

Pollution des eaux de ruissellement de chaussées autoroutières L'autoroute A11 près de Nantes

Michel LEGRET
Chef de la section Pollution des eaux

Claire LE MARC
Assistante technique des Travaux publics de l'Etat
Section Pollution des eaux

Dominique DEMARE
Technicien supérieur
Section Pollution des eaux

Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

RÉSUMÉ

La qualité des eaux de ruissellement d'un tronçon autoroutier de 275 m de longueur a été étudiée pendant un an, par échantillonnage d'une cinquantaine d'événements pluvieux. Une pollution chronique en matières en suspension, demande chimique en oxygène, hydrocarbures totaux et plomb a été mise en évidence.

L'analyse de pollutogrammes montre l'existence d'un phénomène de premier flot peu accentué. Les charges de pollution annuelle déduites des mesures sont comparables aux valeurs antérieures, sauf la charge en plomb, qui paraît nettement diminuée du fait de la baisse de la teneur de cet additif dans les carburants.

Une pollution saisonnière en chlorures, sulfates, matières en suspension et métaux lourds a été mise en évidence, en relation avec l'utilisation de sels de déneigement en hiver.

Enfin, des corrélations ont été recherchées entre les charges de pollution rejetée par événement, les paramètres hydrologiques et la densité du trafic. Dans la plupart des cas, les données obtenues ne permettent pas d'établir de relation significative, en raison de la complexité des mécanismes d'accumulation et d'entraînement de la pollution.

MOTS CLÉS : 26-15 - Pollution - Eau - Ruissellement - Pluie - Autoroute - Chaussée (corps de) - France - Qualité - Prélèvement - Appareil de mesure - Métal - Lourd - Analyse chimique.

Introduction

Le trafic routier, la construction et la maintenance des routes peuvent être la source de différents types de nuisances et de pollutions : bruit, pollution atmosphérique, pollution des eaux et des sols.

Les sources de pollution peuvent avoir un caractère temporaire (pollution en phase travaux), saisonnier (salage hivernal), accidentel (déversement de produits dangereux) ou chronique (émission des véhicules, usure des pneus).

La loi sur l'eau de janvier 1992, dans son article 10, institue un régime d'autorisation ou de déclaration pour les ouvrages, travaux et activités affectant l'aménagement et la qualité des eaux.

Les aménagements routiers susceptibles de perturber les eaux superficielles par la modification des écoulements et par le rejet d'effluents polluants sont directement concernés par les décrets d'application de cette loi.

Dans ce contexte général de prise en compte de la pollution transportée dans les eaux pluviales, il est apparu nécessaire de mettre en œuvre de nouvelles campagnes de mesure de la qualité des eaux de ruissellement sur chaussées autoroutières, afin de mieux caractériser la nature et l'étendue de cette pollution, et de tenir compte des modifications intervenues dans la composition des carburants et la construction automobile.

En effet, les données françaises existantes proviennent des études réalisées de 1979 à 1981 par le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées (Cathelain et al., 1981 ; Baladès et al., 1985), reprises dans la note d'information du Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes de janvier 1987 (SETRA, 1987) sur la pollution des eaux de ruissellement.

Avec le soutien du SETRA et des sociétés d'autoroutes, différents sites autoroutiers ont été étudiés (Montrejaud-Vignoles et al., 1996) afin de prendre en compte les diversités climatique et géographique du réseau routier français dont, en particulier, un tronçon de l'autoroute A11 situé près de Nantes au niveau du franchissement de l'Erdre.

Méthode expérimentale

Description du site

L'étude a été réalisée sur un tronçon de l'autoroute A11 qui assure le contournement nord de la ville de Nantes, au niveau du franchissement de la rivière Erdre. Cette autoroute permet la continuité du réseau autoroutier Paris-Nantes en direction de la Bretagne avec les routes nationales 137 vers Rennes et 165 vers Saint-Nazaire et Vannes (fig. 2).

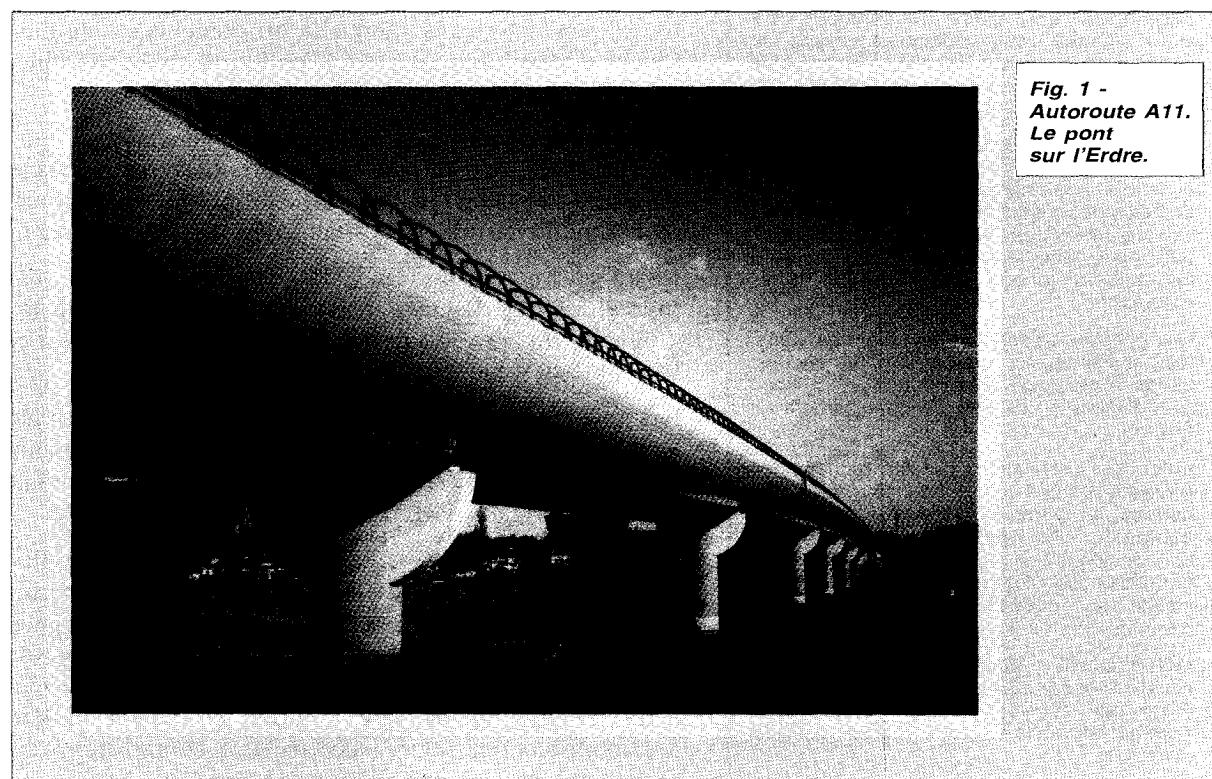
Le trafic moyen journalier est de l'ordre de 12 000 véhicules dans chaque sens de circulation, dont environ 7 % de poids lourds. Le pont sur l'Erdre

(fig. 1) mesure 500 m de longueur et est constitué de deux tabliers de sept travées. Cet ouvrage mixte en acier et béton est équipé d'un tablier à hauteur constante.

Des murs de soutènement prolongent les culées afin de limiter leur impact sur le milieu naturel. Sur chaque rambarde du pont est installé un écran anti-bruit formé de panneaux transparents en métacrylate.

Prélèvements

Les eaux de ruissellement prélevées proviennent de la chaussée à deux voies située sur le côté sud de l'ouvrage, sur une longueur de 275 m et une largeur de 11,65 m, soit une surface d'apport d'environ 3 200 m². Le matériel de mesure a été installé au niveau du dispositif de prévention des pollutions qui protège la rivière Erdre. Le recueil des eaux pluviales est assuré par des avaloirs équipés de descentes de 300 mm de diamètre implantées tous les 10 m et reliées à un collecteur général de 300 mm de diamètre. Les canalisations se trouvent dans les coques latérales assurant l'habillage du pont, dans lequel un passage de service a été aménagé. L'installation du point de mesure a nécessité la dérivation des eaux pluviales vers un canal de mesure de débit avant le raccordement au dessableur. Ce canal de mesure de débit comprend une chambre de tranquilisation, séparée de la chambre de mesure par une grille en PVC, et un déversoir triangulaire en mince paroi à échancrure de type « 1/2 90° ».



