

Pollution agricole

179

BI056

Consultation sur le développement durable
de la production porcine au Québec

6211-12-007

G. Gangbazo¹ et F. Babin²

Pollution de l'eau des rivières dans les bassins versants agricoles

River water pollution in agricultural watersheds

Résumé

Le but de cette étude est de comparer la pollution de l'eau des rivières des bassins agricoles à celle des rivières des bassins forestiers du Québec (Canada), et d'évaluer la contribution des activités agricoles à la pollution de certaines rivières des bassins agricoles. Dans une première étape, les concentrations et les flux de matières en suspension (MES), d'azote total (NT), d'azote ammoniacal (N-NH₃), de nitrates (N-NO₃), de phosphore dissous (PS), de phosphore particulaire (PP), et de phosphore total (PT) de 16 rivières en milieu agricole ont été comparés à ceux de 30 rivières en milieu forestier. Dans une deuxième étape, un bilan des flux d'azote total et de phosphore total a été effectué pour l'année 1995 et ce, pour 9 des 16 rivières en milieu agricole. Les concentrations médianes sont plus élevées dans les bassins agricoles que dans les bassins forestiers (MES : 4,6 fois; NT : 5 fois; N-NH₃ : 5,3 fois; N-NO₃ : 7 fois; PS : 8,2 fois; PP : 3,9 fois; PT : 6,6 fois). Les flux annuels sont aussi plus élevés dans les bassins agricoles (MES : 2,2 fois; NT : 3,8 fois; N-NH₃ : 7 fois; N-NO₃ : 4 fois; PS : 5 fois; PP : 3,3 fois; PT : 3,5 fois). La pollution diffuse agricole contribue à 70 à 90 % des flux annuels d'azote total et à 60 à 85 % des flux annuels de phosphore total dans les rivières en milieu agricole. Ces données confirment que les activités agricoles ont un grand impact sur la qualité de l'eau des rivières et représentent la plus grande source de pollution de l'eau par les substances nutritives dans les bassins agricoles à l'étude.

MOTS-CLÉS: pollution diffuse agricole, qualité de l'eau, azote, phosphore, matières en suspension, bilan.

Introduction

Les activités agricoles peuvent altérer la qualité des eaux de surface (Kronvang *et al.*, 1993; Belic et Belic, 1996). Au Danemark par exemple, les flux annuels d'azote total sont 10 fois plus élevés dans les bassins agricoles (médiane de 23,4 kg N/ha.an) que dans les bassins forestiers (médiane de 2,2 kg N/ha.an). Par ailleurs, les flux annuels de phosphore total sont 3,5 fois plus élevés dans les bassins agricoles (médiane de 0,29 kg P/ha.an) que dans les bassins forestiers (médiane de 0,07 kg P/ha.an); (Kronvang *et al.*, 1996).

Le gouvernement du Québec s'est attaqué à la pollution de l'eau des rivières dès la fin des années 70. Comme dans d'autres pays industrialisés, la priorité avait été accordée à la pollution urbaine

Abstract

The objective of this study is to compare water pollution in rivers of agricultural vs forested watersheds in Quebec (Canada), and to assess the contribution of agricultural activities to pollution loads in rivers of agricultural watersheds. In a first step, concentrations and fluxes of suspended solids (SS), total nitrogen (TN), ammonia (NH₃-N), nitrate (NO₃-N), dissolved phosphorus (DP), particulate phosphorus (PP), and total phosphorus (TP) in 16 rivers of agricultural watersheds were compared to those in 30 rivers of forested watersheds. In a second step, a mass balance for total nitrogen and total phosphorus was computed for 1995 in 9 of the 16 rivers of agricultural watersheds. Median concentrations are higher in agricultural than in forested watersheds (SS : 4.6-fold; TN : 5-fold; NH₃-N : 5.3-fold; NO₃-N : 7-fold; DP : 8.2-fold; PP : 3.9-fold; TP : 6.6-fold). Annual fluxes are also higher in agricultural watersheds (SS : 2.2-fold; TN : 3.8-fold; NH₃-N : 7-fold; NO₃-N : 4-fold; DP : 5-fold; PP : 3.3-fold; TP : 3.5-fold). Agricultural non-point pollution contributes to 70 to 90 % of total N annual fluxes, and to 60 to 85 % of total P annual fluxes in rivers of agricultural watersheds. These data confirm that agricultural activities have a great impact on river water quality, and constitute the major source of nutrient pollution in agricultural watersheds under study.

KEY WORDS: agricultural non-point pollution, river water quality, nitrogen, phosphorus, suspended

et industrielle parce que les techniques d'assainissement étaient bien connues. Mais, la pollution agricole n'a pas été négligée pour autant. On a mis en œuvre un certain nombre de politiques et programmes (mesures réglementaires, mesures économiques, information et assistance technique). Tous les résultats souhaités n'ont cependant pas encore été atteints (Painchaud, 1997; Gangbazo et Painchaud, 1998). Le phénomène de la pollution diffuse agricole est compliqué par l'effet cumulatif amont-aval des apports, par le stockage des contaminants dans la phase terrestre et donc, par les délais importants à la fois dans l'apparition des problèmes et leur résolution.

Au moment où l'assainissement des eaux usées de la plupart des municipalités est en voie d'être terminé, la nécessité de contrôler la pollution diffuse agricole pour récupérer l'ensemble des usages

¹ Ing., ministère de l'Environnement, Direction des écosystèmes aquatiques, Édifice Marie-Guyart, 7^e étage (B-22), 675 boul. René-Lévesque Est, Québec (Québec), Canada, G1R 5V7.

Téléphone: (418) 521-3820, poste 4718; Courriel : georges.gangbazo@mef.gouv.qc.ca

² Étudiante, Institut supérieur européen des métiers de l'environnement, route de la Châtaigneraie, Pissotte, 85200 Fontenay-Le-Comte, France.

de l'eau est de plus en plus évidente. Le but de cette étude est de comparer la pollution de l'eau des rivières en milieu agricole à celle des rivières en milieu forestier, et d'évaluer la contribution des activités agricoles à la pollution de certaines rivières en milieu agricole.

Méthodologie

Description des bassins versants

Quarante-six rivières (16 en milieu agricole et 30 en milieu forestier) suivies par la Direction des écosystèmes aquatiques (ministère de l'Environnement) entre 1989 et 1995 ont été retenues pour cette étude (Tableau 1; Figure 1). On peut constater que les bassins versants des rivières varient beaucoup tant par leur superficie que par l'utilisation du territoire, et qu'ils couvrent diverses régions physiographiques.

La superficie des bassins agricoles (médiane de 480 km²) est 2,5 fois plus faible ($P < 0,05$) que celle des bassins forestiers (médiane de 1180 km²) (Tableau 2). Les valeurs médianes des autres caractéristiques de l'utilisation du territoire agricole (superficie

cultivable, proportion des différents types de culture, densité animale, etc.) sont toutes plus élevées dans les bassins agricoles que dans les bassins forestiers ($P < 0,05$). Par contre, il n'y a pas de différence entre les médianes de la superficie en forêt, la population dont les eaux usées sont raccordées à un réseau d'égouts et la population dont les eaux usées sont traitées ($P > 0,05$).

