



HAL
open science

Dynamique du phosphore à l'échelle du bassin versant

Philippe Quetin, Jérôme Lazzarotto, Jean Marcel Dorioz, Philippe Vioget

► **To cite this version:**

Philippe Quetin, Jérôme Lazzarotto, Jean Marcel Dorioz, Philippe Vioget. Dynamique du phosphore à l'échelle du bassin versant. 2. Congrès International l'Eau en Montagne gestion intégré des Hauts Bassins Versants, Sep 2006, Megève, France. hal-02750558

HAL Id: hal-02750558

<https://hal.inrae.fr/hal-02750558>

Submitted on 3 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Dynamique du Phosphore à l'échelle du Bassin Versant

Quétin Ph., Lazzarotto J., Dorioz J. M., Vioget Ph.*

STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE (INRA-UMR CARTEL), BP 511
- FR - 74203 THONON LES BAINS Cedex.

* SERVICE DES EAUX, SOLS et ASSAINISSEMENT (SESA)
Division Laboratoire 155, ch. des Boveresses 1066 EPALINGES Ch.

RÉSUMÉ

L'objectif de l'étude est de caractériser les évolutions à long terme des exportations de phosphore (P) provenant de bassin versant observatoire, afin d'analyser les effets de la mise en place des mesures d'assainissement et des changements du mode d'occupation des sols. L'étude des enregistrements, via les relations concentration/débit établies en période de tarissement et d'étiage, permettent la détermination des apports ponctuels. Seule la baisse nette et importante (près de 3600 kg de P total par an) correspondant à l'arrêt des rejets de la STEP de Bons, a un résultat enregistrable à l'exutoire du Foron. Les mesures d'assainissement des eaux usées mises en place, associées à l'interdiction des polyphosphates, ont permis en 25 ans une maîtrise remarquable de flux de P du bassin versant de la Venoge avec -40% sur les exportations de Phosphore malgré l'accroissement de la population (+14 000 d'habitants permanents).

MOTS CLES

Assainissement, Bassin versant, Bilan, Phosphore, Relation concentration (ou flux) /débit,

ABSTRACT

The objective of this study is to classify the long-term evolutions of Phosphorus (P) output from an observatory watershed, in order to analyse the effects to purification measures and changes in the land use.

The study of the flow concentration records during the running dry and the base flow periods allows us to determine the inputs from point sources.

The net and significant drop (close to 3600 kg of the total P per year) which corresponds to the stop of the discharges from the STEP in Bons, was the only that could be measured at the outlet of the Foron. The measures taken for the purification of sewage water, along with the prohibition of phosphates, has resulted, during the past 25 years, in a noticeable drop of the P exports in the "la Venoge" watershed with 40% less P export despite the increase in population (+14,000 permanent inhabitants).

KEY WORDS

Purification, Watershed, Assessment, Phosphorus, Flow concentration records

1 INTRODUCTION

Le Phosphore (P) est le facteur limitant de l'eutrophisation qui affecte les milieux aquatiques lenticques. La maîtrise des apports en P occupe les gestionnaires depuis plus de deux décennies dans les pays développés. La stratégie mise en place consiste à maîtriser en priorité les sources ponctuelles de P au niveau du Bassin Versant (BV), avec quelques succès notamment dans le cas de nos grands lacs alpins comme le Léman.

Il nous semble important d'analyser les conditions et les limites des succès acquis dans la lutte contre l'eutrophisation des grands lacs 1) pour en tirer une portée générale scientifique et opérationnelle et envisager la transposition à d'autres situations dégradées. 2) pour préparer l'avenir et faire face aux incertitudes qui demeurent sur l'origine et l'impact des pollutions phosphorées résiduelles.

La réflexion que nous proposons de présenter s'inscrit dans ce contexte. Son objectif est de comprendre les évolutions des régimes d'exportation du P dans des BV ruraux de la région lémanique en relation avec l'évolution du Mode d'Occupation des Sols (MOS) et du système d'assainissement. Le régime d'exportation est caractérisé sur la base d'études comparées de bilans et de relations concentrations/débits.