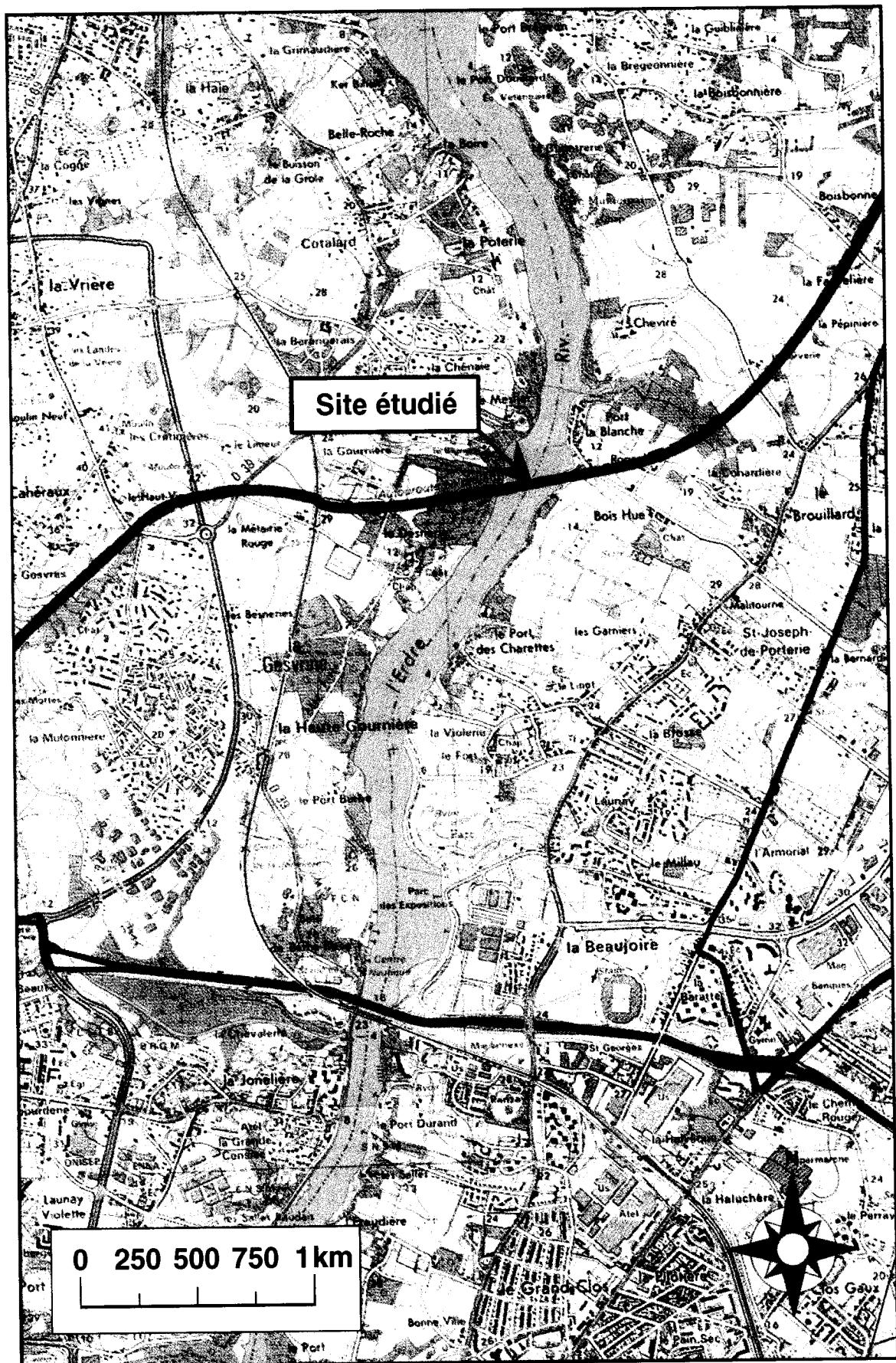


Fig. 2 - Localisation du site expérimental.

Les débits sont mesurés par une sonde à ultrasons immergée (CR2M). Deux préleveurs automatiques d'échantillons (Manning) permettent, d'une part, la constitution d'un échantillon moyen dans un flacon en verre de 9,5 l et, d'autre part, la constitution d'un pollutogramme à l'aide d'un échantillonneur de vingt-quatre flacons de 500 ml. Les prélevements sont asservis au volume écoulé et les cadences de prélèvement sont adaptées afin de prélever des échantillons correspondant à la totalité des événements : un prélèvement de 90 ml tous les 500 l écoulés pour la constitution de l'échantillon moyen et un prélèvement de 120 ml tous les 500 l écoulés pour la constitution des pollutogrammes. Ces cadences ont été portées à un prélèvement tous les 1 000 l écoulés à partir du mois de novembre 1995, afin de tenir compte de l'augmentation des précipitations pendant la période hivernale.

Les données pluviométriques sont obtenues à proximité du site par un pluviomètre à auget basculeur avec stockage des données (Précis-mécanique). Les sédiments déposés dans le canal de mesure de débit ont été prélevés pour analyse, et les quantités recueillies ont été estimées après chaque événement pluvieux.

Les échantillons d'eau et de sédiment prélevés sont conservés au réfrigérateur à 4° C jusqu'à leur analyse.

Analyses

Les analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux prélevées sur le site sont les suivantes :

- pH,
- demande chimique en oxygène (DCO),
- matières en suspension (MES),
- conductivité,
- azote Kjeldhal (NTK),
- Plomb (Pb), cuivre (Cu), cadmium (Cd) et zinc (Zn) dans les eaux brutes acidifiées avec un pH inférieur à 2 et les eaux filtrées sur membrane de 0,45 µm de porosité puis acidifiées avec un pH inférieur à 2,
- hydrocarbures totaux (Hc),
- hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP),
- ammonium (NH_4^+), nitrate (NO_3^-), chlorure (Cl^-) et sulfate (SO_4^{2-}) dans les eaux filtrées sur membrane de 0,45 µm de porosité.

Les analyses sont réalisées selon des méthodes normalisées (AFNOR, 1994a) : les métaux lourds (Pb, Cu, Cd et Zn) sont déterminés par spectrométrie d'absorption atomique, les hydrocarbures totaux par spectrométrie infrarouge, les hydrocarbures aromatiques polycycliques par chromatographie liquide à haute pression, les ions ammonium, nitrate, chlorure et sulfate par chromatographie ionique.

Les analyses de sédiments sont effectuées sur la fraction inférieure à 2 mm obtenue par tamisage sur un tamis en nylon et séchées par lyophilisation (AFNOR, 1994b).

Les analyses réalisées sur les sédiments sont les suivantes :

- matières volatiles (MV) à 550 °C,
- plomb (Pb), cuivre (Cu), cadmium (Cd) et zinc (Zn) par spectrométrie d'absorption atomique après mise en solution des échantillons calcinés pendant 2 h à 550 °C dans un mélange d'acides chlorhydrique et fluorhydrique concentrés,
- hydrocarbures totaux (Hc) par spectrométrie infrarouge après extraction au tétrachlorure de carbone,
- granulométrie à l'aide de tamis normalisés pour les particules de taille supérieure à 500 µm et par un granulomètre à diffraction laser pour les particules comprises entre 0,1 et 500 micromètres.

Les produits chimiques utilisés sont de qualité analytique reconnue (Merck, Suprapur et Pro Analysis) et l'eau ultra-pure est une eau déminéralisée sur colonne échangeuse d'ions (MAXY). Toute la verrerie en contact avec les échantillons est nettoyée à l'acide nitrique à 10 %, puis rincée à l'eau déminéralisée.

Résultats et discussion

Bilan des prélèvements d'eaux de ruissellement

Quarante-neuf événements pluvieux, ayant donné lieu à un ruissellement, ont été analysés pendant la période comprise entre le 28 mars 1995 et le 26 février 1996.

Pendant cette période, la hauteur totale de pluie précipitée sur le site a été de 647 mm, et la hauteur de pluie ayant donné lieu à un ruissellement de 583 mm, soit 90 % de la pluie totale. Le volume total d'eau écoulé sur le site correspond à 475 mm. Néanmoins, en raison du non-fonctionnement du système ou de la saturation des préleveurs lors de certains événements, la hauteur de pluie étudiée est de 546 mm, correspondant à 438 mm d'eau écoulée, et le volume d'eau échantillonné de 382 mm, soit 80 % du volume total écoulé.

