réalisé ici rentre plus particulièrement dans le volet « évaluation de la toxicité des résidus et des risques liés à leur gestion » qui mobilise deux laboratoires : le LSE et le Laboratoire régional de l'ouest parisien (LROP).

Le travail mené s'inscrit dans une démarche d'évaluation de l'écocompatibilité d'un scénario de gestion de ces sédiments, l'écocompatibilité étant définie par Perrodin *et al.* [3] comme « une situation où les flux de pollution émis par les déchets, placés dans un certain contexte physique, hydrogéologique, physico-chimique et biologique, sont compatibles avec les flux de polluants acceptables par le milieu récepteur du site de stockage ou de valorisation concerné ».

On cherche donc à évaluer l'écocompatibilité de résidus d'assainissement routier ayant subi un traitement mis en place par le LCPC [2] dans le cadre de deux filières possibles de valorisation [4] :

- l'épandage de ces sédiments sur les dépendances routières (régalage, aménagements paysagers), celui en agriculture étant proscrit par le décret 97-113 du 8 décembre 1997 ;
- l'utilisation de ces matériaux en technique de remblai.

Dans ces deux cas, les matériaux peuvent se retrouver au contact de l'eau de pluie par ruissellement ou infiltration. Que ce soit par lessivage ou par percolation, l'eau emporte une partie des polluants présents dans la matrice et les transporte jusqu'à un milieu récepteur. Seuls les écosystèmes aquatiques de type lentique seront considérés dans ce travail. Ces écosystèmes sont représentés de façon expérimentale par des microcosmes de laboratoire d'un volume de 2 litres largement employés au LSE dans diverses études écotoxicologiques sur des matériaux complexes similaires aux résidus d'assainissement routier ou/et faisant l'objet de valorisation en technique routière : mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) [5], sédiments de canaux de navigation [6, 7].

Des essais mono- et pluri-spécifiques (microcosmes) ont été réalisés sur des lixiviats obtenus à partir des sédiments bruts et de leurs fractions granulométriques. Pour les essais en microcosmes, une fois les matériaux introduits, des organismes issus d'élevages et de cultures du laboratoire (algues microscopiques, lentilles d'eau, daphnies, amphipodes et chironomes) sont introduits dans les microcosmes et différents paramètres biologiques sont suivis sur 3 semaines à 1 mois : survie (tous), croissance (algues, lentilles d'eau, daphnies, amphipodes, chironomes), reproduction (daphnies), émergence (chironomes).

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### ■ Résidus d'assainissement routier

Le sédiment de Wissous provient du bassin de décantation des eaux pluviales de Villemilan à Wissous. Le prélèvement a été fait dans le bassin enterré, les sédiments ont été récupérés dans la rigole extérieure du bassin par l'un des agents d'exploitation (à la pelle). Ils ont ensuite été ramenés au laboratoire et stockés à 4°C.

Les résidus de Lille correspondent à des balayures de chaussées prélevées à l'aide de balayeuses dans le centre de la ville. Les balayures de Lille ont un D50 de 231 µm, ce qui en fait un résidu relativement fin compte tenu des valeurs relevées dans la littérature. Ces poussières sont d'autre part riches en métaux traces ([tableau 1](#)).

Le bassin de Cheviré situé au sud-ouest de Nantes draine la chaussée du pont de Cheviré qui franchit la Loire. Le trafic est d'environ 60 000 véhicules par jour. La surface du bassin est de 780 m<sup>2</sup> et la profondeur est d'1,50 m. Les sédiments issus de Cheviré sont très fins avec un D50 de 109 µm et présentent des teneurs en métaux lourds importantes ([tableau 1](#)).

Le bassin de rétention de Crosne (AhAh2), d'une surface de 593 m<sup>2</sup>, est situé en région parisienne. Le sédiment provenant de AhAh2 est assez grossier, son D50 est d'environ 797 µm. Ceci pourrait expliquer ses teneurs en métaux lourds ([tableau 1](#)) bien moins importantes que celles de Cheviré, sauf en nickel, teneur pour laquelle une source industrielle peut être supposée.

Sauf pour Wissous, qui n'a pas fait l'objet d'un tri granulométrique, les sédiments ont été fournis sous différentes fractions : la fraction brute, la fraction 2-30 mm, la fraction 60 µm-2 mm après attrition et la fraction < 60 µm (uniquement pour Cheviré). Après réception ces matériaux ont été placés à 4°C en chambre froide.

### ■ Lixiviats

Les lixiviats ont été obtenus selon un protocole inspiré de la norme française NF X 31-210 [8] résumé dans le [tableau 2](#).

**tableau 1**  
Caractéristiques physico-chimiques des résidus d'assainissement routier étudiés (MO % : teneur en matières organiques, en % du poids sec du sédiment ; Hc : teneur en hydrocarbures).

Fractions	% massique	MO %	Hc mg/kg sec	Éléments traces mg/kg						
				Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
WISSOUS (sédiment)										
Matériau brut	100	22,3	/	4,5	348	324	499	323	1575	
LILLE (balayures de chaussée)										
Matériau brut	100	5,9	/	0,9	202	97	45	106	356	
Fraction > 30 mm	2		/	-	-	-	-	-	-	
Fraction 2-30 mm	32	2,6	/	0,07	64	16	11	12	58	
Fraction 60 µm-2 mm	Avant attrition		4,5	/	0,47	73	87	17	60	381
	Après attrition	44	2,8	/	0,26	76	80	21	49	206
Fraction < 60 µm	22	16,5	/	2,00	118	222	52	269	871	
CHEVIRE (sédiment)										
Matériau brut	100	15,6	3543	1,33	69	306	29	138	1180	
Fraction > 30 mm	4		-	-	-	-	-	-	-	
Fraction 2-30 mm	8	7,5	-	0,37	32	125	14	83	650	
Fraction 60 µm-2 mm	Avant attrition		6,3	850	0,18	32	59	11	66	320
	Après attrition	50	2,5	< seuil de détection	0,11	27	25	9	60	188
Fraction < 60 µm	38	25,5	6431	1,6	114	496	43	268	2275	
CROSNE AhAh2 (sédiment)										
Matériau brut	100	5,2		0,8	29	72	50	69	268	
Fraction > 30 mm	1	-		-	-	-	-	-	-	
Fraction 2-30 mm	13	3,8		0,27	42	38	26	37	134	
Fraction 60 µm-2 mm	Avant attrition		2,3		0,4	39	99	62	100	215
	Après attrition	74	2		0,3	34	90	54	48	78
Fraction < 60 µm	11	16,8		6,3	123	303	91	348	1152	