Échantillonnage et analyse physico-chimique de l'eau

Les rivières ont été échantillonnées à longueur d'année à raison de deux fois par mois avant 1991 et d'une fois par mois après 1991. Les échantillons étaient prélevés généralement à un pont-route, puis envoyés au Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (laboratoire du ministère de l'Environnement), généralement dans un délai de 24h. Tous les échantillons ont été filtrés sur filtres de fibre de verre de porosité 1,2 µm (WhatmanTM, GF/C, 47 mm). Les paramètres suivants ont été déterminés selon des méthodes standardisées (voir Laflamme, 1995) : les nitrites et les nitrates (représentés ici par N-NO₃), l'azote total dissous (NT), l'azote ammoniacal (N-NH₃), le phosphore total dissous (PS), le phosphore particulaire (PP), et les

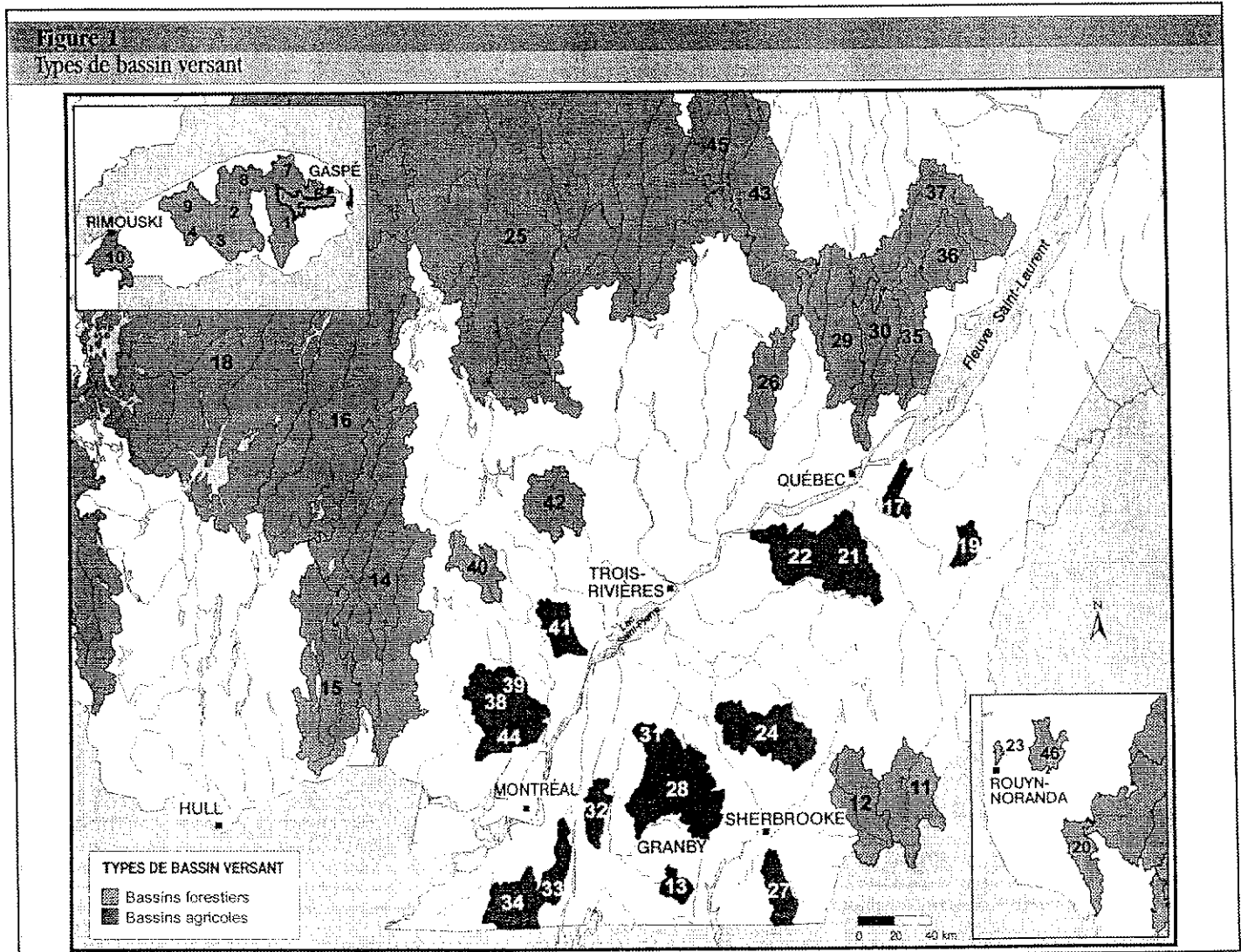


Tableau 1
Utilisation du territoire drainé par chaque rivière

Période	Station			Utilisation du territoire†											
	Numéro BQMA‡	Numéro séquentiel	Nom du bassin versant	SB km ²	SC %	GI %	IE %	FO %	AU %	FR %	PH hab./km ²	PR %	PE %	DA ua/ha	SD %
Bassins agricoles															
7981	3030031	13	Yamaska Sud-Est	435	20,6	2,55	1,08	7,72	9,28	79,4	46,7	78,7	0	0,86	21,7
8995	2300001	17	Boyer	200	63,0	1,76	12,0	31,6	17,5	37,0	30,9	36,0	35,9	1,40	49,6
7981	2330001	19	Etchemin	1460	26,2	0,73	3,48	13,4	8,57	73,8	26,7	66,5	0	1,60	45,3
8995	2340034	21	Beaurivage	709	30,6	1,46	2,68	15,0	11,5	69,4	21,5	34,4	30,9	2,11	18,1
7981	2360001	22	Du Chêne	803	26,4	1,28	4,04	11,3	9,73	73,6	13,3	35,7	0	0,74	19,8
8995	3010036	24	Nicolet Sud-Ouest	940	29,7	1,00	2,39	13,2	13,1	70,3	20,0	50,5	44,5	0,63	22,4
8995	3020177	27	Coaticook	526	24,2	2,18	2,48	9,71	9,79	75,8	36,6	59,8	59,9	0,81	31,9
8995	3030063	28	Noire	1470	42,8	10,5	3,39	15,1	13,8	57,2	28,2	39,0	34,4	1,25	28,4
8995	3040007	32	Des Hurons	277	78,1	39,6	10,1	15,8	12,6	21,9	69,7	55,4	42,9	0,69	52,4
8995	3040013	33	L'Acadie	363	69,4	48,3	6,37	8,08	6,68	30,6	57,4	45,4	18,8	0,17	59,0
8995	3090002	34	Des Anglais	712	52,2	22,3	5,02	12,2	12,7	47,8	19,7	13,8	13,8	0,45	52,9
8995	5220005	38	De L'Achigan	650	17,3	7,01	2,41	3,58	4,33	82,7	55,0	26,7	26,7	1,10	42,7
8995	5220006	39	Saint-Esprit	209	51,2	23,5	7,52	12,9	7,26	48,8	40,5	46,1	46,1	1,12	44,1
7981	5240001	41	Bayonne	347	40,9	7,88	11,7	13,2	8,13	59,1	32,9	26,4	0	1,19	36,2
7981	4640003	44	Mascouche	363	38,7	7,30	7,36	13,5	10,6	61,3	213	59,0	0	0,57	34,7
Bassins forestiers															
7981	1080001	1	Bonaventure	2170	0,40	0,02	0,08	0,16	0,14	99,6	0,73	51,0	0	0,42	0,86
7981	1100002	2	Casapédia	3130	0,08	0,00	0,01	0,03	0,04	99,9	0,19	12,7	0	0,21	2,11
7981	1120001	3	Nouvelle	1140	1,35	0,00	0,20	0,38	0,77	98,6	1,35	37,8	0	0,31	0,48
8995	1150014	4	Causapscaal	702	1,88	0,00	0,36	0,92	0,60	98,1	0,92	94,6	52,7	0,32	0,00
7981	2030001	5	Saint-Jean	1120	0,05	0,00	0,01	0,01	0,02	100	1,52	57,3	0	0,19	0,00
7981	2040001	6	York	1010	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	100	2,05	81,8	0	0,12	0,30
7981	2080001	7	Madeleine	1220	0,05	0,00	0,01	0,02	0,03	99,9	0,31	27,2	0	0,32	8,20
7981	2140002	8	Sainte-Anne	806	0,11	0,00	0,01	0,04	0,06	99,9	1,15	83,2	0	0,32	1,51
7981	2160002	9	Matane	1660	3,92	0,00	0,53	1,48	1,90	96,1	1,95	25,6	0	0,26	9,51
7981	2200001	10	Rimouski	1590	5,26	0,00	0,85	3,03	1,38	94,7	7,41	66,5	0	0,45	32,4
7981	2340006	11	Chaudière	1140	5,49	0,03	0,39	2,05	3,01	94,5	9,83	67,8	62,5	0,35	2,76
8995	3020042	12	Au Saumon	1030	7,87	0,01	0,55	3,03	4,28	92,1	3,32	27,1	27,1	0,37	9,76
7981	4020001	14	Rouge	5540	1,74	0,00	0,10	0,64	1,00	98,3	4,93	0,44	0,38	0,41	6,14
7981	4040001	15	De La Petite Nation	2260	6,87	0,25	0,68	2,79	3,15	93,1	5,42	16,8	0	0,34	16,1
7981	4060001	16	Du Lièvre	5000	1,85	0,00	0,11	0,73	1,01	98,2	2,22	70,3	70,3	0,32	2,87
8995	4080223	18	Gatineau	15700	0,30	0,00	0,03	0,14	0,13	99,7	0,25	4,59	4,59	0,46	5,78
7981	4130002	20	Coufonge	5170	0,29	0,01	0,03	0,13	0,13	99,7	0,33	28,6	0	0,41	2,36
7981	4300003	23	Beauchastel	383	3,96	0,00	0,55	1,66	1,75	96,0	25,6	14,8	0	0,35	2,14
8995	5010013	25	Saint-Maurice	32100	0,09	0,00	0,01	0,03	0,06	99,9	0,14	75,7	70,4	0,18	0,00
8995	5040113	26	Bras du Nord	774	1,29	0,00	0,29	0,66	0,34	98,7	2,09	14,0	0	0,37	0,39
8995	5080004	29	Jacques-Cartier	1750	0,08	0,00	0,01	0,03	0,04	99,9	1,07	39,2	19,5	0,30	17,7
7981	5100014	30	Montmorency	1100	0,84	0,08	0,03	0,26	0,48	99,2	25,8	90,4	0	0,25	38,0
7981	5120003	35	Sainte-Anne du Nord	1080	1,92	0,00	0,17	0,67	1,07	98,1	6,18	50,6	0	0,30	10,7
7981	5130001	36	Du Gouffre	692	2,96	0,00	0,51	1,08	1,37	97,0	4,49	59,6	0	1,14	10,2
7981	5150001	37	Malbaie	1850	1,37	0,02	0,11	0,33	0,90	98,6	3,39	87,5	0	0,52	6,14
8995	5220017	40	L'Assomption	505	0,32	0,00	0,02	0,15	0,14	99,7	1,08	44,0	43,1	0,94	4,35
8995	5280020	42	Du Loup	774	0,22	0,01	0,04	0,10	0,08	99,8	2,00	72,0	31,5	1,38	0,00
7981	6150001	43	Métabetchouane	2330	0,65	0,00	0,06	0,25	0,33	99,4	0,93	85,8	0	0,30	31,7
7981	6160001	45	Ouaintchouane	956	1,39	0,00	0,13	0,47	0,80	98,6	5,33	84,5	0	0,28	10,9
7981	8010001	46	Harricana	3680	2,83	0,00	0,27	1,29	1,27	97,2	9,98	69,1	0	0,32	0,30