La figure 3 présente les hauteurs mensuelles de précipitation de mars 1995 à février 1996 ainsi que les normales mensuelles pour la période 1961-1990. Ces pluies sont proches des normales de la région nantaise, caractérisées par des précipitations nombreuses et de faibles intensités réparties sur toute l'année avec un maximum pendant la période s'étendant des mois d'octobre à mars.

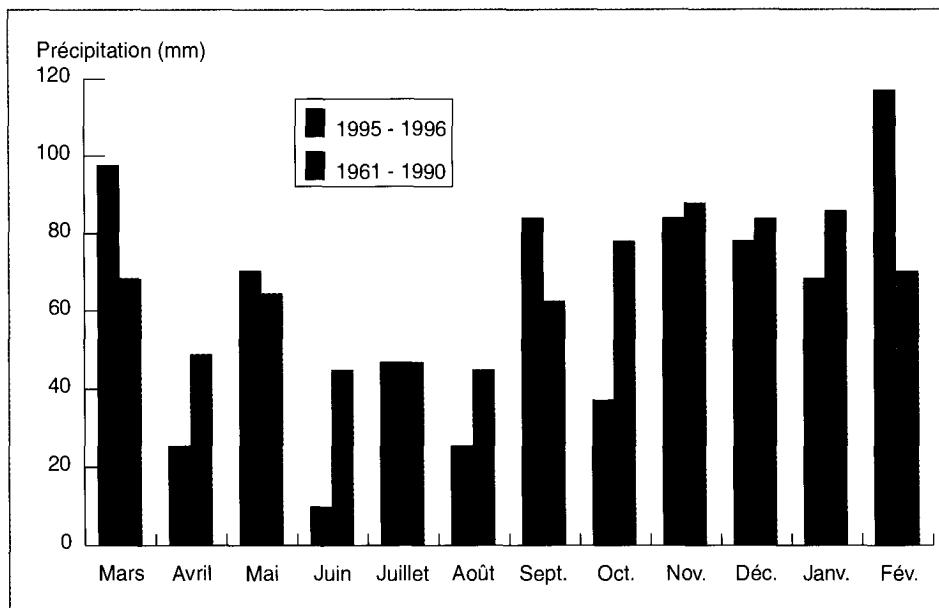


Fig. 3 -
Comparaison
des hauteurs
mensuelles
de précipitation
entre la période
de mesure
(1995-1996)
et la période
de référence
(1961-1990).

Sur les quarante-neuf événements échantillonnés :

- un seul correspond à une pluie inférieure à 2 millimètres,
- vingt-cinq à des pluies comprises entre 2 et 10 millimètres,
- dix-neuf à des pluies comprises entre 10 et 20 millimètres,
- quatre à des pluies supérieures à 20 millimètres.

On peut noter également l'existence de deux événements journaliers importants, l'un en septembre 1995, supérieur à 25 mm, et l'autre en février 1996, supérieur à 60 millimètres.

L'intensité maximale mesurée sur 6 min varie entre 2 et 28 mm/h, avec une valeur moyenne de 9,8 mm/h (écart-type = 7,2).

Enfin, la valeur moyenne des coefficients de ruissellement mesurés par événement sur la surface d'apport est de 0,75 (minimum = 0,16 ; maximum = 1,21 ; écart-type = 0,26).

Résultats des mesures de concentrations dans les eaux de ruissellement

Un prélèvement d'eau de pluie a été réalisé le 16 mai 1995 sur le parking du LCPC situé à moins de 15 km du site expérimental, afin de déterminer les valeurs des paramètres de qualité dans les eaux météoriques avant leur contact avec le sol, les concentrations mesurées sont les suivantes :

- pH : 5,2,
- matières en suspension : 0,65 mg/l,
- demande chimique en oxygène : < 10 mgO₂/l,
- nitrate : 0,4 mg/l,
- chlorure : 0,2 mg/l,
- sulfate : 0,6 mg/l,
- plomb : 0,99 µg/l,
- cuivre : 2,73 µg/l,

- cadmium : 0,12 µg/l,
- zinc : < 8 µg/l.

Les valeurs mesurées sont très faibles pour tous les paramètres. L'absence de source industrielle de pollution et l'éloignement des grands centres urbains peuvent expliquer l'absence de contamination des eaux météoriques.

Par ailleurs, différents événements particuliers ont pu influencer la qualité des eaux recueillies sur le site. Il s'agit, notamment, des opérations de salage survenues entre le 18 novembre 1995 et le 23 février 1996 et totalisant trente-deux passages ; des chutes de neige, ainsi qu'une opération de nettoyage du pont sur l'Erdre effectuée en janvier 1996.

Une analyse a été réalisée sur un prélèvement ponctuel du sel de déneigement utilisé sur l'autoroute A11 :

- insolubles (% de matières sèches) : 4,7,
- chlorure (% de matières sèches) : 53,6,
- sulfate (% de matières sèches) : 2,2,
- sodium (% de matières sèches) : 32,7,
- calcium (% de matières sèches) : 1,2,
- plomb (mg/kg de matières sèches) : 3,3,
- cuivre (mg/kg de matières sèches) : 0,5,
- cadmium (mg/kg de matières sèches) : 0,2,
- zinc (mg/kg de matières sèches) : 0,5.

Cette analyse indique la présence en quantité notable de matières insolubles (sables) et de sulfates.

Les tableaux I et II présentent, respectivement pour les eaux brutes et les eaux filtrées, la synthèse des résultats des analyses effectuées sur les eaux de ruissellement. La moyenne pondérée est obtenue en divisant la somme des charges de pollution correspondant à chaque événement par le volume total écoulé.

TABLEAU I
Synthèse des résultats des analyses des eaux brutes

Caractéristiques	pH	Conductivité (µs/cm)	MES (mg/l)	DCO (mgO ₂ /l)	NTK (mgN/l)	Hc (mg/l)	HAP (ng/l)	Pb (µg/l)	Cu (µg/l)	Cd (µg/l)	Zn (µg/l)
Nombre d'événements	48	46	49	45	43	44	35	49	49	49	49
Moyenne	7,3	1 356	71	103	2,3	1,2	< 96	58	45	1	356
Médiane	7,4	280	47	80	1,7	0,86	< 74	43	33	0,74	254
Moyenne pondérée	-	-	70	79	1,9	1,1	-	58	37	1,1	326
Gamme	6,3-7,9	60-17 620	16-267	21-507	0,6-10,2	0,14-4,2	< 11-474	14-188	11-146	0,21-4,2	104-1 544
Écart-type	0,27	3 122	61	83	1,8	0,94	76	44	27	0,86	288

MES : matières en suspension - DCO : demande chimique en oxygène - NTK : azote Kjeldhal - Hc : hydrocarbures totaux - HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques - Pb : plomb - Cu : cuivre - Cd : cadmium - Zn : zinc.

TABLEAU II
Synthèse des résultats des analyses des eaux filtrées

Caractéristiques	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Cr (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Pb (µg/l)	Cu (µg/l)	Cd (µg/l)	Zn (µg/l)
Nombre d'événements	48	48	48	47	49	49	49	49
Moyenne	5,8	388	54	1	3,9	25	0,53	222
Médiane	4	18	34	0,7	2,6	19	0,33	147
Moyenne pondérée	4,5	502	60	0,9	3,1	16	0,44	200
Gamme	0,8-26,6	2,7-6424	6,7-392	0,2-4,5	0,5-19	7,3-139	0,11-3,6	57-1 405
Écart-type	5,4	1197	64	0,90	4	22	0,58	233

Pb : plomb - Cu : cuivre - Cd : cadmium - Zn : zinc.

TABLEAU III
Valeurs limites réglementaires de qualité des eaux

Paramètre	Décret 89-3 (*)		Qualité des eaux de rivières		Directive Union européenne rejets STEP
	Groupe A3		1A	1B	
MES (mg/l)	-		30	30	35
DCO (mgO ₂ /l)	30(**)		20	25	125
Azote total (mgN/l)	3 (**)		1	2	10
Hc (mg/l)	1		-	-	-
HAP (µg/l)	1		-	-	-
Pb (mg/l)	0,05		0,05	0,05	-
Cu (mg/l)	1 (**)		0,02	0,05	-
Cd (mg/l)	0,005		0,001	0,001	-
Zn (mg/l)	5		0,5	1	-
Nitrate (mg/l)	50		-	-	-
Chlorure (mg/l)	200 (**)		-	-	-
Sulfate (mg/l)	250		-	-	-
Ammonium (mg/l)	4		0,1	0,5	-

(*) Eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine.