Pour ce travail nous traitons les données acquises dans deux bassins observatoires :

1) Le bassin du Foron de Sciez (74) fait l'objet de deux suivis approfondis séparés de dix ans (1990-93 et 2002-05) réalisés par l'INRA : ce dispositif permet d'évaluer les évolutions du bilan de P en relation avec la démographie et de mesurer les impacts d'un transfert hors BV des rejets de la station d'épuration de Bons en Chablais en 2003.

2) Le bassin de la Venoge (rivière Suisse, se jetant dans le Léman près de Lausanne), 25 ans de mesure, à son exutoire, réalisées par le SESA. Cette série de données nous a permis d'étudier les évolutions des apports de P au moment de l'arrêt des TPP dans les lessives en 1986 et la mise en place progressive du réseau d'assainissement.

2 ETAT DES CONNAISSANCES

Le bilan de P total d'un bassin versant repose sur l'identification et l'évaluation des sources ponctuelles et diffuses. Ces 2 types de sources se distinguent par leur mode d'entrée dans la rivière et leurs relations avec les conditions hydrologiques.

Les sources ponctuelles entrent dans le réseau hydrographique généralement en des sites précis et surtout indépendamment de la pluviométrie, au rythme des activités humaines. Il s'agit souvent de rejets de fortes concentrations en formes dissoutes du P et en formes particulières bio disponibles. La maîtrise de ces sources repose sur une politique de collecte et de traitement des eaux usées. La mesure des flux ponctuels de P est possible si les eaux usées sont efficacement collectées, rejetées en un petit nombre de sites et analysées régulièrement (Kronvang 1992).

Autre composante du bilan de bassin, les sources diffuses ne se manifestent qu'en période de ruissellement ou de ressuyage des sols. Il est difficile de leurs définir un point d'entrée précis dans le réseau. Les transferts diffus de P total s'accompagnent de grands volumes d'eau généralement chargés de matières en suspension. De ce fait, la maîtrise des sources diffuses ne repose pas (sauf exception) sur une technologie, mais sur la gestion des sols. Difficiles à localiser et à prévoir, les sources diffuses sont aussi difficiles à quantifier (Sharley et al 1993). Une démarche possible est d'affecter aux divers modes d'occupations des sols, des coefficients moyens, les « flux spécifiques » exprimés en kg/ha/an, la somme des produits flux spécifiques / surfaces fournissant une estimation des apports diffus du bassin. Mais ces valeurs moyennes issues de compilations bibliographiques, ne tiennent pas compte de la variabilité hydrologique qui peut se révéler très forte.

Bilans et les flux spécifiques sont généralement présentés en P total (P_{Teb}), alors que l'impact d'un apport dépend aussi de caractéristiques qualitatives se rapportant aux formes du P transférées (particulaire, dissous, organique, minérale). La spéciation de P, quelque soit la typologie adoptée, évolue lors des transferts dans les bassins versants si bien, qu'à l'exutoire, les flux enregistrés ne résultent pas d'un simple mélange conservatif des divers apports. Une partie

du P total, apporté au réseau, quelque soit sa forme initiale est stockée dans le réseau, avec des transformations possibles de spéciation. Les principales transformations connues aboutissent à insolubiliser de façon partiellement réversible le P dissous, dont les sources principales se trouvent dans les eaux usées. Il s'ensuit une rétention dans les sédiments et végétaux de la rivière. L'intensité de ce phénomène dépend du débit et de la concentration (Pilleboue 1987) Lors des périodes de basses eaux l'effet cumulé de ces rétentions crée une source interne à la rivière, suffisamment significative pour modifier les bilans annuels et affecter le régime d'exportation à l'exutoire : retards au transfert, variabilité saisonnière de l'origine et de la biodisponibilité des formes particulières (Dorioz et al 1998). Considérant l'importance quantitative de cette charge interne (le stockage dans la rivière peut représenter l'équivalent des apports diffus), nous faisons l'hypothèse que ce phénomène joue un rôle tampon dans la dynamique du P total, susceptible de masquer les effets d'une baisse des entrées de P.