**tableau 2**  
Protocole du test de lixiviation

Solvant utilisé	Eau distillée	
Rapport solide/liquide	1/10	
Durée de contact	24 h	
Agitation	Par retournement continu (rotation 7 tours/min)	
Température	Ambiante	
Centrifugation	Durée	15 minutes
	Vitesse	4000 tr/min
	Température	4°C
Filtration à 0,22 µm	En fonction du type d'essai	

L'essai de lixiviation permet de simuler avec plus ou moins d'exactitude (rapport solide/liquide mis en jeu, température...) deux *scenarii* :

- soit un déversement du trop-plein des bassins contenant les sédiments dans un milieu aquatique récepteur ;
- soit une mise en dépôt terrestre ou une revalorisation des matériaux en déblais routiers.

Dans ces deux cas les résidus sont exposés directement ou par infiltration à un lessivage par l'eau météorique qui peut emporter une partie des polluants de ces matrices jusqu'à un milieu aquatique proche.

Les lixiviats ont été caractérisés sur le plan physico-chimique (**tableau 3**). Parmi les éléments susceptibles de participer à la toxicité des lixiviats, n'ont été pris en compte que les polluants métalliques, l'analyse des polluants organiques (HAP, PCB, pesticides, etc.) ne se faisant pas au LSE et nécessitant un budget important. A noter que les analyses physico-chimiques ont porté à la fois sur les lixiviats filtrés à 0,22 µm, dans l'esprit de la norme (élimination de la fraction particulaire), et les lixiviats seulement centrifugés, pour lesquels il reste une fraction particulaire significative, fraction qui existe sur le terrain et qui peut participer à la toxicité.

**tableau 3**  
Analyses réalisées sur les lixiviats.

Analyses physico-chimiques	Lixiviat centrifugé	Lixiviat filtré à 0,22 µm
pH	Par pHmètre	
Conductivité	Par conductimètre	
Métaux (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)	Par SAA, après minéralisation AFNOR 1998 [9]	Par SAA, directement [9]
Ions ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ), ions nitrate NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , ions phosphate (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	-	Méthodes HACH
Anions SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup>	-	Chromatographie d'ions (Dionex)
Cations calcium Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup>	-	Chromatographie d'ions (Dionex)

### ■ Essais monospécifiques

Des essais de toxicité aiguë (immobilisation de daphnies, d'amphipodes), subaiguë (inhibition de la croissance d'algues microscopiques), et chronique (inhibition de la reproduction de daphnies) ont été menés sur tout ou partie des lixiviats seulement centrifugés ou centrifugés et filtrés à 0,22 µm (pour éliminer la toxicité particulaire et également satisfaire aux contraintes de lecture optique du test algues). Les protocoles sont présentés dans le **tableau 4**.

### ■ Essais plurispécifiques

Des essais microcosmes ont été menés sur les lixiviats des sédiments bruts et des fractions obtenues par criblage granulométrique et fournies par le LCPC, sauf pour le sédiment de Wissous (pas de criblage). Le protocole général du test est décrit dans la littérature [5-7]. Dans les essais réalisés nous avons choisi de travailler en sédiment artificiel (150 g sec par microcosme constitué de 88 % de sable de Fontainebleau, 10 % de kaolin, 1,5 % d'alpha-cellulose, 0,1 % de carbonate de calcium et 0,3 % de Tétramin), avec une colonne d'eau constitué d'un milieu synthétique OCDE modifié (enrichi en calcium et en vitamines) [10, 11].

Les microcosmes sont placés dans une salle thermostatée à 20°C et sont soumis à une photopériode de 16 heures d'intensité moyenne de 2 000 lux en surface.

Les microcosmes sont ensuite aérés de façon permanente à l'aide de pipettes Pasteur reliées à des pompes d'aquarium afin de saturer la colonne d'eau en oxygène.

Les systèmes sont laissés au repos sans lumière pendant 6 jours environ afin de permettre l'établissement d'un équilibre entre les phases liquide et solide et une stabilisation des paramètres physico-chimiques et bactériologiques [11].

Les lixiviats seulement centrifugés sont introduits en même temps que les organismes après cette phase de stabilisation. J0 correspond à l'introduction des organismes dont le nombre et l'âge sont indiqués dans le **tableau 5**.

**tableau 4**  
Essais monospécifiques  
mis en œuvre sur  
lixiviats de résidus  
d'assainissement routier.

Essai	Test algues	Test daphnies		Test amphipodes	
Espèce	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	<i>Daphnia magna</i>		<i>Hyalella azteca</i>	
Critère d'effet	Inhibition de la croissance	Immobilisation	Inhibition de la reproduction	Immobilisation	Survie
Durée d'exposition	72 h	48 h	21 jours	96 h	14 jours
Température	24 °C	20 °C		20 °C	20 °C
Éclairage	6000 lux en permanence	Obscurité	2000 lux 16 h/jour	Obscurité	2000 lux 16 h/jour
Récipients	microplaques de 96 puits	Tubes à essai en verre	Flacon polyéthylène	Flacon polyéthylène	
Nombre d'organismes	10 <sup>4</sup> cellules par mL à t = 0	10 daphnies/tube	1 daphnie par flacon	5 individus/flacon	
Age des organismes à t = 0	/	< 24 h		7 à 14 jours	
Réplicats	5 puits/conc.	3 tubes/conc.	10 flacons/conc.	3 flacons/conc.	
Nourriture	/	Non	Algues : 3 × 10 <sup>5</sup> cellules/mL 3×/sem.	Non	0,25 mg Tétramin/ind./jour
Concentrations testées	5,625 ; 11,25 ; 22,5 ; 45,0 et 90,0 %	6,25 ; 12,5 ; 25,0 ; 50,0 et 100,0 %	12,5 %, 25 %, 50 %	6,25 ; 12,5 ; 25,0 ; 50,0 et 100,0 %	12,5 %, 25 %, 50 %
Volume solution d'essai	250 µL	10 mL	40 mL	25 mL	
Traitement lixiviat	Centrifugation + filtration 0,22 µm	Centrifugation + filtration ou non 0,22 µm			