(**) Valeur guide.

MES : matières en suspension - DCO : demande chimique en oxygène - Hc : hydrocarbures totaux - HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques - Pb : plomb - Cu : cuivre - Cd : cadmium - Zn : zinc - STEP : station d'épuration.

Le tableau III indique différentes valeurs réglementaires, notamment :

- les valeurs limites pour les eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine, fixées par le décret 89-3 du 3 janvier 1989 (et décret 91-257 du 7 mars 1991) en ce qui concerne les eaux du groupe A3 devant subir un traitement physique et chimique poussé ;
- les valeurs limites pour les eaux de rivières de qualité 1A, considérées comme exemptes de pollution, et 1B, de qualité légèrement moindre pouvant satisfaire tous les usages ;
- les normes de rejets des stations d'épuration des eaux usées urbaines fixées par la directive européenne du 21 mai 1991.

L'examen des valeurs obtenues sur l'autoroute A11 met en évidence les points suivants :

- ◆ Le pH moyen (7,3) est proche de la neutralité. Les valeurs varient peu et ne semblent pas affectées par le salage hivernal.
- ◆ La valeur moyenne de la conductivité est de 1356 $\mu\text{s}/\text{cm}$, néanmoins les valeurs sont très influencées par le salage hivernal : la valeur moyenne de conductivité s'établit à 191 $\mu\text{s}/\text{cm}$ avant le début du salage, aucune valeur ne dépassant 432 $\mu\text{s}/\text{cm}$; cette valeur moyenne est de 3170 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en période hivernale, avec un maximum supérieur à 17000 $\mu\text{s}/\text{cm}$.
- ◆ La concentration moyenne en matières en suspension est de 71 mg/l et les valeurs sont assez dispersées. La norme européenne de 35 mg/l est dépassée pour 65 % des événements mesurés. Les pics de concentration qui apparaissent peuvent être reliés à l'accroissement du trafic au début des vacances de juillet, au nettoyage du pont et au salage.

La moyenne des concentrations en matières en suspension avant salage (55 mg/l) est significativement inférieure à celle de la période hivernale (100 mg/l). La concentration en insolubles des sels de déneigement peut constituer un apport non négligeable en matières en suspension sur la chaussée.

- ◆ Environ 25 % des valeurs de la demande chimique en oxygène sont supérieurs à la norme européenne de 125 mgO₂/l. Les valeurs sont peu influencées par le salage hivernal et des pics de concentration apparaissent pendant l'été. Des concentrations élevées ont pu être notées pendant la fonte de la neige. Néanmoins, la teneur en chlorure de l'eau analysée dépassant 2 g/l, le dosage de la demande chimique en oxygène n'est pas significatif dans ces conditions.

La teneur moyenne de la demande chimique en oxygène obtenue est de 103 mgO₂/l.

◆ La teneur moyenne en azote Kjeldhal est faible, 2,3 mgN/l. Seule une valeur dépasse la norme européenne de 10 mgN/l, mais environ 19 % des valeurs dépassent la valeur limite de 3 mg/l fixée par le décret 89-3 du 3 janvier 1989 pour la qualité des eaux brutes destinées à la production d'eau de consommation.

◆ La concentration moyenne en hydrocarbures totaux est de 1,2 mg/l.

Les valeurs sont très dispersées et 43 % des événements dépassent la teneur limite de 1 mg/l fixée par le décret 89-3 du 3 janvier 1989 pour la qualité des eaux brutes destinées à la production d'eau de consommation.

◆ La concentration moyenne en hydrocarbures aromatiques polycycliques est inférieure à 100 ng/l. Une seule valeur dépasse le seuil de 200 ng/l fixé par le décret 89-3 du 3 janvier 1989 pour les eaux destinées à la consommation humaine. Toutes les valeurs sont inférieures à 1000 ng/l, seuil fixé par ce décret pour la qualité des eaux brutes destinées à la production d'eau de consommation.

Parmi les hydrocarbures aromatiques polycycliques, le fluoranthène est le plus représenté. Dans une moindre mesure, le Benzo (3,4) fluoranthène et le Benzo (3,4) perylène sont également présents dans les eaux de ruissellement à des concentrations mesurables. Les autres hydrocarbures aromatiques polycycliques ont des teneurs très souvent inférieures aux limites de détection.

◆ Le plomb est principalement présent dans les eaux de ruissellement sous forme particulaire (90,6 %). La concentration moyenne est de 0,058 mg/l et près de 39 % des valeurs sont supérieurs au seuil de 0,050 mg/l fixé pour les eaux destinées à la production d'eau de consommation par le décret 89-3 du 3 janvier 1989.

Comme pour les matières en suspension, la moyenne des valeurs de concentration de la période hivernale (0,087 mg/l) est supérieure à celle de la période sans salage (0,041 mg/l), la fixation du plomb sur les particules en suspension expliquant cette différence de comportement.

◆ La concentration moyenne du cuivre est de 0,045 mg/l, et il se répartit entre les phases particulaire (43,6 %) et dissoute (56,4 %).

Les valeurs sont toutes inférieures au seuil fixé par le décret 89-3 du 3 janvier 1989 (1 mg/l) et la concentration en cuivre total ne semble pas influencée par le salage. Néanmoins, il apparaît que le pourcentage de métal particulaire augmente pendant la période hivernale, passant de 30,1 à 65,5 %.

◆ La concentration moyenne en cadmium (0,001 mg/l) et l'ensemble des valeurs sont inférieures à 0,005 mg/l, valeur seuil fixée par le décret 89-3 du 3 janvier 1989 pour les eaux de consommation. Le cadmium se répartit entre les phases dissoute (53,7 %) et particulaire (46,3 %). Des pics de concentration apparaissent dans la période de salage et la moyenne des concentrations est de 1,45 µg/l au lieu de 0,79 µg/l avant le salage. Les ions chlorures peuvent être à l'origine d'une augmentation de la mobilité du cadmium (Bauske et Goetz, 1993) et de la corrosion des pièces galvanisées. La répartition entre métaux dissous et particulaire n'est pas affectée par le salage.

◆ De même que pour le cadmium, la concentration moyenne en zinc (0,356 mg/l) et l'ensemble des valeurs sont inférieurs au seuil fixé par le décret 89-3 (5 mg/l). Le zinc apparaît principalement sous forme dissoute (60,2 %). Ce pourcentage n'est pas très affecté par le salage, mais la concentration moyenne en zinc total augmente de 0,293 à 0,464 mg/l, peut-être pour les mêmes raisons que celles en cadmium.

◆ Les concentrations en nitrates sont faibles, 5,8 mg/l en moyenne, et sont toujours inférieures à 50 mg/l, valeur limite pour la potabilisation des eaux. Les valeurs apparaissent moins élevées pendant la période hivernale (3,7 mg/l) que dans la période précédente (7 mg/l).

◆ Les teneurs en chlorures sont évidemment très importantes pendant la période de salage, en moyenne 1012 mg/l, et dépassent, pour 66 % des événements de cette période, le seuil de 200 mg/l fixé par le décret 89-3 du 3 janvier 1989 pour les eaux brutes destinées à la production d'eau de consommation. La moyenne générale est de 388 mg/l, mais la teneur moyenne hors période de salage n'est que de 12 milligrammes par litre.

◆ Les concentrations en sulfates augmentent également pendant la période de salage, passant de 31 mg/l à 93 mg/l. La moyenne pour tous les événements est de 54 mg/l, et seule une valeur dépasse le seuil de 250 mg/l fixé par le décret 89-3 du 3 janvier 1989. Les ions sulfates présents pendant la période hivernale sont en partie apportés par les fondants chimiques utilisés sur la route.

◆ La teneur en ions ammonium est peu élevée, 1 mg/l en moyenne, et les concentrations sont généralement inférieures à 4 mg/l, seuil fixé par le décret 89-3 du 3 janvier 1989 pour les eaux brutes destinées à la production d'eau de consommation, sauf pour deux événements.