†Description des termes

- SB Superficie du bassin versant (en km²)
- SC Superficie cultivable : Superficie en culture + jachères + terres améliorées pour le pâturage + terres non améliorées pour le pâturage (en pourcentage par rapport à SB)
- GI Cultures à grand interligne : Maïs + légumes + pommes de terre + haricots + tabac + soja + lentille (en pourcentage par rapport à SB)
- IE Cultures à interligne étroit : Blé + avoine + orge + céréales mélangées + sarrasin + seigle + millet + triticales (en pourcentage par rapport à SB)
- FO Fourrages : Luzerne + mélange de luzerne + autre foin + autres cultures fourragères (en pourcentage par rapport à SB)
- AU Autres cultures : SC - (GI + IE + FO); (en pourcentage par rapport à SB)
- PH Population (nombre d'habitants par unité de SB)
- PR Population dont les eaux usées sont raccordées à un réseau d'égouts (en pourcentage par rapport à PH)
- PE Population dont les eaux usées sont traitées (en pourcentage par rapport à PH)
- DA Densité animale (en unités animales-ua par rapport à SC; soulignons qu'une unité animale -ua- équivaut à une vache, à 5 porcs d'élevage pesant 20 à 100 kg chacun ou encore à 250 poules, coqs ou poulets à griller).
- SD Superficie agricole avec drainage souterrain (en pourcentage par rapport à SC)

‡Banque de la qualité du milieu aquatique.

Tableau 2
Statistiques descriptives de l'utilisation du territoire dans l'ensemble des bassins versants

Variables et signification	Unités	Bassins agricoles			Bassins forestiers		
		Médiane	Minimum	Maximum	Médiane	Minimum	Maximum
SB Superficie du bassin	km ²	480	150	1470	1180	383	32100
SC Superficie cultivable ^a	%	39,8	17,3	78,1	1,32	0,01	7,87
GI Cultures à grand interligne ^b	%	7,15	0,73	48,2	0	0	0,25
IE Cultures à interligne étroit ^c	%	4,53	1,08	12,0	0,10	0	0,85
FO Fourrages ^d	%	13,2	3,58	31,7	0,35	0	3,03
AU Autres cultures ^e	%	9,76	4,33	17,5	0,54	0,01	4,28
FR Forêt	%	60,2	21,9	82,6	98,7	92,1	99,9
PH Population	hab./km ²	31,9	13,3	213	2,02	0,14	25,8
PR Population raccordée ^f	%	42,2	13,7	78,7	54,1	0,44	94,6
PE Population traitée ^g	%	25,1	0-60	60,6	0	0	71,6
DA Densité animale ^h	ua/ha	0,98	0,17	2,11	0,32	0,12	1,38
SD Superficie agricole avec drainage souterrain ⁱ	%	36,6	18,1	59,0	3,61	0	38,0

- a Superficie en culture + jachères + terres améliorées pour le pâturage + terres non améliorées pour le pâturage (en pourcentage par rapport à SB).
- b Maïs + légumes + pommes de terre + haricots + tabac + soja + lentilles (en pourcentage par rapport à SB).
- c Blé + avoine + orge + céréales mélangées + sarrasin + seigle + millet + triticales (en pourcentage par rapport à SB).
- d Luzerne + mélange de luzerne + autre foin + autres cultures fourragères (en pourcentage par rapport à SB).
- e SC - (GI + IE + FO); (en pourcentage par rapport à SB).
- f Population dont les eaux usées sont raccordées à un réseau d'égouts (en pourcentage par rapport à PH).
- g Population dont les eaux usées sont traitées (en pourcentage par rapport à PH).
- h Densité animale (en unités animales «ua» par rapport à SC). Soulignons qu'une unité animale «ua» équivaut à une vache, à 5 porcs d'élevage pesant 20 à 100 kg chacun ou encore, à 250 poules, coqs ou poulets à griller).
- i Superficie agricole avec drainage souterrain (en pourcentage par rapport à SC).

matières en suspension (MES). La concentration en phosphore total (PT) a été obtenue en additionnant les concentrations de PP et PS dans chaque échantillon.

Calculs

Les flux annuels de polluants ont été calculés avec le logiciel FLUX (Walker, 1990) en utilisant la méthode de l'estimateur par ratio de Beale, recommandée par la Commission mixte Internationale pour estimer les flux de polluants entrant dans les Grands Lacs (Hore et Ostry, 1978) (Tableau 3). Les concentrations médianes pour les périodes étudiées ont aussi été calculées (Tableau 4).

Les apports d'azote total et de phosphore total vers les rivières en provenance des sources diffuses agricoles ont été calculés pour 9 des 16 rivières en milieu agricole en utilisant l'équation de bilan de masse décrite ci-après. Celle-ci suppose que tout l'azote ou le phosphore qui entre dans une rivière est ultérieurement transporté à son embouchure.

$$AD = FM - AP - AU$$

où :

- AD = Apports de sources diffuses agricoles;
- FM = Flux mesurés à la station d'échantillonnage;
- AP = Apports de sources ponctuelles (urbaines et industrielles);
- AU = Apports de sources naturelles (1 kg N total/ha.an et 0,1 kg P total /ha.an).

Les apports de sources diffuses agricoles correspondent en grande partie aux apports agricoles et dans certains cas, aux apports provenant de certaines industries non raccordées aux réseaux d'égouts municipaux. Les apports de sources ponctuelles (urbaines et industrielles) sont ceux qui proviennent des résidences et des industries raccordées aux réseaux d'égouts, qu'ils soient traités ou non. Les apports de sources naturelles sont ceux qui proviennent des zones boisées ou peu influencées par les activités humaines.