**tableau 5**  
Organismes introduits dans les microcosmes.

Organismes	Nombre	Age
Daphnies	10	Moins de 24 heures
Algues <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	10 000 cellules/mL 10 000 cellules/mL	–
Lentilles d'eau	12 frondes (6 colonies de 2 frondes)	–
Amphipodes	10	1 à 2 semaines
Larves de chironomes	25	2 à 4 jours

Les paramètres physicochimiques ont été suivis suivant le protocole présenté dans le **tableau 6**.

Le suivi des organismes est composé de deux parties : un suivi en l'absence de sacrifice et un autre suivi lors des sacrifices, présentés dans les **tableaux 7 et 8**.

## RÉSULTATS

Quatre résidus (Wissous, Cheviré, AhAh2, Lille) et leurs deux fractions valorisables (60 µm-2 mm ; 2-30 mm) ont été caractérisés et testés. Pour Cheviré, la fraction < 60 µm a également été étudiée. Deux essais en microcosmes ont été mis en œuvre, complétés par des essais monospécifiques réalisés en préliminaire (survie daphnies 48 h, croissance algues 72 h, amphipodes 96 h) ou en complément (survie daphnies 48 h, reproduction daphnies 21 jours, survie *H. azteca* 14 jours).

**tableau 6**  
Paramètres physicochimiques suivis dans les microcosmes.

Paramètres	Fréquences	Appareil de mesure	Support
Conductivité	2 fois / semaine et lors des sacrifices	Conductimètre WTW modèle LF 95 muni d'une sonde Tetracon 96	Eaux surnageantes non filtrées
Température		Sonde de température intégrée au conductimètre	
pH		pH-mètre WTW modèle pH 96 étalonné avant chaque mesure	
Pourcentage en O <sub>2</sub> dissous		Sonde O <sub>2</sub>	

**tableau 7**  
Suivi des organismes des microcosmes en l'absence de sacrifice.

Organismes	Fréquence	Paramètres mesurés	Méthodes
Lentilles d'eau	2 fois / semaine	Croissance	Nombre de frondes
Daphnies	1 à 2 fois / semaine	Survie	Comptage à vue des mères jusqu'à l'apparition des premiers jeunes puis par siphonage (les mères sont réintroduites après comptage)
		Reproduction	Comptage par siphonage des jeunes qui ne sont pas remis ensuite dans la colonne d'eau pour éviter une surpopulation
Chironomes (Imagos)	Jours ouvrables	Survie	Nombre de mâles Nombres de femelles
	Fin d'essai	Croissance	Poids secs des mâles Poids secs des femelles

**tableau 8**  
Suivi des organismes des microcosmes lors des sacrifices (\*les adultes sont suivis de la même manière qu'en l'absence de sacrifice).

Organisme	Paramètres mesurés	Méthode
Lentilles d'eau	Croissance	Nombre de frondes
	Production primaire	Poids sec
Algues	Croissance	Teneurs en chlorophylle a (Afnor 1999)
Daphnies	Survie	Nombre de mères
	Croissance	Poids sec des mères
	Reproduction	Nombre de jeunes
Chironomes (larves)*	Survie	Nombre de larves
	Croissance	Poids sec des larves après 24 h de jeûne à 20 ± 2°C, à l'obscurité dans de l'eau de nappe
Amphipodes	Survie	Dénombrement
	Croissance	Poids sec après 24 h de jeûne à 20 ± 2°C, à l'obscurité dans de l'eau de nappe

## ■ Composition physico-chimique des lixiviats

Du point de vue composition saline, le lixiviat de Wissous contient essentiellement du potassium (16 mg/L) et du calcium (259 mg/L). Les analyses ont été limitées pour les autres lixiviats (**tableau 9**). Le pH est plutôt basique et varie entre 8 et 9. Il reste donc dans l'intervalle supporté par les organismes vivants. Les différences de pH et de conductivité entre les échantillons centrifugés puis filtrés et ceux uniquement centrifugés sont assez faibles et ne dépassent pas les 2,5. La conductivité varie de façon importante selon la fraction, en l'absence d'analyses détaillées des ions majeurs il n'est pas possible d'expliquer ces variations. Les valeurs obtenues ici sont compatibles avec la vie aquatique. Les apports en phosphates sont significatifs, les teneurs en nitrates et ammoniacque restent faibles.

**tableau 9**  
 Résultats physico-  
 chimiques sur les lixiviats  
 de Lille, Cheviré et AhAh2  
 (Nd : non déterminé).

Lixiviat		pH	Conductivité μS/cm	NH <sub>3</sub> -N mg/L	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> mg/L	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L
Lille brut	NF	8,08	448	Nd	Nd	Nd
	F	8,18	450	0,08	0,23	7,2
Lille 2-30 mm	NF	8,93	159,2	Nd	Nd	Nd
	F	9,01	157,2	0,02	0,25	0,8
Lille 60 μm-2 mm	NF	9,13	101,9	Nd	Nd	Nd
	F	9,28	99,7	0,01	0,21	0,5
Cheviré brut	NF	7,75	290	Nd	Nd	Nd
	F	8,04	300	1,38	0,39	0,4
Cheviré 2-30 mm	NF	7,64	320	Nd	Nd	Nd
	F	7,99	326	0,56	0,09	0,2
Cheviré 60 μm-2 mm	NF	8,07	83,2	Nd	Nd	Nd
	F	8,14	88,6	0,07	0,32	0
Cheviré < 60 μm	NF	7,61	475	Nd	Nd	Nd
	F	7,79	467	0,09	0,14	2,4
AhAh2 brut	NF	8,02	519	Nd	Nd	Nd
	F	7,98	508	0	0,15	0,5
AhAh2 2-30 mm	NF	8,17	258	Nd	Nd	Nd
	F	8,11	252	0	0,15	0,5
AhAh2 60 μm-2 mm	NF	8,48	197,7	Nd	Nd	Nd
	F	8,41	196,4	0,08	0,16	0,5