En conclusion, les concentrations en matières en suspension, demande chimique en oxygène, hydrocarbures totaux et plomb dépassent les valeurs réglementaires fixées pour les rejets de station d'épuration et la potabilisation des eaux.

Les teneurs en chlorure sont également supérieures à ce seuil pendant les périodes de salage.

Les valeurs limites des eaux de rivières exemptes de pollution sont généralement dépassées pour tous les paramètres concernés.

Certains paramètres, notamment la conductivité, les matières en suspension, le plomb, le cadmium, le zinc, les chlorures et les sulfates augmentent pendant la période hivernale et de salage de la route.

Le tableau IV présente les résultats obtenus dans diverses études françaises et étrangères réalisées sur de longues périodes. La comparaison entre ces résultats est difficile en raison de la diversité des sites géographiques et climatiques concernés ainsi que des conditions d'environnement. Néanmoins, les ordres de grandeur des différents paramètres sont comparables et l'influence du trafic n'apparaît pas de façon évidente. Les concentrations en plomb obtenues dans les études récentes effectuées en France sont nettement inférieures à celles atteintes auparavant, ce qui met bien en évidence les effets du développement de l'utilisation des carburants sans plomb et de la baisse de la teneur de cet additif (0,15 g/l au lieu de 0,40 g/l) intervenue depuis 1989.

Évaluation des charges de pollution

Les charges totales de pollution par événement sont calculées en multipliant la concentration moyenne en polluant par le volume écoulé lors de chaque événement.

Certains polluants semblent majoritairement entraînés pendant la période hivernale, à partir du premier salage le 18 novembre 1995. Il s'agit notamment des matières en suspension (70 % de la charge totale analysée), du plomb (73 %), du cadmium (76 %), du zinc (70 %), des chlorures (99 %) et des sulfates (82 %).

Les nitrates apparaissent plutôt entraînés pendant la période précédant le salage, 37 % de la charge étant entraînés pendant la période hivernale. Pendant cette période, la hauteur des précipitations représente 48 % des précipitations totales analysées et environ 56 % du volume total écoulé ; le coefficient de ruissellement moyen est de 0,95 au lieu de 0,64 dans la période précédente. Cet effet saisonnier peut s'expliquer, d'une part, par l'augmentation du ruissellement qui favorise l'entraînement des matières en suspension et des polluants qui leur sont associés (plomb en particulier) et, d'autre part, par l'action des sels de déneigement, à base de chlorure de sodium, qui peuvent favoriser la mobilité des métaux lourds, notamment du zinc et du cadmium, et constituer un apport non négligeable en sulfates, en métaux (plomb, cadmium) et en matières en suspension sous forme d'insolubles.

TABLEAU IV
Comparaison des concentrations en polluants dans les eaux de ruissellement de chaussées

Paramètre	France					Allemagne		États-Unis
	A1	A4	A61	A9	A10	A81	A6	
Trafic moyen journalier annuel (véh/j)	13 600	5 400	7 000	20 500	20 000	41 000	47 000	< 30 000
Pluie étudiée (mm)	375	789	678	687	54	520	297	-
MES (mg/l)	189	182	65	52	61	137	181	41
DCO (mgO ₂ /l)	79	208	60	63	64	107	118	49
NTK (mgN/l)	-	-	-	0,9	1,4	-	-	0,9
Hc (mg/l)	-	2,2	0,3	7,8	3,2	7	5,5	-
Pb (μg/l)	270	180	240	-	2	202	245	80
Cu (μg/l)	-	-	-	-	16	97	117	22
Cd (μg/l)	-	-	-	-	0,1	5,9	5,9	-
Zn (μg/l)	550	850	390	310	190	360	620	80
Référence	(1)	(2)	(2)	(3)	(4)	(5)	(5)	(6)

(1) Cathelain et al. (1981) - (2) Baladès et al. (1985) - (3) Montrejaud-Vignoles et al. (1996) - (4) Grange et al. (1995) - (5) Stotz (1987) - (6) FHWA (1990).

MES : matières en suspension - DCO : demande chimique en oxygène - NTK : azote Kjeldhal - Hc : hydrocarbures totaux - Pb : plomb - Cu : cuivre - Cd : cadmium - Zn : zinc.

TABLEAU V
Charges de pollution apportées par cinq événements

Événement	Hauteur (mm)	Intensité maximale 6 min (mm/h)	Durée temps sec (j)	Charge totale mesurée (%)			
				MES	DCO	Pb	Zn
16 décembre 1995 (neige)	16	6	11,5	9	6,9	11,8	8,3
22 décembre 1995	28	12	0,5	7,6	4,7	7,4	5,3
30 décembre 1995	35	10	5,2	4,2	3,1	3,8	3,6
6 février 1996 (neige)	56	4	13,5	4,1	15,4	3,1	19
24 février 1996	44	24	1,2	6,8	10,4	6,6	5,8

MES : matières en suspension - DCO : demande chimique en oxygène - Pb : plomb - Zn : zinc.

TABLEAU VI
Matrice de corrélation entre les charges de pollution

	MES	DCO	NTK	Hc	Pb _{TOTAL}	Cu _{TOTAL}	Cd _{TOTAL}	Zn _{TOTAL}	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	
MES	1												
DCO	0,686	1											
NTK	0,366	0,407	1										
Hc	0,370	0,289	0,504	1									
Pb _{TOTAL}	0,924	0,720	0,372	0,286	1								
Cu _{TOTAL}	0,751	0,743	0,428	0,446	0,719	1							
Cd _{TOTAL}	0,151	0,577	0,079	0,023	0,176	0,286	1						
Zn _{TOTAL}	0,339	0,779	0,440	0,109	0,325	0,356	0,149	1					
Cl ⁻	0,095	0,578	0,184	0,005	0,081	0,084	0,058	0,859	1				
SO ₄ ²⁻	0,227	0,735	0,334	0,005	0,221	0,257	0,168	0,956	0,908	1			
NO ₃ ⁻	0,106	0,100	0,537	0,557	0,058	0,124	0,006	0,102	0,022	0,042	1		
NH ₄ ⁺	0,131	0,178	0,775	0,503	0,109	0,213	0,042	0,293	0,130	0,198	0,832	1	

En ce qui concerne les métaux lourds, il apparaît également que le plomb est majoritairement associé aux matières en suspension (95 % de la charge totale analysée) ainsi que, dans une moindre mesure, le cuivre (55 %) et le cadmium (61,5 %), le zinc étant, à l'opposé, principalement présent à l'état soluble (62 % de la charge totale analysée).

Certains événements apportent des charges de pollution particulièrement élevées. Les caractéristiques de cinq de ces événements sont présentées dans le tableau V.

Deux épisodes hivernaux (16 décembre 1995 et 6 février 1996) accompagnés de chutes de neige peuvent entraîner une charge de pollution représentant 13,1 % des matières en suspension, 22,3 % de la demande chimique en oxygène, 14,9 % de plomb et 24,3 % de zinc, pour 6,5 % de la pluviométrie et 8,4 % du volume écoulé total.

De même, trois épisodes pluviaux importants (22 décembre 1995, 30 décembre 1995 et 24 février 1996), représentant 19,6 % de la pluviométrie et 22,6 % du volume écoulé, peuvent entraîner 18,6 % des matières en suspension, 18,2 % de la demande chimique en oxygène, 17,8 % de plomb et 14,7 de zinc.

Le tableau VI présente la matrice de corrélation entre les charges de pollution mesurées lors des différents événements. Le plomb et le cuivre total sont assez bien corrélés et peuvent avoir une origine commune, liée au trafic (émission des véhicules et corrosion ou abrasion de certaines parties des véhicules). Ils apparaissent également corrélés aux matières en suspension, notamment pour le plomb. Le plomb est, en effet, principalement pré-

sent sous forme particulaire dans les eaux de ruissellement. Les matières en suspension et la demande chimique en oxygène sont bien corrélées, bien que les matières en suspension soient principalement de nature minérale. Il semble que l'entraînement de ces charges polluantes s'effectue dans des conditions similaires. Un autre ensemble de paramètres bien corrélés concerne la demande chimique en oxygène, les chlorures, les sulfates et les métaux totaux. Les chlorures et les sulfates peuvent, en effet, avoir une origine commune liée au salage hivernal ; la présence de chlorures peut également accélérer la corrosion des éléments galvanisés et favoriser la mobilité des métaux lourds ; la liaison des métaux avec les matières organiques est également possible dans les eaux de ruissellement. Les formes azotées, ammonium, nitrates et azote total sont également bien corrélées entre elles.