Résultats et discussion

Concentrations médianes

Les concentrations médianes de matières en suspension et d'éléments nutritifs varient beaucoup d'un bassin versant à l'autre (Tableau 4). Elles sont plus élevées dans les bassins agricoles que dans les bassins forestiers ($P \leq 0,05$); (MES : 4,6 fois; NT : 5 fois; N-NH₃ : 5,3 fois; N-NO₃ : 7 fois; PS : 8,2 fois; PP : 3,9 fois; PT : 6,6 fois (Tableau 5).

Les concentrations médianes d'azote ammoniacal et de nitrates dans les bassins agricoles sont respectivement 5 et 12 fois plus faibles que les critères recommandés pour l'eau brute d'approvisionnement (0,5 mg N-NH₃/L et 10 mg N-NO₃/L; Menviq, 1990, rev. 1992). Par contre, la concentration médiane de phosphore total dans les bassins agricoles est 4 fois plus élevée que le critère de 0,03 mg P/L adopté par le ministère de l'Environnement pour prévenir l'eutrophisation des rivières

Tableau 3

Flux annuels de matières en suspension, d'azote et de phosphore dans les bassins agricoles et forestiers

Période	Station		Nom du bassin versant	Flux annuels (kg/km ²)						
	Numéro BQMA†	Numéro séquentiel		MES	NT	N-NH ₃	N-NO ₃	PS	PP	PT
Bassins agricoles										
7981	3030031	13	Yamaska Sud-Est	12 562	606,4	82,86	373,6	32,2	43,2	75,4
8995	2300001	17	Boyer	14 133	899,9	96,03	688,1	32,9	27,3	59,7
7981	2330001	19	Etchemin	34 547	802,4	155,9	478,2	37,9	58,0	95,9
8995	2340034	21	Beaurivage	17 932	794,2	150,6	489,9	61,6	39,2	101
7981	2360001	22	Du Chêne	38 796	608,7	108,9	225,1	27,6	66,1	93,7
8995	3010036	24	Nicolet Sud-Ouest	2 938	786,2	74,02	447,4	14,7	55,5	70,3
8995	3020177	27	Coaticook	973	466,1	61,99	332,5	16,6	41,2	57,8
8995	3030003	28	Noire	15 163	1134	191,7	822,0	50,1	80,9	131
8995	3030038	31	Chibouet	16 988	1280	150,2	866,4	48,2	55,5	104
8995	3040007	32	Des Hurons	9 173	2387	279,6	1697	102	122	224
8995	3040013	33	L'Acadie	2 052	1576	87,95	1252	55,2	45,1	100
8995	3090002	34	Des Anglais	860	677,6	49,70	471,3	58,1	27,9	86,0
8995	5220005	38	De L'Achigan	30 447	1457	127,0	1125	38,8	58,2	96,9
8995	5220006	39	Saint-Esprit	12 846	723,4	59,35	539,9	17,6	22,8	40,4
7981	5240001	41	Bayonne	57 537	1486	398,4	768,1	76,2	88,3	164
7981	4640003	44	Mascouche	26 823	1119	305,0	503,9	77,4	52,5	130
Bassins forestiers										
7981	1080001	1	Bonaventure	21 624	201,4	16,44	154,8	8,16	23,3	31,4
7981	1100002	2	Cascapedia	34 899	229,1	22,20	118,0	6,94	22,7	29,6
7981	1120001	3	Nouvelle	40 437	219,2	17,01	142,5	8,20	35,3	43,5
8995	1150014	4	Causapschal	471	234,9	12,07	177,6	5,70	6,20	11,9
7981	2030001	5	Saint-Jean	102	22,81	2,958	12,93	1,31	3,40	4,71
7981	2040001	6	York	14 453	215,1	17,12	131,5	8,35	15,5	23,8
7981	2080001	7	Madeleine	27 396	231,8	14,16	148,0	9,74	18,3	28,1
7981	2140002	8	Sainte-Anne	31 470	244,4	18,85	162,4	10,4	25,3	35,6
7981	2160002	9	Matane	111 285	332,9	20,92	210,3	10,5	50,5	61,0
7981	2200001	10	Rimouski	13 685	191,6	10,97	102,6	6,80	13,1	19,9
7981	2340006	11	Chaudière	17 821	360,2	25,91	184,6	9,72	22,5	32,2
8995	3020042	12	Au Saumon	443	319,1	16,22	170,4	6,48	21,3	27,8
7981	4020001	14	Rouge	18 309	295,6	30,81	132,4	12,6	18,3	30,8
7981	4040001	15	De La Petite Nation	22 712	274,7	25,93	137,6	8,30	16,4	24,7
7981	4060001	16	Du Lièvre	2 675	165,5	7,847	44,82	3,72	5,84	9,56
8995	4080223	18	Gatineau	187	120,0	9,02	45,30	5,96	4,33	10,3
7981	4130002	20	Coulange	2 952	220,1	26,47	65,03	7,38	10,2	17,6
7981	4300003	23	Beauchastel	6 233	297,0	22,40	130,0	9,37	13,2	22,5
8995	5010013	25	Saint-Maurice	449	124,0	10,80	42,61	4,13	7,11	11,2
8995	5040113	26	Bras du Nord	4 808	172,8	16,65	147,8	15,5	15,9	31,5
8995	5080004	29	Jacques-Cartier	1 052	234,5	14,25	113,8	13,5	13,6	26,9
7981	5100014	30	Montmorency	3 449	383,3	19,53	273,6	9,40	12,6	22,0
7981	5120003	35	Sainte-Anne du Nord	6 835	264,0	20,02	145,8	10,5	18,1	27,2
7981	5130001	36	Du Gouffre	11 967	172,8	18,48	78,62	11,5	65,7	76,9
7981	5150001	37	Malbaie	11 030	200,8	19,51	50,03	13,8	42,6	55,7
8995	5220017	40	L'Assomption	198	145,0	11,14	59,09	8,68	7,26	15,9
8995	5280020	42	Du Loup	321	101,0	12,20	29,23	3,40	3,92	7,32
7981	6150001	43	Métabetchouane	3 956	242,8	20,06	78,71	9,84	18,5	28,4
7981	6160001	45	Ouïatchouane	1 164	189,2	14,60	23,06	3,36	4,50	7,86
7981	8010001	46	Harricana	9 861	260,3	21,01	129,2	18,4	22,6	40,8

†Banque de la qualité du milieu aquatique.

Tableau 1

Concentrations médianes de matières en suspension, d'azote et de phosphore dans les bassins agricoles et forestiers