Le contact de l'eau avec le matériau ne permet de mobiliser qu'une très faible fraction des polluants (maxi 5 %), comme on peut le constater avec les métaux (**tableaux 10 et 11**). L'essentiel reste piégé dans le sédiment. Mais on peut constater un comportement différent des métaux en les classant par ordre de mobilité croissante (méthode des rangs) : Zn < Cr < Cd < Ni < Pb < Cu si l'on considère les lixiviats non filtrés et Cr ~ Cd < Zn < Pb < Ni < Cu si l'on considère les lixiviats filtrés. On verra ci-après que la plus grande mobilité de Ni, Cu et Pb explique des teneurs problématiques au niveau des lixiviats. Il est par ailleurs possible que la mobilité soit supérieure dans la fraction 2-30 mm (cas de Cheviré et Lille, pas de AhAh2).

### ■ Essais monospécifiques

Les tests de toxicité aiguë sur daphnies ne mettent pas en évidence une toxicité élevée, notamment aucun effet sur la mobilité 48 h de *Daphnia magna* à la concentration 10 %. Le lixiviat du sédiment de Wissous présente une toxicité aiguë modérée vis-à-vis de *D. magna* (50 % d'effet à la concentration 72 %), mais à 100 % de lixiviat la mortalité est totale pour les deux types de lixiviat (filtré et non filtré). Les résultats pour les autres sédiments sont présentés dans le **tableau 12**. Le lixiviat du sédiment de Cheviré apparaît comme non toxique pour les daphnies. Le lixiviat du sédiment de Lille présente une toxicité relativement faible pour ces micro-crustacés (effet < 50 % sans dilution). De plus il ne semble pas y avoir de différence de réponse suivant la fraction sédimentaire considérée, sauf pour AhAh2. Enfin la comparaison des résultats obtenus sur les lixiviats non filtrés et filtrés démontre que les toxiques agissant se trouvent sans doute liés aux particules de taille supérieure à 0,22 μm.

Aucun effet sur la reproduction 21 jours de *Daphnia magna* n'est observé avec le lixiviat de Wissous (filtré et non filtré). Les lixiviats des différentes fractions granulométriques du sédiment Cheviré ont été évalués au regard de la reproduction de *Daphnia magna*. Aucun effet n'est observé aux



**tableau 10**

Teneurs en métaux ( $\mu\text{g/L}$ )  
des lixiviats obtenus  
à partir des résidus  
d'assainissement routier  
étudiés (NF : centrifugé et  
non filtré ; F : centrifugé et  
filtré  $0,22 \mu\text{m}$  ; en grisé :  
valeurs > PNEC Ineris ;  
LD : limite de détection).

		Pb	Cd	Cr	Ni	Cu	Zn
Wissous	NF	1906	20,7	180,7	281,7	2127,5	10
	F	8,4	0,16	0,74	7,8	13,6	< LD
AhAh2 brut	NF	5,67	< LD	< LD	18,52	12,75	< LD
	F	< LD	< LD	< LD	17,34	8,56	< LD
AhAh2 2-30 mm	NF	1,26	< LD	< LD	4,16	2,27	< LD
	F	< LD	< LD	< LD	4,29	2,25	< LD
AhAh2 60 $\mu\text{m}$ - 2 mm	NF	4,13	< LD	< LD	4,41	7,16	< LD
	F	< LD	< LD	< LD	3,27	4,15	< LD
Lille brut	NF	183	1,43	3,7	30	103,25	0,43
	F	5	< LD	0,14	2,63	18,9	< LD
Lille 2-30 mm	NF	35,1	0,35	0,7	7,4	23,1	0,17
	F	1,22	< LD	< LD	0,9	6,67	< LD
Lille 60 $\mu\text{m}$ -2 mm	NF	36,1	0,7	0,9	8,8	37,9	0,2
	F	3,8	< LD	< LD	< LD	9,3	< LD
Cheviré brut	NF	105,7	0,98	1,63	18,3	289,7	0,85
	F	1,22	0,13	0,1	4,09	19,3	0,19
Cheviré 2-30 mm	NF	70	0,7	1,9	16,5	178,7	0,6
	F	< LD	0,48	< LD	3,04	18,4	0,15
Cheviré 60 $\mu\text{m}$ - 2 mm	NF	25,9	< LD	0,19	1,2	23,77	0,15
	F	7,53	< LD	0,11	0,71	8,27	0
Cheviré < 60 $\mu\text{m}$	NF	20,45	0,12	0,17	2,89	70,05	0,21
	F	< LD	0,1	< LD	1,57	23,98	0,21

**tableau 11**

Pourcentage de métal  
extrait des résidus  
d'assainissement routier  
au cours du test de  
lixiviation, en considérant  
le lixiviat seulement  
centrifugé (NF) et le  
lixiviat filtré à  $0,22 \mu\text{m}$  (F).