Enfin, les hydrocarbures totaux sont peu corrélés aux matières en suspension.

Le tableau VII présente les valeurs des coefficients de régression (R^2) entre les charges de pollution mesurées et les paramètres suivants :

- hauteur de pluie totale (HT), en millimètres,
- volume écoulé (VE), en mètres cubes,
- durée de temps sec ayant précédé l'événement (TS), en jours,
- durée totale de l'événement (DT), en heures,
- intensité moyenne de la pluie (IMOY), en millimètres par heure,
- intensité maximale de la pluie sur 6 min (IMAX), en millimètres par heure,
- débit maximal (DMAX), en litres par seconde,
- trafic total pendant la période de temps sec et durant l'événement (TTOT), en nombre de véhicules.

TABLEAU VII
Relations entre les charges de pollution, les paramètres hydrologiques et le trafic

Paramètre	HT (mm)	VE (m ³)	TS (j)	DT (h)	IMOY (mm/h)	IMAX (mm/h)	DMAX (l/s)	TTOT (véh)
MES	0,332	0,436	0,025	0,029	0,001	0,025	0,182	0,021
DCO	0,636	0,744	0,020	0,038	0,002	0,133	0,231	0,013
NTK	0,472	0,438	0,036	0,046	0,001	0,003	0,040	0,060
Hc	0,221	0,211	0,009	0,005	0,011	0,002	0,034	0,001
Pb_{TOTAL}	0,314	0,461	0,020	0,033	0,000	0,018	0,188	0,017
Cu_{TOTAL}	0,580	0,687	0,028	0,047	0,014	0,036	0,261	0,023
Cd_{TOTAL}	0,427	0,512	0,008	0,008	0,009	0,090	0,071	0,013
Zn_{TOTAL}	0,247	0,305	0,014	0,038	0,004	0,001	0,045	0,016
NO₃⁻	0,146	0,078	0,028	0,001	0,004	0,004	0,000	0,060
SO₄²⁻	0,218	0,275	0,038	0,038	0,010	0,002	0,025	0,023
NH₄⁺	0,278	0,193	0,071	0,009	0,001	0,001	0,001	0,112
Pb_{Soluble}	0,227	0,238	0,003	0,037	0,012	0,047	0,175	0,001
Cu_{Soluble}	0,587	0,555	0,002	0,056	0,001	0,064	0,176	0,007
Cd_{Soluble}	0,298	0,373	0,003	0,028	0,002	0,003	0,005	0,003
Zn_{Soluble}	0,135	0,162	0,032	0,022	0,007	0,004	0,014	0,031

Il apparaît que les charges de pollution sont généralement assez bien reliées à la hauteur des précipitations et au volume ruisselé, paramètres qui sont par ailleurs bien corrélés entre eux ($R^2 = 0.95$). Le débit maximal est également un facteur explicatif de moindre importance pour les matières en suspension, la demande chimique en oxygène, le plomb et le cuivre. Les autres paramètres, et en particulier le trafic et la durée de temps sec précédant l'événement, ne sont pas corrélés avec les charges de pollution.

La dispersion de la pollution émise par le trafic routier est un phénomène complexe et il a été montré qu'une faible partie de cette pollution, notamment pour les métaux lourds et les hydrocarbures aromatiques polycycliques, est évacuée dans les eaux de ruissellement (DWW, 1995 ; Hewitt et Rashed, 1990), le reste se déposant sur les accotements ou pouvant être entraîné sur de plus longues distances.

Des prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un échantillonneur permettant de réaliser des pollutogrammes. La figure 4 représente la superposition pour vingt-quatre événements des courbes d'évolution de la charge polluante en matières en suspension, en fonction du volume écoulé lors de chaque événement.

Pour la plupart des événements, entre 35 et 65 % de la charge en matières en suspension sont entraînés par 30 % du volume ruisselé, et entre 65 et 90 % de cette charge sont entraînés par 60 % du volume ruisselé. Il apparaît donc qu'un effet de premier flot peut être constaté lors de certains événements, mais que ce phénomène est peu accentué.

En ce qui concerne la demande chimique en oxygène, entre 30 et 55 % de la charge sont entraînés par 30 % du volume ruisselé, et entre

55 et 85 % sont entraînés par 60 % du volume ruisselé. L'effet de premier flot apparaît moins marqué pour la demande chimique en oxygène que pour les matières en suspension.

Dans la perspective du traitement des eaux de ruissellement, la seule prise en compte du premier flot ne semble donc pas suffisante pour obtenir un abattement satisfaisant de la charge polluante (Saget et al., 1996).

Enfin, la charge totale de pollution transportée pendant la période de mesure est obtenue en faisant la somme des charges mesurées pour chaque événement. Connaissant la hauteur de pluie précipitée pendant cette période (de 490 à 546 mm suivant les paramètres), on peut calculer la charge de pollution entraînée par hectare et par millimètre de pluie.

La hauteur totale de pluie précipitée pendant un an, de mars 1995 à février 1996 est de 739 mm. Pendant la période de mesure, environ 90 % de la pluie a donné lieu à ruissellement ; on peut donc considérer que la pluie ayant donné lieu à ruissellement sur l'année est de 665 mm. Le tableau VIII donne une estimation de la charge annuelle de pollution par hectare basée sur cette hauteur de pluie.

Le tableau IX présente la comparaison des charges annuelles de pollution par hectare imperméabilisé issues de différentes études françaises et étrangères, ainsi que les valeurs proposées par le SETRA pour 1 km de chaussée (à deux voies et bande d'arrêt d'urgence, soit 1 ha) et pour un trafic de 10 000 véhicules par jour.

Les données mesurées sur les différents sites sont généralement cohérentes. Les charges en chlorures et sulfates sont dépendantes de l'importance du salage hivernal de la chaussée.

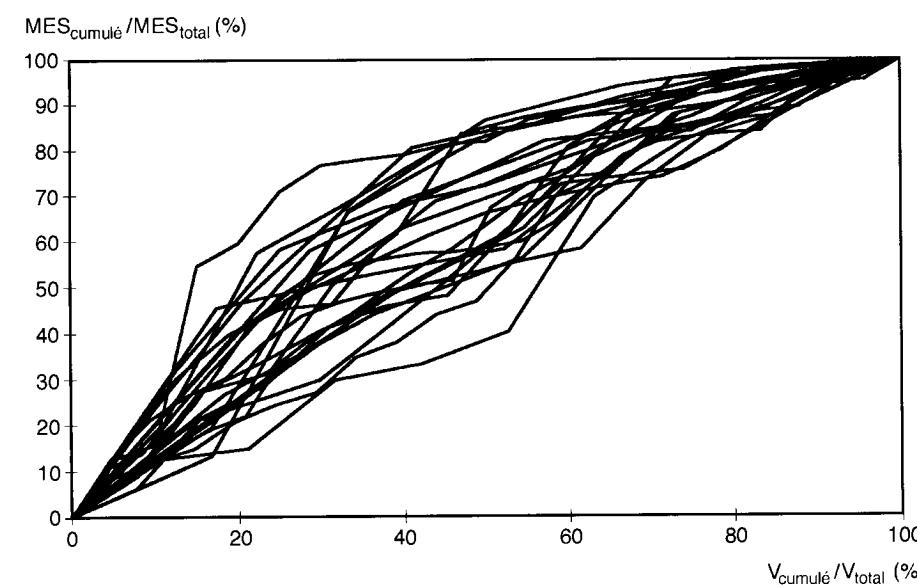


Fig. 4 - Évolution de la charge en matières en suspension (MES) en fonction du volume ruisselé.