Période	Station			Concentrations médianes (mg/L)						
	Numéro BQMA†	Numéro séquentiel	Nom du bassin versant	MES	NT	N-NH ₃	N-NO ₃	PS	PP	PT
Bassins agricoles										
7981	3030031	13	Yamaska Sud-Est	6,00	0,94	0,09	0,51	0,069	0,049	0,129
8995	2300001	17	Boyer	11,0	2,80	0,09	1,87	0,120	0,034	0,152
7981	2330001	19	Etchemin	5,30	0,98	0,09	0,58	0,042	0,025	0,076
8995	2340034	21	Beaurivage	4,00	1,06	0,11	0,73	0,065	0,029	0,098
7981	2360001	22	Du Chêne	10,0	0,73	0,11	0,24	0,030	0,036	0,072
8995	3010036	24	Nicolet Sud-Ouest	3,00	0,61	0,04	0,30	0,010	0,021	0,035
8995	3020177	27	Coaticook	5,00	0,81	0,07	0,54	0,015	0,019	0,038
8995	3030003	28	Noire	7,00	1,70	0,15	1,35	0,073	0,037	0,110
8995	3030038	31	Chibouet	15,0	3,65	0,22	2,30	0,135	0,053	0,204
8995	3040007	32	Des Hurons	41,0	4,60	0,62	2,40	0,210	0,130	0,374
8995	3040013	33	L'Acadie	7,50	3,30	0,11	1,92	0,150	0,035	0,212
8995	3090002	34	Des Anglais	8,50	1,10	0,07	0,77	0,155	0,035	0,200
8995	5220005	38	De L'Achigan	14,0	1,12	0,10	0,79	0,050	0,034	0,089
8995	5220006	39	Saint-Esprit	17,0	1,74	0,07	1,27	0,075	0,041	0,121
7981	5240001	41	Bayonne	21,9	1,89	0,49	1,00	0,111	0,114	0,220
7981	4640003	44	Mascouche	26,5	1,66	0,29	0,88	0,171	0,090	0,270
Bassins forestiers										
7981	1080001	1	Bonaventure	1,50	0,19	0,01	0,16	0,006	0,008	0,017
7981	1100002	2	Cascapédia	2,50	0,27	0,03	0,15	0,009	0,009	0,020
7981	1120001	3	Nouvelle	1,20	0,22	0,02	0,16	0,006	0,008	0,017
8995	1150014	4	Causapsca	1,00	0,39	0,01	0,25	0,005	0,006	0,011
7981	2030001	5	Saint-Jean	1,00	0,15	0,01	0,11	0,006	0,008	0,014
7981	2040001	6	York	1,50	0,27	0,02	0,19	0,009	0,007	0,018
7981	2080001	7	Madeleine	1,18	0,22	0,01	0,16	0,006	0,008	0,017
7981	2140002	8	Sainte-Anne	1,00	0,19	0,01	0,14	0,006	0,008	0,017
7981	2160002	9	Matane	1,57	0,32	0,02	0,20	0,009	0,010	0,021
7981	2200001	10	Rimouski	5,00	0,30	0,02	0,13	0,009	0,010	0,019
7981	2340006	11	Chaudière	4,15	0,48	0,03	0,23	0,015	0,017	0,034
8995	3020042	12	Au Saumon	1,00	0,34	0,01	0,10	0,005	0,009	0,017
7981	4020001	14	Rouge	10,0	0,31	0,03	0,12	0,009	0,016	0,030
7981	4040001	15	De La Petite Nation	7,00	0,42	0,03	0,20	0,012	0,019	0,031
7981	4060001	16	Du Lièvre	4,00	0,31	0,02	0,12	0,009	0,015	0,025
8995	4080223	18	Gatineau	1,00	0,25	0,02	0,10	0,005	0,007	0,013
7981	4130002	20	Coulonge	2,00	0,32	0,04	0,08	0,009	0,013	0,023
7981	4300003	23	Beauchastel	7,00	0,54	0,03	0,24	0,015	0,021	0,035
8995	5010013	25	Saint-Maurice	2,00	0,23	0,02	0,06	0,005	0,009	0,014
8995	5040113	26	Bras du Nord	2,00	0,26	0,01	0,14	0,005	0,009	0,015
8995	5080004	29	Jacques-Cartier	2,00	0,21	0,01	0,07	0,005	0,007	0,014
7981	5100014	30	Montmorency	1,10	0,43	0,02	0,32	0,008	0,011	0,020
7981	5120003	35	Sainte-Anne du Nord	2,20	0,25	0,02	0,12	0,011	0,010	0,022
7981	5130001	36	Du Gouffre	3,40	0,20	0,02	0,08	0,012	0,015	0,030
7981	5150001	37	Malbaie	15,0	0,25	0,01	0,03	0,018	0,028	0,050
8995	5220017	40	L'Assomption	1,00	0,25	0,02	0,07	0,005	0,005	0,012
8995	5280020	42	Du Loup	1,00	0,20	0,02	0,03	0,005	0,006	0,011
7981	6150001	43	Métabetchouane	3,00	0,32	0,02	0,09	0,012	0,019	0,037
7981	6160001	45	Ouiatchouane	2,00	0,26	0,02	0,07	0,009	0,013	0,022
7981	8010001	46	Harricana	11,5	0,39	0,03	0,11	0,012	0,024	0,039

†Banque de la qualité du milieu aquatique.

Tableau 5
Concentrations et flux de matières en suspension, d'azote et de phosphore dans l'ensemble des bassins versants

	Bassins agricoles			Bassins forestiers		
	Médiane	Minimum	Maximum	Médiane	Minimum	Maximum
Concentrations (mg/L)						
MES	9,25	3	41	2	1	15
NT	1,39	0,61	4,60	0,26	0,15	0,54
N-NH ₃	0,10	0,04	0,62	0,02	0,01	0,04
N-NO ₃	0,83	0,24	2,40	0,12	0,03	0,32
PS	0,074	0,010	0,210	0,009	0,005	0,018
PP	0,035	0,019	0,130	0,009	0,005	0,028
PT	0,125	0,035	0,374	0,019	0,011	0,050
Flux (kg/km²)						
MES	14648	860	57537	6534	102	111285
NT	851	466	2386	224	22,8	383
N-NH ₃	117	49,7	398	17,0	2,96	30,8
N-NO ₃	522	225	1696	129	12,9	273
PS	43,5	14,6	102	8,51	1,31	18,4
PP	54,0	22,7	122	16,1	3,4	65,7
PT	96,3	40,4	224	27,0	4,71	76,9

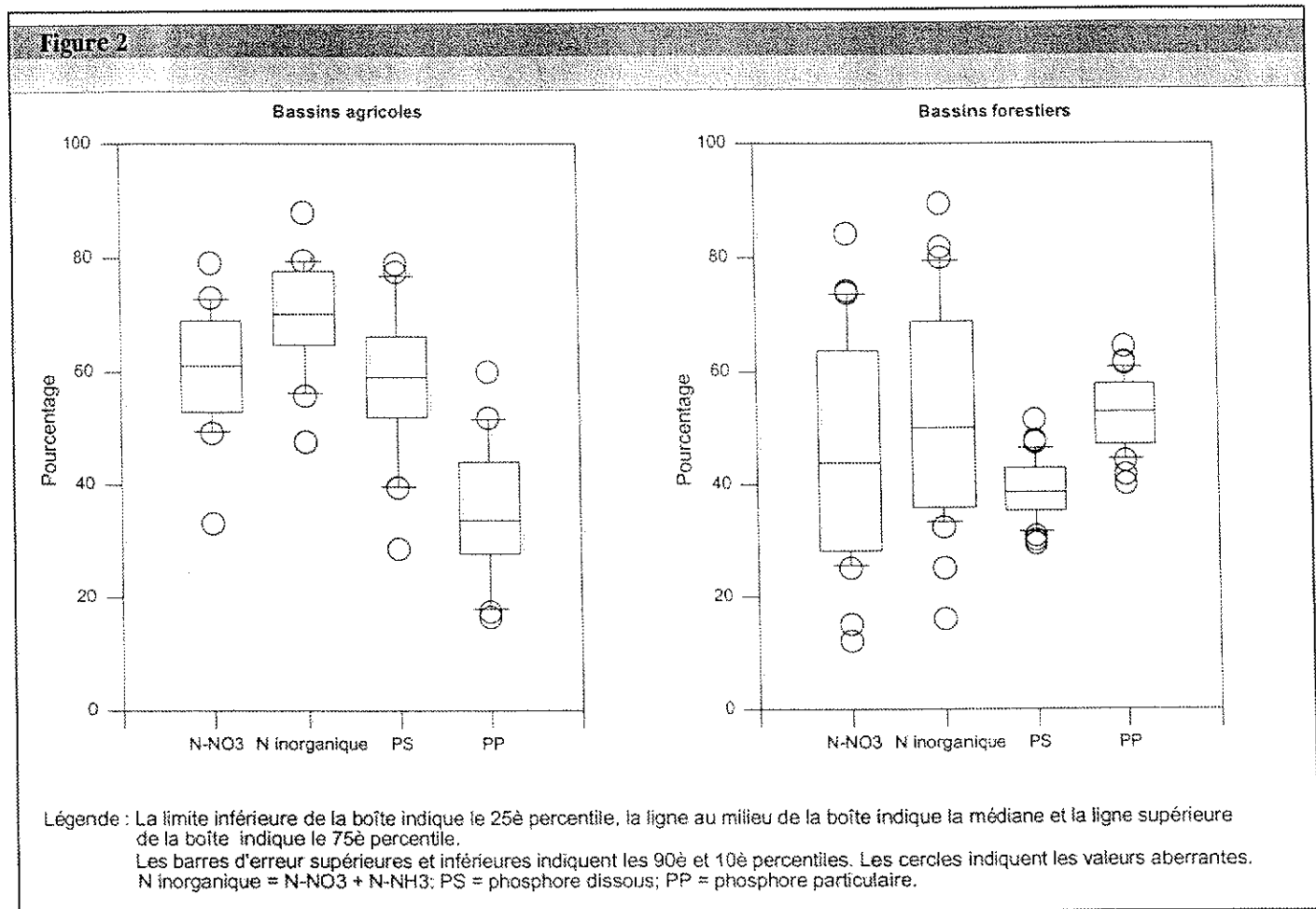
(Menviq, 1990, rev. 1992).