	Cd		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn	
	NF	F	NF	F	NF	F	NF	F	NF	F	NF	F
Wissous	4,60	0,04	0,52	0,00	6,57	0,04	0,56	0,02	5,90	0,03	0,01	0,00
AhAh2 brut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,12	0,37	0,35	0,08	0,00	0,00	0,00
AhAh2 2-30 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,06	0,16	0,17	0,03	0,00	0,00	0,00
AhAh2 60 $\mu\text{m}$ -2 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,05	0,08	0,06	0,09	0,00	0,00	0,00
Lille brut	1,59	0,00	0,02	0,00	1,06	0,19	0,67	0,06	1,73	0,05	0,00	0,00
Lille 2-30 mm	5,00	0,00	0,01	0,00	1,44	0,42	0,67	0,08	2,93	0,10	0,00	0,00
Lille 60 $\mu\text{m}$ -2 mm	2,69	0,00	0,01	0,00	0,47	0,12	0,42	0,00	0,74	0,08	0,00	0,00
Cheviré brut	0,74	0,10	0,02	0,00	0,95	0,06	0,63	0,14	0,77	0,01	0,00	0,00
Cheviré 2-30 mm	1,89	1,30	0,06	0,00	1,43	0,15	1,18	0,22	0,84	0,00	0,00	0,00
Cheviré 60 $\mu\text{m}$ -2 mm	0,00	0,00	0,01	0,00	0,95	0,33	0,13	0,08	0,43	0,13	0,00	0,00
Cheviré < 60 $\mu\text{m}$	0,05	0,04	0,00	0,00	0,14	0,05	0,06	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00

**tableau 12**  
 Synthèse des effets moyens  
 (en %) obtenus lors des  
 tests monospécifiques  
 sur les lixiviats issus des  
 sédiments de AhAh2, Lille  
 et Cheviré<sup>(n)</sup> : nombre  
 d'essais effectués les  
 cases vides correspondent  
 aux concentrations non  
 testées).

Sédiment	Fraction		Test daphnies à 48 h				Test amphipodes à 96 h			
			Concentration en lixiviat							
			100 %	50 %	25 %	12,5 %	100 %	50 %	25 %	12,5 %
AhAh2	brut	NF	30 % <sup>(1)</sup>	Pas d'effet <sup>(1)</sup>			90 % <sup>(1)</sup>			
		F	20 % <sup>(1)</sup>				100 % <sup>(1)</sup>			
	2-30 mm	NF	0 % <sup>(1)</sup>	Pas d'effet <sup>(1)</sup>			100 % <sup>(1)</sup>			
		F	0 % <sup>(1)</sup>				100 % <sup>(1)</sup>			
	60 µm- 2 mm	NF	60 % <sup>(2)</sup>	Pas d'effet <sup>(1)</sup>			80 % <sup>(1)</sup>			
		F	60 % <sup>(2)</sup>				20 % <sup>(1)</sup>			
Lille	brut	NF	40 % <sup>(1)</sup>				10 % <sup>(1)</sup>			
		F	30 % <sup>(1)</sup>				20 % <sup>(1)</sup>			
	2-30 mm	NF					20 % <sup>(1)</sup>			
		F					10 % <sup>(1)</sup>			
	60 µm- 2 mm	NF	30 % <sup>(1)</sup>				70 % <sup>(1)</sup>			
		F					40 % <sup>(1)</sup>			
Cheviré	brut	NF	Entre 10 et 30 % <sup>(3)</sup>		Pas d'effet		70 % <sup>(2)</sup>	27 % <sup>(2)</sup>	23,5 % <sup>(1)</sup>	
		F					50 % <sup>(2)</sup>	40 % <sup>(2)</sup>	10 % <sup>(2)</sup>	
	2-30 mm	NF	< 10 %		Pas d'effet		80 % <sup>(1)</sup>	60 % <sup>(1)</sup>	27 % <sup>(1)</sup>	
		F					67 % <sup>(1)</sup>	27 % <sup>(1)</sup>	47 % <sup>(1)</sup>	
	60 µm- 2 mm	NF	< 10 %		Pas d'effet		12,5 % <sup>(1)</sup>	0 % <sup>(1)</sup>	0 % <sup>(1)</sup>	
		F						Pas d'effet		
< 60 µm	NF	< 10 %		Pas d'effet			Pas d'effet			
	F									

concentrations testées (12, 25 et 50 %), mais la reproduction est un peu moins bonne en présence de lixiviat non filtré.

Les amphipodes sont plus sensibles que les daphnies mais ils sont aussi exposés plus longtemps. Les lixiviats les plus nocifs sont ceux issus des sédiments de AhAh2, et les effets sur amphipodes (*H. azteca*) exposés 96 h ne sont significatifs qu'à partir de la concentration 50 % (tableau 12). Les effets sur 14 jours ont été suivis pour le lixiviat de la fraction 2-30 mm de Cheviré (filtré et non filtré). La filtration diminue la toxicité des effluents, comme le montrent les résultats à la concentration 50 % (figure 1). Le calcul de la CE 50-14 j donne une valeur de 31,5 % de lixiviat.

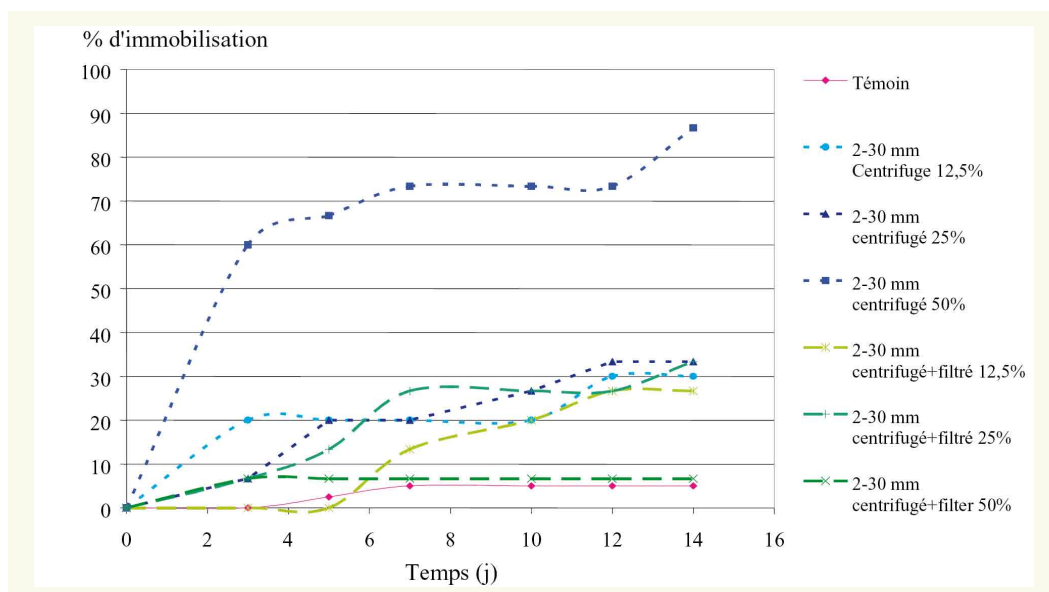
Les tests sur algues en présence d'effluents même filtrés sont souvent difficiles à interpréter en raison de phénomènes d'agrégation des algues liés entre autres à la présence de matières colloïdales [12]. L'essai mené sur le lixiviat du sédiment de Wissous est le seul qui soit réellement interprétable. Les résultats montrent une inhibition de croissance de *Pseudokirchneriella subcapitata* significative puisque la CI50-72 h (concentration qui inhibe de 50 % la croissance algale en 72 h) est estimée à une valeur très proche de 50 % en lixiviat filtré à 0,22 µm. Pour les autres lixiviats, les interférences ont gêné la lecture des résultats, mais un examen visuel montre l'absence d'effets notoires.