TABLEAU VIII
Charges cumulées et estimation des charges annuelles par hectare des eaux de ruissellement

Paramètre	Unité	Charge soluble mesurée par hectare	Charge totale mesurée par hectare	Charge par millimètre de pluie totale mesurée	Charge annuelle totale estimée par hectare
MES	kg	-	305	0,558	371
DCO	kg O ₂	-	309	0,721	420
NTK	kg N	-	7,87	0,015	10,2
Plomb	g	13,7	253	0,464	308
Cuivre	g	71,8	161	0,295	196
Cadmium	g	1,94	5,03	0,009	6,12
Zinc	g	878	1 426	2,610	1 736
Nitrate	kg	19,6	19,6	0,036	23,9
Chlorure	kg	2 197	2 197	4,031	2 681
Sulfate	kg	261	261	0,479	318
Ammonium	kg	3,91	3,91	0,007	4,80
Hydrocarbures	kg	-	4,57	0,009	5,82

TABLEAU IX
Comparaison des charges annuelles de pollution (en kg/ha)

Paramètre	France					Allemagne	
	A1	A4	A61	A9	SETRA	A81	A6
Trafic moyen journalier annuel (véh/j)	13 600	5 400	7 000	20 500	10 000	41 000	47 000
Pluie étudiée (mm)	375	789	678	687	-	520	297
MES	764	399	199	162	200-1 200	873	848
DCO	289	392	231	201	230-400	672	557
NTK	-	-	-	3	-	-	-
Hc	-	-	-	27	1,7-5	43,3	27,1
Plomb	1,200	0,430	0,860	0,140	0,900-1,300	1,332	1,155
Cuivre	-	-	-	-	-	0,621	0,544
Cadmium	-	-	-	-	-	0,037	0,029
Zinc	2,300	1,230	1,480	1,391	1,500-2,500	2,329	2,892
Nitrate	-	-	-	12,4	40	-	-
Chlorure	-	-	-	-	637	1 011	777
Sulfate	-	-	-	-	174	-	-
Ammonium	-	-	-	1,4	32	4,6	3,22
Référence	(1)	(2)	(2)	(3)	(4)	(5)	(5)

(1) Cathelain et al. (1981) - (2) Baladès et al. (1985) - (3) Montrejaud-Vignoles et al. (1996) - (4) SETRA (1993) - (5) Stotz (1987).

Les différentes formes de l'azote (azote Kjeldahl, nitrate et ammonium) peuvent être influencées par l'environnement, notamment l'importance des cultures au voisinage de la chaussée, susceptible d'apporter des débris végétaux ou des particules d'engrais transportées par le vent.

Par rapport aux données du SETRA, les valeurs obtenues sur les autoroutes A9 et A11 mettent en évidence une baisse importante de la charge en plomb liée à l'utilisation croissante de carburants sans plomb, et la présence d'une charge élevée en hydrocarbures.

La relation entre les charges de pollution et le trafic n'apparaît pas évidente, d'autres facteurs

pouvant intervenir, notamment le climat (pluviométrie et vent), les caractéristiques du bassin versant, les matériaux utilisés et le type des véhicules (poids lourds, type de carburant utilisé).

Résultats des analyses de sédiments

Parallèlement au suivi de la qualité des eaux de ruissellement, des analyses ont été effectuées sur les sédiments déposés dans le canal de mesure de débit et prélevés à la fin des épisodes pluvieux. Quarante-quatre échantillons ont été ainsi recueillis et analysés.

Les sédiments ont généralement une structure assez grossière, contenant en moyenne plus de

79 % de particules supérieures à 200 µm. Les sédiments sont de nature sableuse, la fraction comprise entre 50 et 2 000 µm représentant 78,8 % des échantillons.

Les matières en suspension des eaux de ruissellement ont une granulométrie beaucoup plus fine que les sédiments, généralement inférieure à 500 µm, la fraction inférieure à 200 µm représentant 82,4 % des échantillons.

L'échantillonnage automatique ne prend donc pas en compte la totalité des matériaux transportés par les eaux de ruissellement. Les particules grossières et une fraction importante des sables peuvent, en effet, se déposer sur le fond des réseaux de collecte et être transportées par charriage (Artières, 1987), notamment les particules de taille supérieure à 200 micromètres.

Le tableau X présente la synthèse des analyses de sédiments. Toutes les analyses ont été effectuées sur la fraction inférieure à 2 mm des échantillons de sédiment afin d'obtenir des prises d'essai homogènes.

- ◆ Les sédiments sont principalement de nature minérale, plus de 95 %, le taux de matières volatiles moyen étant de 4,6 %.
- ◆ Les concentrations en hydrocarbures sont assez élevées, 865 mg/kg en moyenne. Les concentrations mesurées dans des sédiments de rivière ou de sols agricoles sont généralement comprises entre 27 et 55 mg/kg, selon des études antérieures réalisées par le LCPC. La contamination par les hydrocarbures est donc assez importante, comprise entre 254 et 1 916 mg/kg suivant les échantillons.
- ◆ La teneur moyenne en plomb est de 314 mg/kg. Toutes les valeurs sont supérieures à la limite admissible pour les sols agricoles fixée, par la norme **NF U 44-041** à 100 mg/kg. Un pic de concentration apparaît lors de la période de chute de neige et de salage important.
- ◆ La pollution par le cuivre est moins importante que celle par le plomb : seuls six prélèvements dépassent la valeur seuil de 100 mg/kg fixée par la norme **NF U 44-041** pour les sols, la teneur moyenne étant de 59 milligrammes par kilogramme.

◆ La teneur moyenne en cadmium est peu élevée (0,50 mg/kg) et aucune valeur ne dépasse 2 mg/kg, valeur seuil pour les sols agricoles. Un pic important de concentration apparaît lors d'un événement (1,7 mg/kg, les valeurs variant généralement entre 0,3 et 0,6 mg/kg) qui suit une opération de salage. Néanmoins, ce phénomène ne se reproduit pas lors des salages suivants.

◆ les concentrations en zinc sont assez élevées, 465 mg/kg en moyenne, et vingt-huit valeurs (65 % des cas) dépassent le seuil fixé par la norme **NF U 44-041** de 300 mg/kg pour les sols. Un pic de concentration est concomitant avec celui noté pour le cadmium lors de deux événements et les valeurs de concentration s'élèvent jusqu'à 3 510 mg/kg, la valeur médiane étant de 339 milligrammes par kilogramme.

Il apparaît donc que les sédiments sont pollués par les hydrocarbures, le plomb et le zinc. Des pics de concentration peuvent apparaître pour les métaux lourds mais, si les valeurs seuil fixées pour les sols agricoles par la norme **NF U 44-041** sont parfois dépassées, les valeurs seuils concernant les teneurs maximales admissibles pour les boues ne sont jamais atteintes (1 600 mg/kg pour le plomb, 2 000 mg/kg pour le cuivre, 40 mg/kg pour le cadmium et 6 000 mg/kg pour le zinc).

Le tableau XI présente des valeurs de concentrations en métaux lourds dans des poussières et des sédiments d'origines urbaine et routière (Legret et al., 1995), issues de diverses études françaises et étrangères.

Les teneurs mesurées dans les sédiments sont comparables à ces valeurs, qui correspondent à des matériaux assez fortement pollués.

Les différences observées entre ces valeurs peuvent être dues à la nature des matériaux analysés, notamment à la granulométrie et aux teneurs en matières volatiles. Les concentrations en plomb des poussières et des sédiments autoroutiers peuvent être influencées par l'utilisation de l'essence sans plomb ou du diesel et par l'importance du trafic, tout comme celles en cadmium ou en zinc peuvent l'être par l'utilisation de matériaux comme l'acier galvanisé en milieu autoroutier.

TABLEAU X
Synthèse des résultats des analyses de sédiments

Caractéristiques	Matières volatiles (%)	Hydrocarbures (mg/kg)	Plomb (mg/kg)	Cuivre (mg/kg)	Cadmium (mg/kg)	Zinc (mg/kg)
Nombre d'événements	43	40	43	43	43	43
Moyenne	4,6	865	314	59	0,50	465
Médiane	3,5	814	307	47	0,44	339
Gamme	1,1-13,6	254-1 916	173-541	21-259	0,25-1,7	111-3 510
Écart-type	3	426	71	45	0,23	524

TABLEAU XI
Concentrations en métaux lourds dans des poussières et des sédiments d'origines urbaine et routière

Échantillon	Plomb	Cuivre	Cadmium	Zinc
Poussières urbaines et autoroutes	660-2 540	71-312	2,68-4,91	260-539
Poussières autoroutes	2 346	237	3,1	527
Sédiments de bassins de retenue urbains	130-1 400	7,7-39	non déterminé	non déterminé
Sédiments de bassins de retenue autoroutiers	30-1 025	4-73	1-28	22-538
Sédiments eaux de ruissellement autoroutes	460-3 660	non déterminé	4-24	203-2 195
Matières en suspension eaux de ruissellement urbaines	702	470	6,7	1 926
Sédiments bassin de décantation autoroutes	282-819	84-208	1,17-3,73	683-1 980

Un fractionnement granulométrique a été réalisé sur un prélèvement de sédiment afin d'étudier la répartition des polluants selon la taille des particules.