Dans les bassins agricoles, deux stations seulement (station 41 (rivière Bayonne) avec une médiane de 0,5 mg/L et station 32 (rivière des Hurons) avec une médiane de 0,62 mg/L) affichent une concentration d'azote ammoniacal atteignant ou dépassant le critère recommandé, alors qu'en milieu forestier, aucune station n'affiche une concentration atteignant ou dépassant le critère (Tableau 4). Les concentrations de nitrates de la plupart des stations en milieu agricole (9 sur 16) fluctuent entre 0 et 1 mg N-NO₃/L alors que celles de la plupart des stations en milieu forestier (19 sur 30) varient entre 0 et 0,15 mg N-NO₃/L (Tableau 4). Pour le phosphore total, toutes les stations en milieu agricole affichent une concentration égale ou supérieure au critère pour la prévention de l'eutrophisation des rivières. Par contre, dans les bassins forestiers, plus de la moitié des stations (23 sur 30) affichent une concentration de phosphore total égale ou inférieure à ce critère (Tableau 4).

Les proportions des différentes formes d'azote par rapport à l'azote total, d'une part, et celles des différentes formes de phosphore par rapport au phosphore total, d'autre part, varient d'un bassin à l'autre à l'intérieur des bassins agricoles et forestiers (Figure 2). Cependant, il apparaît que dans l'ensemble, l'azote total est dominé par les nitrates en milieu agricole (61 %), ce qui n'est pas le cas en milieu forestier (43 %). Pour les bassins agricoles, l'azote inorganique (N-NO₃ + N-NH₃) constitue la majeure partie de l'azote total (70 %), alors que pour les bassins forestiers, l'azote total est partagé également entre l'azote inorganique et l'azote organique. Dans les bassins agricoles comme dans les bassins forestiers, les nitrates constituent la majeure partie de l'azote inorganique (90 % et 87 %

respectivement). Rekolainen (1989) a rapporté des résultats similaires à la suite d'une étude menée en Finlande. Dans les bassins agricoles, la concentration de phosphore total est dominée par le phosphore dissous (60 % du phosphore total), alors que dans les bassins forestiers, elle est partagée également entre le phosphore dissous et le phosphore particulaire.

La disponibilité du phosphore pour la croissance des algues dépend de la forme sous laquelle il est présent. Le phosphore dissous est accessible plus facilement aux plantes aquatiques que le phosphore particulaire (Nürnberg et Peters, 1984; Bradford et Peters, 1987), si bien que plus la proportion de phosphore dissous par rapport au phosphore total est élevée, plus les risques d'eutrophisation sont élevés. Trois processus sont à l'origine du phosphore dissous dans les rivières drainant des bassins agricoles (Kronvang, 1992) : ruissellement de surface, désorption du phosphore associé à la matière organique et remise en suspension des sédiments déposés au fond des rivières. Le fait que, dans les bassins agricoles étudiés la concentration de phosphore dissous représente 60 % de la teneur en phosphore total peut donc être théoriquement inquiétant (possibilités de conditions favorables à l'eutrophisation). Cela suggère aussi que les mesures de contrôle de l'érosion hydrique telles que les «lisières tampon engazonnées» dont les bandes riveraines pourraient ne pas suffire pour réduire la quantité de phosphore dissous qui atteint les rivières (Cooke et Prepas, 1998). Il faut toutefois interpréter prudemment ces résultats. En effet, le laboratoire du Ministère analyse beaucoup d'échantillons d'eau contenant quelquefois d'importantes concentrations de matières en suspension. Aussi, pour diminuer le temps de préparation des échantillons, il a été décidé de filtrer ceux-ci sur des filtres de porosité à 1,2 µm (certains auteurs



utilisent également la même méthode), alors que la convention veut que des filtres ayant une porosité de 0,45 µm soient utilisés (American Public Health Association — APHA, 1985). Si l'on s'en tient à la recommandation de l'APHA, on peut penser que les concentrations et les flux de phosphore dissous rapportés dans la présente publication sont surestimés (les concentrations et les flux de phosphore particulaire étant sous-estimés) par rapport à ceux qu'ils auraient été si la méthode de filtration standardisée avait été utilisée. La concentration de phosphore total est d'ailleurs généralement dominée par le phosphore particulaire, en milieu agricole comme en milieu forestier (Vaithyanathan et Correl, 1992; Heathwaite et Jones, 1996). Par ailleurs, Ulén *et al.* (1991) ainsi que Grant *et al.* (1996) ont indiqué que l'eau de drainage souterrain contient habituellement des concentrations élevées de phosphore dissous lorsque les champs sont utilisés comme pâturages pour le bétail. Cela peut donc avoir une incidence importante sur la concentration de phosphore dissous dans les rivières.

Flux annuels

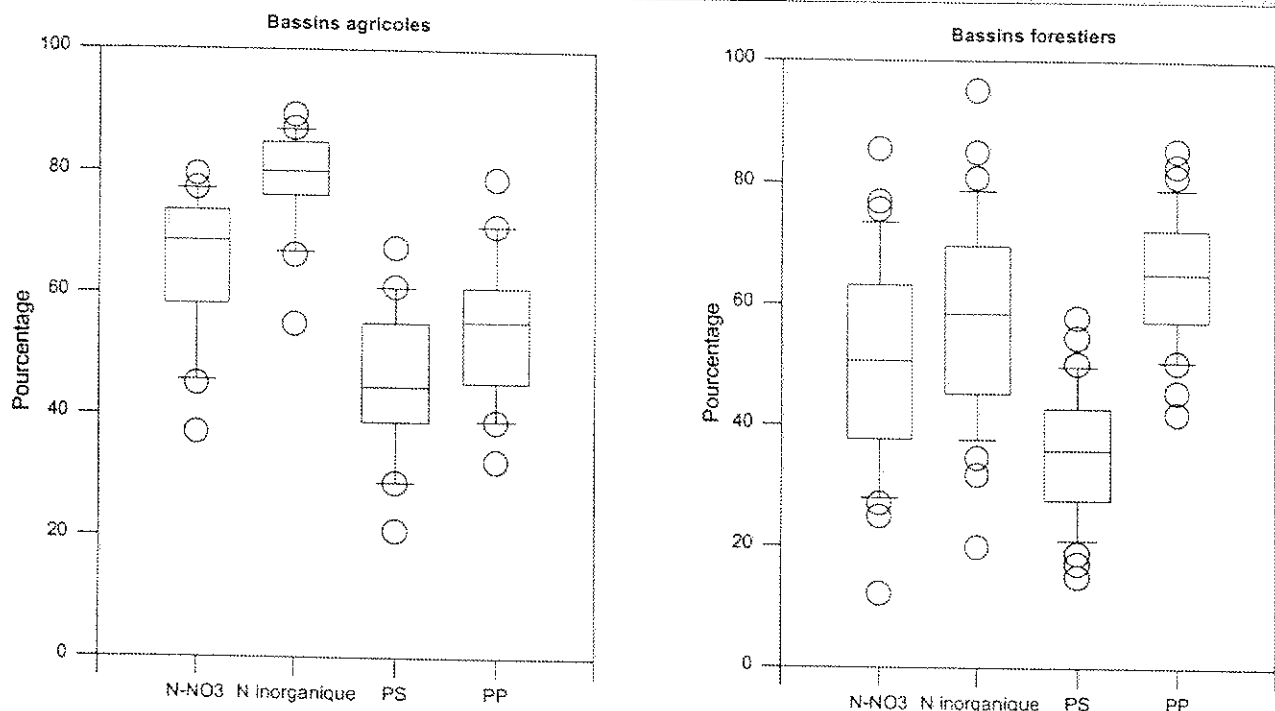
Les flux annuels de matières en suspension et d'éléments nutritifs varient beaucoup d'un bassin versant à l'autre (Tableau 3). Toutefois, il n'y a pas de différence entre les flux annuels de

matières en suspension des rivières dans les bassins agricoles et ceux des rivières dans les bassins forestiers ($P > 0,05$). Cela peut indiquer la difficulté de prélever des échantillons d'eau représentatifs de la réalité du point de vue de la concentration de matières en suspension. Par contre, les flux annuels d'éléments nutritifs (N, P) sont plus élevés dans les bassins agricoles que dans les bassins forestiers ($P < 0,05$); (NT : 3,8 fois; N-NH₃ : 7 fois; N-NO₃ : 4 fois; PS : 5 fois; PP : 3,3 fois; PT : 3,5 fois; Tableau 5).