## ■ Essais en microcosmes

### ➤ Sédiment de Wissous

L'essai en microcosmes a porté sur la concentration 10 % du lixiviat non filtré. Le choix de cette concentration repose sur l'absence d'effets en tests monospécifiques d'une part, et sur le fait qu'il s'agit d'une concentration probablement majorante par rapport aux concentrations attendues *in*

**figure 1**  
Suivi de la survie  
des amphipodes sur  
14 jours dans les lixiviats  
centrifugés et filtrés de  
Cheviré (fraction 2-30 mm)  
à 12,5, 25 et 50 %.

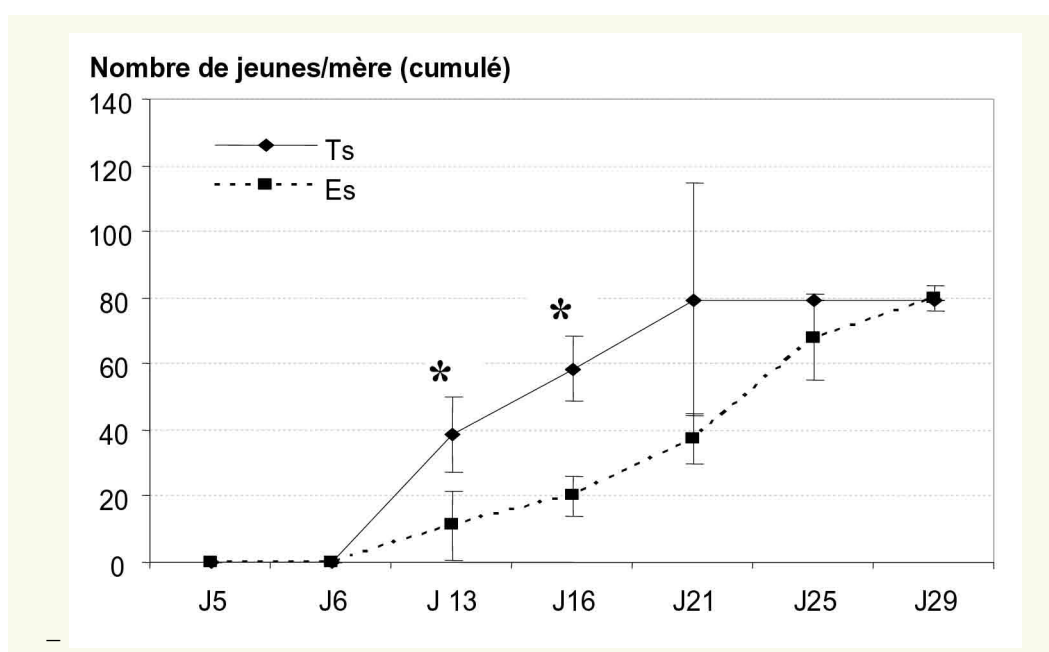


*situ*, compte tenu du fait que les apports de lixiviat sont généralement limités (matériaux faiblement exposés aux pluies) et que le milieu apporte une dilution significative.

Le lixiviat apporte dans la colonne d'eau de l'azote (ammoniaque oxydé en nitrates et nitrites), du calcium, et du cuivre (20 à 30 µg/L à la concentration testée), les autres métaux étant en concentrations faibles d'un point de vue écotoxicologique (< 2 µg/L). A 10 % de lixiviat on observe :

- un effet sur la survie des daphnies par piégeage par les particules (en test aigu monospécifique sur lixiviat non filtré on n'avait pas d'effet à partir de 25 %), puis aucun effet après réintroduction d'autres daphnies mais un effet significatif sur leur croissance et leur reproduction (figure 2) ;
- un effet sur la croissance des amphipodes, pas sur leur survie ;
- aucun effet sur la survie des chironomes mais un retard des premières émergences, sans conséquences sur le taux d'émergence final, proche de 70 % ; ce retard est à rapprocher de larves plus petites que dans les témoins ;
- la croissance algale ne semble pas affectée ;
- la croissance des lentilles d'eau est stimulée.

**figure 2**  
Reproduction des  
daphnies lors de l'essai  
microcosmes sur le lixiviat  
de Wissous (concentration  
10 %) : nombre moyen  
de jeunes cumulé par  
daphnie introduite à J0  
au cours de l'essai sur  
lixiviat (moyennes ± barres  
d'écart-type ; \* différence  
significative entre l'essai  
Es et le témoin Ts).



### › Sédiment AhAh2

L'essai en microcosmes mené sur le lixiviat non filtré du résidu AhAh2 (brut, fractions 60 µm-2 mm et 2-30 mm ; concentration 10 %) met en évidence des effets :

- soit non significatifs (croissance des algues, survie et reproduction des daphnies, survie, croissance et émergence des larves de chironomes) ;
- soit significatifs mais faibles (légère stimulation de croissance des lentilles d'eau, léger effet (< 10 %) sur la survie des amphipodes mais seulement à J26 (pas de différences à J12 et J19), et léger effet (< 24 %) sur le poids des imagos de chironomes).

Il n'y a par ailleurs pas de différences entre fractions.