Les teneurs en métaux lourds augmentent lorsque la taille des particules diminue, tout particulièrement pour les matériaux de taille inférieure à 125 µm. La fraction inférieure à 80 µm est la plus contaminée par les métaux lourds, le taux de matières volatiles étant également très élevé dans cette fraction (21,7 %).

Les métaux sont plus facilement fixés sur les particules fines ayant une surface spécifique plus importante et une teneur en matières organiques importante, susceptibles de les retenir par des phénomènes d'adsorption et de complexation.

Les hydrocarbures présentent un comportement plus complexe ; ils se fixent notamment sur les particules grossières, dans la fraction 2 000-5 000 µm ainsi que dans la fraction fine inférieure à 80 micromètres.

La fraction inférieure à 80 µm, qui représente moins de 8 % du sédiment, peut contenir environ 53% du zinc, 58 % du cadmium, 48 % du cuivre, 38 % du plomb et 37 % des hydrocarbures.

Plus de 50 % des métaux lourds et près de 40 % des hydrocarbures sont contenus dans la fraction inférieure à 250 µm, qui représente 18 % seulement du sédiment. Les analyses chimiques ont été effectuées sur la fraction inférieure à 2 mm pour obtenir une représentativité correcte des échantillons. Cette fraction représente en moyenne 89 % des échantillons tamisés à 5 millimètres.

Les charges de pollution contenue dans les sédiments ont donc été calculées pour cette fraction.

Les corrélations entre les charges de pollution sont peu significatives, sauf entre le zinc et le cadmium ($R^2 = 0,72$).

Par ailleurs, la quantité de sédiment est également faiblement reliée à la charge en matières en suspension des eaux de ruissellement ($R^2 = 0,30$), ces deux matériaux ayant probablement un comportement différent lors des événements pluvieux : les grosses particules présentes dans les sédiments peuvent s'accumuler dans le réseau de collecte puis être évacuées lors d'un événement plus important.

La charge annuelle de pollution par hectare a été estimée pour une hauteur totale de 665 mm de pluie donnant lieu à ruissellement à partir du cumul des charges par événement mesurées et qui correspondent à une hauteur de 575 millimètres :

- masse totale de sédiment : 884 kg/ha,
- plomb : 248 g/ha,
- cuivre : 44 g/ha,
- cadmium : 0,32 g/ha,
- zinc : 277 g/ha,
- hydrocarbures : 595 g/ha.

La prise en compte des charges de pollution contenues dans les sédiments peut donc modifier de façon importante l'estimation des charges de pollution obtenue dans les eaux de ruissellement, notamment en ce qui concerne les matières en suspension et le plomb.

Conclusion

La charge annuelle de pollution chronique transportée dans les eaux de ruissellement sur une chaussée autoroutière a été estimée à partir d'une campagne de mesure de longue durée. Les eaux véhiculent des quantités importantes de matières en suspension, de demande chimique en oxygène, d'hydrocarbures et de métaux lourds, notamment du plomb et du zinc. La comparaison avec les données antérieures met, néanmoins, en évidence une diminution notable de la charge en plomb due à la

diminution de l'utilisation des carburants contenant cet additif et à la baisse de sa teneur dans l'essence. Pour certains paramètres, notamment les chlorures, les sulfates, les matières en suspension, et les métaux lourds, cette pollution apparaît plus importante pendant la période d'utilisation des sels de déneigement. La charge de pollution semble généralement être apportée tout au long des épisodes pluvieux, sans effet de premier flot très accentué.

Deux épisodes pluvieux peuvent entraîner plus de 13 % de la charge totale mesurée des matières en suspension, 22 % de la demande chimique en oxygène, 15 % du plomb et 27 % du zinc.

Enfin, il n'apparaît pas de corrélation significative entre les charges de pollution mesurées par événement, les paramètres hydrologiques et le trafic, mis à part avec le volume écoulé ou la hauteur totale de pluie précipitée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR (1994a), *Recueil de normes françaises, Qualité de l'eau*, Édition AFNOR, Paris, 862 pages.
- AFNOR (1994b), *Recueil de normes françaises, Qualité des sols*, Édition AFNOR, Paris, 250 pages.
- ARTIERES O. (1987), *Les dépôts en réseau d'assainissement unitaire*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 214 pages.
- BALADÈS J.-D., CATHELAIN M., MARCHANDISE P., PEYBERNARD J., PILLOY J.-C. (1985), Pollution chronique des eaux de ruissellement d'autoroutes interurbaines, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **140**, nov.-déc., pp. 93-100.
- BAUSKE B., GOETZ D. (1993), Effects of de-icing-salts on heavy metal mobility, *Acta Hydrochimica Hydrobiologia*, **21**, pp. 38-42.
- CATHELAIN M., FRIANT G., OLIE J.-L. (1981), Les eaux de ruissellement de chaussées autoroutières : évaluation des charges de pollution, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **116**, nov.-déc., pp. 9-24.
- DWW (1995), *Microcontamination along highway : an evaluation*. Rapport DWW, **95-735**, Ministère des Transports, Delft (Pays-Bas), 40 p. + annexes.
- FHWA (1990), *Federal Highway Administration, in Evaluation de l'impact des routes sur l'Environnement*, Rapport OCDE 1994, Édition OCDE, Paris, 194 pages.
- GRANGE D., ROLLIN C., AIRES N., TABUCHI J.-P. (1995), *Étude comparative de l'impact sur la qualité des eaux et l'hydraulique des ruissellements en provenance de chaussées classiques et d'enrobés drainants*, Proc. Conf. NOVATECH 95, Lyon, pp. 369-376.
- HEWITT L.N., RASHED M.B. (1990), An integrated budget for selected pollutants for a major rural highway, *Sci. Total. Environ.*, **93**, pp. 375-384.
- LEGRET M., LE MARC C., DEMARE D., COLANDINI V. (1995), Pollution par les métaux lourds dans un bassin de décantation recevant des eaux de ruissellement d'origine routière, *Environ. Technol.*, **16**, pp. 1049-1060.
- MONTREJAUD-VIGNOLES M., ROGER S., HERREMANS L. (1996), *Runoff water pollution of motorway pavement in mediterranean area*, Proc. 7th Intern. Conf. Urban Storm Drainage, Hannover, Germany, pp. 247-252.
- SAGET A., CHEBBO G., BERTRAND-KRAJEWSKI J.L. (1996), The first flush in sewer systems, *Wat. Sci. Tech.*, **33**, pp. 101-108.
- SETRA (1987), *Routes et pollution des eaux*, Note d'information, **B 87/6**, Édition SETRA, Bagneux, 4 pages.
- SETRA (1993), *L'eau et la Route, vol. 2, B 9348-2*, Édition SETRA, Bagneux, 48 pages.
- STOTZ G. (1987), Investigations of the properties of the surface water run-off from Federal Highways in the FRG, *Sci. Tot. Environ.*, **59**, pp. 329-337.

Remerciements. Cette étude a été réalisée avec le soutien du SETRA. Les auteurs remercient, pour leur collaboration, la société Cofiroute et M. G. Lafage du CETE de l'Ouest.

ABSTRACT

Pollution of surface water from motorway pavements : the A11 motorway near Nantes

M. LEGRET - C. LE MARC - D. DEMARE

The quality of surface water on a 275 m section of motorway was monitored for one year by sampling approximately fifty rainfall events. Particulate matter, chemical oxygen demand, total hydrocarbons and lead all indicated chronic pollution.

Analysis of pollutant histograms showed that the initial flow phenomenon was not very marked. Annual pollutant loads were deduced and were comparable to previous levels, except for lead which had fallen considerably because of the reduction in lead levels in fuel.

Seasonal chloride, sulphate, particulate matter and heavy metal pollution was shown to occur as a result winter use of de-icing salts.

The authors have attempted to find correlations between pollutant loads washed off by rainfall events, hydrological parameters and traffic density. In most cases no significant links could be found from the data as a result of the complexity of accumulation and flow mechanisms.