La plupart des rivières en milieu agricole (15 sur 16) exportent entre 500 et 1500 kg NT/km², alors que 12 rivières sur 16 exportent entre 250 et 1000 kg N-NO₃/km² (Tableau 3). Par contre, la majorité des rivières en milieu forestier (25 sur 30) exportent entre 100 et 300 kg NT/km² incluant 50 à 150 kg N-NO₃/km². Pour le phosphore, la majorité des rivières en milieu agricole (13 sur 16) exportent entre 50 et 150 PT/km², alors que 15 rivières sur 30 en milieu forestier exportent entre 20 et 40 kg PT/km² (Tableau 3).

Le flux d'azote total est dominé par les nitrates en milieu agricole (70 %), et distribué également entre les nitrates et les autres formes d'azote (ammoniacal et organique) en milieu forestier (Figure 3). Il en résulte que dans les bassins agricoles, la minéralisation de l'azote organique du sol et l'apport de

Figure 3



Légende : La limite inférieure de la boîte indique le 25^e percentile, la ligne au milieu de la boîte indique la médiane et la ligne supérieure de la boîte indique le 75^e percentile.
 Les barres d'erreur supérieures et inférieures indiquent les 90^e et 10^e percentiles. Les cercles indiquent les valeurs aberrantes.
 N inorganique = N-NO₃ + N-NH₃; PS = phosphore dissous; PP = phosphore particulaire.

Tableau 6

Répartition de l'azote total et du phosphore total selon les différentes sources de pollution dans neuf bassins agricoles pour l'année 1995

Rivières	Azote total, tonnes/an (%) [†]				Phosphore total, tonnes/an (%) [†]			
	Mesuré [‡]	Sources ponctuelles ^{††}	Sources naturelles [§]	Sources diffuses [¶]	Mesuré	Sources ponctuelles	Sources naturelles	Sources diffuses
Boyer	129 (100)	11 (9)	20 (16)	98 (76)	11 (100)	2 (20)	2 (18)	7 (63)
Beaurivage	466 (100)	47 (10)	71 (15)	348 (75)	58 (100)	5 (9)	7 (12)	46 (79)
Nicolet Sud-Ouest	568 (100)	67 (12)	94 (17)	401 (71)	47 (100)	12 (26)	9 (20)	31 (66)
Noire	1008 (100)	162 (16)	147 (15)	700 (69)	131 (100)	21 (16)	15 (11)	95 (72)
Chibouet	194 (100)	5 (3)	15 (8)	174 (90)	15 (100)	0,4 (3)	2 (10)	13 (85)
Des Hurons	335 (100)	50 (15)	28 (8)	258 (77)	35 (100)	7 (19)	3 (8)	26 (74)
L'Acadie	276 (100)	36 (13)	36 (13)	204 (74)	24 (100)	5 (22)	4 (15)	15 (62)
Des Anglais	272 (100)	13 (5)	71 (26)	187 (69)	36 (100)	2 (7)	7 (20)	27 (74)
Saint-Esprit	158 (100)	8 (5)	21 (13)	129 (82)	9 (100)	1 (10)	2 (22)	6 (63)

† Pourcentage par rapport aux apports mesurés.

‡ Flux mesuré à l'embouchure de la rivière.

†† Apports provenant des résidences et des industries raccordées aux réseaux d'égouts, qu'ils soient traités ou non.

§ Apports provenant des zones boisées ou peu influencées par les activités humaines.

¶ Apports provenant en grande partie des terres agricoles, et dans certains cas, de certaines industries non raccordées aux réseaux d'égouts municipaux.

fertilisants azotés (inorganiques et engrais de ferme) contribuent significativement au flux azoté des rivières (Hoyas *et al.*, 1977). Pour les bassins agricoles et forestiers, l'azote inorganique constitue la majeure partie de l'azote total (80 % et 58 % respectivement), alors que les nitrates constituent la majeure partie de l'azote inorganique (80 % et 86 % respectivement) (Figure 3). Dans les bassins agricoles comme dans les bassins forestiers, le flux de phosphore total est dominé par le phosphore particulaire (55 % et 65 % respectivement). Vaithyanathan et Correl (1992) et Heathwaite et Jones (1996) ont rapporté aussi qu'en milieu agricole comme en milieu forestier, le flux de phosphore total était généralement dominé par le phosphore particulaire.

Il est possible que les flux de phosphore rapportés dans ce document pour les bassins québécois ne soient pas très précis, notamment parce que la fréquence d'échantillonnage de l'eau dans le réseau-rivière du ministère de l'Environnement n'est pas modulée en fonction des conditions hydrologiques. Il faut savoir que différentes sources de pollution (ponctuelles, diffuses agricoles) et différents mécanismes de transport du phosphore dominant dans différentes conditions d'écoulement. En période d'étiage, le phosphore dissous provenant des sources ponctuelles prédomine, bien que la contribution des sources diffuses agricoles puisse ne pas être négligeable. En période de crue, c'est surtout le phosphore particulaire provenant des sources diffuses agricoles qui prédomine (Cahill, 1977). En effet, le phosphore est généralement associé aux matières en suspension qui peuvent être transportées principalement pendant des périodes de crues courtes et imprévisibles (Walling et Webb, 1985; Kronvang, 1992). Un essai de quantification des flux de phosphore à l'échelle d'un bassin de 330 km² a permis à Johnson *et al.* (1976) de démontrer que 75 % de la perte de phosphore est associée aux plus importantes crues, qui n'ont duré que 10 % du temps. Rekolainen *et al.* (1991) et Grant *et al.* (1996) ont montré que l'échantillonnage ponctuel sous-estime les flux de phosphore (surtout le phosphore particulaire) par rapport à l'échantillonnage intensif. C'est pour cela qu'à défaut de prélever les échantillons d'eau proportionnellement au volume d'eau écoulé dans la rivière (ce qui est idéal), il est recommandé d'augmenter la fréquence d'échantillonnage en période de crue (printemps et automne) pour accroître la précision des flux.

Bilan de l'azote et du phosphore dans certains bassins agricoles

La répartition des apports d'azote total et de phosphore total selon les sources de pollution pour l'année 1995 est présentée au tableau 6. Les apports naturels et les apports de sources ponctuelles (urbaines et industrielles) varient selon les rivières. Ils représentent cependant une faible proportion des flux totaux (≤ 26 % chacun). Par contre, les apports de sources diffuses agricoles représentent une forte proportion des flux annuels d'azote total (70 à 90 %) et de phosphore total (60 à 85 %). D'autres auteurs ont montré que les activités agricoles contribuent pour une grande part à la pollution des rivières. Dans plusieurs pays ou régions de l'Europe de l'Ouest (Pays-Bas, Danemark, Italie, Suisse, Norvège), l'agriculture contribue à 37 à 82 % des flux annuels d'azote total et à 27 à 38 % des flux

annuels de phosphore total (Isermann, 1990). Une étude récente faite au Danemark dans 270 bassins agricoles montre que les flux d'azote total et de phosphore total de sources diffuses agricoles représentent respectivement 94 % et 50 % des flux totaux mesurés (Kronvang *et al.*, 1996). Au Pays-Bas, Boers (1996) a estimé la contribution des sources diffuses agricoles dans les bassins versants agricoles à 60% des flux d'azote total et à 40 à 50 % des flux de phosphore total.