### › Sédiment de Cheviré

L'essai en microcosmes sur le lixiviat non filtré de Cheviré (fractions 60 µm-2 mm et 2-30 mm ; concentrations 12,5, 25 et 50 %) met clairement en évidence une fraction toxique (2-30 mm) et une fraction non ou peu toxique (60 µm-2 mm). Ainsi, la fraction 2-30 mm entraîne des effets sur :

- la reproduction des daphnies à 25 et 50 % (réduction de moitié environ) (figure 3) ;
- la survie des amphipodes, fortement réduite à 25 et 50 % (100 % de mortalité à cette concentration) (tableau 13) ;
- la croissance des amphipodes, fortement réduite dès 25 %.

Mais la même fraction n'a pas d'effets sur les chironomes et les lentilles d'eau, pour toutes les concentrations testées. Pour les algues il est difficile de conclure car (i) il n'a pas été possible d'ef-

figure 3

Évolution de la reproduction des daphnies mères, exprimée par le cumul de jeunes daphnies par mère au cours de l'essai Cheviré (moyenne ± écart-type).

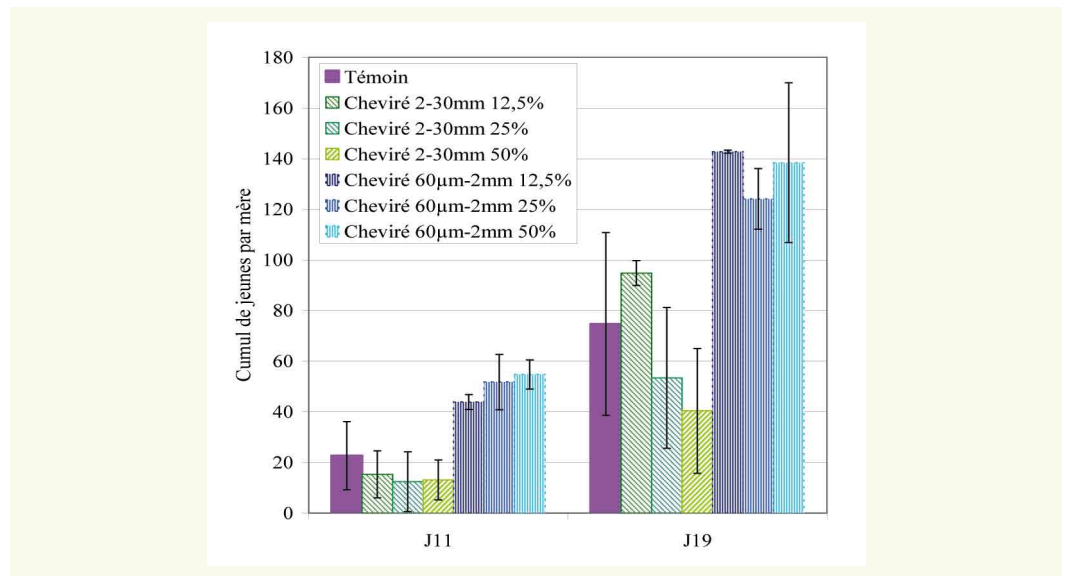


tableau 13

Taux de survie, écart type et CV des amphipodes au cours de l'essai Cheviré.

Traitement	Nombre de microcosmes	% de survie	Ecart type	CV
Témoins	3	80	17,3	21,7
Cheviré 2-30 mm	12,5 %	70	30	42,9
	25 %	26,7	20,8	78,1
	50 %	0	0	
Cheviré 60 µm-2 mm	12,5 %	93,3	5,8	6,2
	25 %	73,3	5,8	7,9
	50 %	90	10	11,1

fectuer des mesures au long du test et (ii) l'activité de broutage des daphnies interfère sur la densité algale. A noter que la concentration 12,5 % du lixiviat de cette fraction n'est toxique pour aucun organisme.

A l'opposé de la fraction 2-30 mm, la fraction 60 µm-2 mm s'est avérée non écotoxique à toutes concentrations. La différence de toxicité des deux fractions est à rapprocher des niveaux de contamination des deux fractions et des lixiviats correspondants : la fraction 2-30 mm est clairement plus contaminée que la fraction 60 µm-2 mm pour Cu, Pb et Zn.

Les tests monospécifiques réalisés en complément de l'essai en microcosmes sur Cheviré (résultats présentés ci-dessus) confirment les hypothèses faites pour expliquer les résultats de cet essai : la toxicité du lixiviat de la fraction 2-30 mm vis-à-vis des amphipodes (survie 14 jours) et des daphnies (reproduction 21 jours) s'explique par la fraction particulière puisque la filtration à 0,22 µm atténue sensiblement les effets.

## DISCUSSION ET CONCLUSION

Pour juger des dangers présentés par les teneurs en métaux des lixiviats, une analyse de ces teneurs peut être faite par comparaison à des seuils d'écotoxicité aquatique. On peut prendre par exemple les PNEC produites par l'Ineris (PNEC : Predictive No Effect Concentration) pour chaque métal à partir des données de toxicité de la littérature. Les résultats (**tableau 10**) montrent que, de façon logique, les lixiviats filtrés (à 0,22 µm) sont moins contaminés que les lixiviats seulement centrifugés. Les 22 lixiviats considérés présentent au moins un métal à une teneur > PNEC, et 12 échantillons sur 28 au moins 3 métaux > PNEC. C'est le cuivre et le nickel, suivis du plomb, qui sont les plus problématiques. Les lixiviats des fractions granulométriques 60 µm-2 mm et 2-3 mm semblent en moyenne un peu moins contaminés que les lixiviats des résidus bruts, mais présentent eux aussi des valeurs > PNEC.

Après dilution par 10, si pour une majorité de lixiviats les métaux sont souvent présents à des teneurs < PNEC, il reste que 14 échantillons sur 22 présentent au moins une teneur métallique > PNEC. Parmi ces métaux c'est le cuivre qui dépasse le plus souvent le seuil de toxicité (12 fois sur 22), suivi du nickel (8 fois sur 22). Zinc et cadmium sont les moins problématiques à cette concentration qui est encore élevée et peu réaliste.

Enfin, une dilution par 100, qui correspond à une concentration en lixiviat plus réaliste de 1 %, permet d'atteindre des teneurs métalliques sans risques pour 19 lixiviats sur 22, les dépassements de PNEC devenant rares. Bien évidemment, on raisonne toujours ici pour chaque métal considéré isolément, sans tenir compte des interactions entre effets, pouvant conduire à de la simple additivité, de la synergie ou de l'antagonisme.

En pratique, les essais monospécifiques menés sur ces lixiviats semblent indiquer une absence d'effets à des teneurs < 50 %, mais il est vrai qu'il s'agit de toxicité aiguë ou subaiguë, alors que la PNEC intègre les effets chroniques correspondant à des expositions plus réalistes. Les essais en microcosmes ont fait apparaître, sur une durée d'exposition plus élevée (21 ou 28 jours) des effets nuls ou seulement légers à 10 %, sauf pour le lixiviat du sédiment de Wissous qui présentait à cette concentration de 10 % des teneurs > PNEC pour 5 métaux sur 6.

Ainsi, il semble que l'analyse sommaire qui vient d'être faite à partir des teneurs en métaux comparées aux seuils de toxicité aquatique et les résultats des essais en microcosmes menés concordent assez bien. En effet, la première analyse suggère que, pour la plupart des lixiviats de résidus d'assainissement routier, le risque de toxicité aquatique due aux métaux est écarté après dilution par 100 (concentration en lixiviat de 1 %), alors que les essais en microcosmes indiquent des effets significatifs au-delà d'une concentration voisine de 10 %. Compte tenu du facteur de sécurité de 10 généralement appliqué aux résultats d'essais en microcosmes, la PNEC qui en résulte serait voisine de 1 %. Cette concentration est encore probablement largement supérieure à ce qu'on peut attendre

dans l'environnement, du fait que les lixiviats sont par nature produits en petites quantités, qu'une partie du flux peut être perdu en chemin (infiltration dans le sol par exemple, évaporation...), et que l'effet de dilution par un milieu aquatique est généralement important. Il faut également se rappeler que les lixiviats produits au laboratoire sont généralement plus chargés que dans la réalité du fait des conditions de contact entre l'eau et les matériaux solides, et que les apports de polluants diminuent au fur et à mesure que les matériaux sont lessivés (lorsque L : S augmente).

Il paraît cependant difficile de tirer des conclusions hâtives à partir des quelques essais réalisés. C'est pourquoi d'autres essais en microcosmes ont été menés dans le courant de l'année 2008 sur un plus grand nombre d'échantillons représentatifs de différentes situations (sédiments de bassins, de fossés, balayures de chaussée, milieu urbain ou inter-urbain).

#### REMERCIEMENTS

*Cette étude a bénéficié de fonds propres du Laboratoire des Sciences de l'Environnement (LSE/ENTPE) et d'une contribution financière de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Nos remerciements vont aux techniciennes du LSE, Martine Ghidini-Fatus et Thérèse Bastide pour les analyses de métaux.*

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **DURAND C.**, Caractérisation physico-chimique des produits de l'assainissement pluvial. Origine et devenir des métaux traces et des polluants organiques. Thèse doctorat : Chimie organique, minérale, industrielle et chimie environnementale, Université de Poitiers, **2003**, 248 p.
- 2 **PÉTAVY F.**, Traitement et valorisation des sédiments de l'assainissement pluvial, rapport de thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, **2007**, 317 p.
- 3 **PERRODIN Y., GOBBEY A., GRELIER-VOLATIER L., CANIVET V., FRUGET J-F., GIBERT J., TEXIER C., CLUZEAU D., GROS R., POLY F., JOCTEUR-MONROZIER L.**, Waste ecocompatibility in storage and reuse scenarios: global methodology and detailed presentation of the impact study on the recipient environments. *Waste Management*, **22**, **2002**, 215-228.
- 4 **LISSALDE A.M.**, Caractérisation, traitement et valorisation des sous-produits d'assainissement pluvial. Mémoire de fin d'études d'Ingénieur ENSPC, **2002**, 97 p.
- 5 **TRIFFAULT-BOUCHET G., CLÉMENT B., BLAKE G., PERRODIN Y.**, Évaluation du potentiel toxique de percolats de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères au laboratoire : comparaison de bioessais monospécifiques et d'un essai en microcosme, *Déchets, Sciences et Techniques* **33**, **2004**, 25-33.
- 6 **CLÉMENT B., DEVAUX A., PERRODIN Y., DANJEAN M., GHIDINI-FATUS M.**, Assessment of sediment ecotoxicity and genotoxicity in freshwater laboratory microcosms, *Ecotoxicology* **13**, **2004**, 323-333.
- 7 **TRIFFAULT-BOUCHET G., CLÉMENT B., BLAKE G.**, Assessment of contaminated sediments with an indoor freshwater/sediment microcosm assay, *Environ. Toxicol. Chem.* **24**, **2005**, 2243-2253.
- 8 **AFNOR**, Déchets - Essai de lixiviation. Norme NF X 31-210, **1992**.
- 9 **AFNOR**, Qualité de l'eau - Dosage de huit éléments métalliques (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Pb) par spectrométrie d'absorption atomique dans la flamme. Norme NF T 90-112., **1998**.
- 10 **OCDE**, Algal growth inhibition test, #201, adopted 7 June 1984. *OECD Guideline for testing of chemicals*, **1993**.
- 11 **CLÉMENT B.**, Apports des essais en microcosmes aquatiques lentières de laboratoire à l'évaluation écotoxicologique des polluants. Rapport d'HDR, Spécialité « chimie, génie des procédés, environnement », Institut National des Sciences Appliquées et Université Lyon 1, **2006**, 277.
- 12 **CLÉMENT B.**, La toxicité aiguë des lixiviats de décharge. Apports respectifs et complémentarité des approches biologique et physico-chimique. Thèse de Doctorat l'Université de Savoie, spécialité Biologie et Biochimie Appliquées, **1994**, 326 p.