L'importance relative des sources diffuses agricoles à la pollution de l'eau des rivières a probablement augmenté au cours des vingt dernières années, et pourrait continuer à augmenter au cours des prochaines années à cause du traitement des eaux usées urbaines et industrielles, et de l'accumulation du phosphore dans les sols agricoles. Entre 1980 et 1994, le Programme d'assainissement des eaux du Québec a permis de diminuer de moitié les charges de phosphore total provenant des eaux usées municipales (15 tonnes/jour à 7 tonnes/jour); (Painchaud, 1997). Le pourcentage de la population dont les eaux usées sont traitées est d'ailleurs relativement élevé dans certains des bassins à l'étude (variation de 14 % dans le bassin de la rivière des Anglais à 46 % dans celui de la rivière Saint-Esprit; Tableau 1). L'épandage répété de grandes quantités de fumier et d'engrais inorganiques phosphatés provoque généralement une accumulation de phosphore dans les sols agricoles, ce qui peut, à long terme, accélérer les pertes de phosphore vers les rivières. Cette problématique a été observée en Europe (Breeuwisma et Reijerink, 1991; Van der Molen *et al.*, 1998), aux États-Unis (Sharpley *et al.*, 1994; Mozzafari et Sims, 1994) et au Québec (Simard *et al.*, 1995; Giroux *et al.*, 1996).

Conclusion

Les concentrations médianes et les flux annuels d'azote, de phosphore et de matières en suspension sont beaucoup plus élevés dans les bassins agricoles que dans les bassins forestiers. Dans les bassins agricoles, les apports de polluants de sources diffuses agricoles représentent la majeure partie des flux totaux. On peut penser que dans un contexte où, au cours des deux dernières décennies, on a contrôlé la pollution de sources ponctuelles municipales avec un certain succès (bien qu'il reste à régler certains problèmes de débordement d'eaux usées non traitées notamment), l'importance relative de la pollution de sources diffuses agricoles s'est accrue dans la même période. La qualité de l'eau demeurant mauvaise dans les bassins agricoles malgré de légères améliorations, le contrôle des sources diffuses agricoles apparaît comme une nécessité, un moyen de «rentabiliser» les investissements faits dans l'assainissement urbain. Des études antérieures ont montré que jusqu'à présent, les politiques et programmes d'assainissement agricole n'ont pas eu tous les résultats souhaités. Il faudra donc innover, et mettre en œuvre d'autres moyens de lutte contre la pollution diffuse agricole qui soient efficaces au plan environnemental, et «supportables» au plan économique.

Références bibliographiques

- American Public Health Association. (1985). Standard methods for the examination of water and wastewater. 15^e éd., APHA, Washington, D.C.
- Belic, S. S. et A. V. Belic. (1996). Water quality changes in a small plain agricultural catchment area. *Water, Science and Technology* 33(4-5):205-210.
- Bradford, M.E. et R.H. Peters. (1987). The relationship between chemically analyzed phosphorus fractions and bioavailable phosphorus. *Limnology & Oceanography* 32(5):1124-1137.
- Boers, P. C. M. (1996). Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands: Causes, and remedies. *Water, Science and Technology* 33(4-5):183-189.
- Breeuwisma, A. et J. A. G. Reijerink. (1991). Phosphate saturated soils: New environmental issue. Agric. Res. Dep., The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen, The Netherlands. 11p.
- Cahill, P. (1977). Forms and sediment associations of nutrients (C, N and P), pesticides and metals; Nutrients-P. p. 163-180. Dans H. Shear et A. E. P. Watson (eds), *The fluvial transport of sediments-associated nutrients and contaminants*, Proc. International Joint Commission Workshop, Kitchener, Ontario, Canada.
- Cooke, S. E. et E. E. Prepas. (1998). Stream phosphorus and nitrogen export from agricultural and forest watersheds on the Boreal Plain. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55(10):2292-2299.
- Gangbazo, G. et J. Painchaud. (1999). Incidence des politiques et programmes d'assainissement agricole sur la qualité de l'eau de six rivières 1988-1995. *Vecteur Environnement* 32(1):29-36.
- Giroux, M., D. Carrier et P. Beaudet. (1996). Problématique et méthodes de gestion des charges de phosphore appliquées aux sols agricoles en provenance des engrais de ferme. *Agrisol* 9(1):36-45.
- Grant, R., A. Laubel, B. Kronvang, H. E. Andersen, L. M. Svendsen et A. Fuglsand. (1996). Loss of dissolved and particulate phosphorus from arable catchments by subsurface drainage. *Water Research* 30(11):2633-2642.
- Heathwaite, A. L. et P. J. Jones. (1996). Contribution of nitrogen species and phosphorus fractions to stream water quality in agricultural catchments. *Hydrological Processes* 10(7):971-983.
- Hore, R. C. et R. C. Ostry. (1978). Grand river, Ontario summary pilot watershed report. International Reference Group on Great Lakes Pollution from Land Use Activities International Joint Commission, 56p.
- Hoyas, T. R., N. Vagstad, M. Bechmann et H. O. Eggestad. (1997). Nitrogen budget in the river Auli catchment : A catchment dominated by agriculture in southeastern Norway. *Ambio* 26(5):289-295.
- Isermann, K. (1990). Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions into the surface waters of Western Europe against the background of their eutrophication. *Fertilizer Research* 26:253-269.
- Johnson, A. H., D. R. Bouldin, E. A. Goyette et A. H. Hedges. (1976). Phosphorus losses by stream transport from a rural watershed : Quantities, processes, and sources. *Journal of Environmental Quality* 5(2):148-157.
- Kronvang, B. (1992). The export of particulate matter, particulate phosphorus and dissolved phosphorus from two agricultural river basins : Implications on estimating the non-point phosphorus load. *Water Research* 26(10):1347-1358.
- Kronvang, B., G. Aertebjerg, R. Grant, P. Kristensen, M. Hovmand et J. Kirkegaard. (1993). Nationwide monitoring of nutrients and their ecological effects : State of the Danish aquatic environment. *Ambio* 22(4):176-187.
- Kronvang, B., P. Graesboll, S. E. Larsen, L. M. Svendsen et H. E. Andersen. (1996). Diffuse nutrient losses in Denmark. *Water Science and Technology* 33(4-5):81-88.
- Laflamme, D. (1995). Qualité des eaux du bassin de la rivière Sainte-Anne, 1979 à 1994, Direction des écosystèmes aquatiques, ministère de l'Environnement du Québec, Sainte-Foy, Québec, Canada, 66p.
- Menviq. (1990 rev. 1992). Critères de qualité de l'eau. Direction de la qualité des cours d'eau, ministère de l'Environnement du Québec, Sainte-Foy, Québec, Canada, 423p.
- Mozaffari, M. et J. T. Sims. (1994). Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture. *Soil Science* 157(2):97-107.
- Nürnberg, G. et R. H. Peters. (1984). Biological availability of soluble reactive phosphorus in anoxic and oxic freshwaters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 41:757-765.
- Painchaud, J. (1997). Tendances de la qualité de l'eau des rivières du Québec, 1979-1994. *Vecteur Environnement* 30(2):43-50.
- Rekolainen, S. (1989). Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland. *Aqua Fennica* 19(2):95-107.
- Rekolainen, S., M. Posch, J. Kamari et P. Ekholm. (1991). Evaluation of the accuracy and precision of annual phosphorus load estimates from two agricultural basins in Finland. *Journal of Hydrology* 128:237-255.
- Sharpley, A. N., S. C. Chapra, R. Wedepohl, J. T. Sims, T. C. Daniel et K. R. Reddy. (1994). Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. *Journal of Environmental Quality* 23(3):437-451.
- Simard, R. R., D. Cluis, G. Gangbazo et S. Beauchemin. (1995). Phosphorus status of forest and agricultural soils from a watershed of high animal density. *Journal of Environmental Quality* 24(5):1010-1017.
- Ulén, B., B. Kronvang et L. M. Svendsen. (1991). Loss of phosphorus from woodland, natural land and agricultural land. p. 83-100. Dans L. M. Svendsen et B. Kronvang (eds), *Phosphorus in the Nordic Countries-Methods, bioavailability, effects and measures*, Nord 1991 : 47, Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Danemark.
- Vaithyanathan, P. et D. L. Correll. (1992). The Rhode river watershed: Phosphorus distribution and export in forest and agricultural soils. *Journal of Environmental Quality* 21(2):280-288.
- Walker, W. W. (1990). FLUX stream load computations Version 4.4. Computer program prep. for U.S. Army Corps Eng., Waterways Exp. Sta., Vicksburg, MS.
- Walling, D. E. et D. B. Webb. (1985). Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers: Some cautionary comments. *Marine Pollution Bulletin* 16(12):488-492.
- Van der Molen, D. T., A. Breeuwisma et P. C. M. Boers. (1998). Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspectives. *Journal of Environmental Quality* 27(1):4-11.