Analyses des relations concentration en P / débit, en étiage et tarissement

Principes :

La relation concentration hebdomadaire moyenne P (C)/ débit hebdomadaire moyen (Q) en période de tarissement et d'étiage, fournit des informations sur la dynamique de transferts des rejets ponctuels et une estimation globale des apports à la rivière associés à ce type de rejets (Dorioz et al 2004, Pilleboue 1987).

Les semaines d'étiage et de tarissement sont définies par l'absence de crue, c'est-à-dire par des débits instantanés constants ou décroissants. Dans un tel contexte hydrologique le ruissellement à partir des sols est négligeable et le phosphore provient donc principalement des rejets ponctuels et secondairement du « bruit de fond » naturel et agricole.

La relation C/Q est établie à partir de valeurs moyennes hebdomadaires enregistrées au cours de tarissement sur au moins une année. En choisissant un pas de temps hebdomadaire et une durée d'étude au moins annuelle, nous intégrons au mieux le caractère cyclique, à la fois journalier, hebdomadaire et saisonnier des activités humaines contrôlant les divers rejets ponctuels. Par ailleurs nous limitons l'étude à des périodes courtes (1 à 3 en général) pour éviter de donner trop de poids aux éventuelles évolutions démographiques et techniques. Sur ces bases, il nous semble pertinent de considérer que les rejets ponctuels hebdomadaires fluctuent autour d'une moyenne constante sur la durée d'étude.

La relation concentration P / débit est décrite par une équation du type $[P] = a Q^b$ (avec $-1 < b < 0$) ce qui exprime une baisse régulière de la concentration en P avec l'accroissement du débit. Mais cette baisse ne résulte pas d'une simple loi de dilution des rejets ponctuels (constants au pas hebdomadaire), l'effet de dilution est pondéré par un phénomène secondaire mais non négligeable, la diminution avec le débit, de la part des ces rejets retenus dans le réseau hydrographique au niveau des sédiments, des biofilms, ... (Dorioz et al 2004). Si on considère les flux, ce fonctionnement se traduit de la façon suivante : alors que les entrées sont constantes (au pas hebdomadaire), les sorties s'accroissent avec une intensité qui ne s'explique pas par l'accroissement du flux provenant des zones naturelles. Puis, le flux de tarissement se stabilise au-delà d'un débit qualifié de « **débit limite** ». L'ensemble de la pollution ponctuelle est alors transmis, ce qui permet une évaluation globale de celle-ci.

3 Sites d'études

3.1 Foron

Le bassin du Foron, son territoire est limité au nord par le lac Léman, à l'est par le bassin versant du Redon, au sud par les Préalpes et le Massif des Voirons (1480 m) et à l'ouest par le Mont de Boisy (740 m). Il s'étend sur six communes (Ballaison, Bons en Chablais, Brenthonne, Fessy, Lully et Sciez). Au point de prélèvement, sa superficie est de 49 km². Il s'agit d'un bassin rural avec un amont pentu (pente moyenne entre 30 et 60%) et forestier, développé sur les Préalpes calcaires (matériaux perméables) et un aval agricole sur des pentes douces (<10%) sur des matériaux quaternaires, pour l'essentiel morainiques et peu perméables. Les sols agricoles types sont des sols bruns profonds. Le Foron est une rivière à régime torrentiel avec un débit moyen annuel voisinant 1 m³.s⁻¹ et des eaux bicarbonatées calciques.

Le dispositif de suivi comprend : un limnigraphe, installé par la D.I.R.E.N. Rhône-Alpes et qui enregistre en continu les débits. Sur le même site, L'INRA a installé un préleveur

automatique qui réalise toutes les 15 minutes un prélèvement (30 ml). Les échantillons ainsi collectés sont réunis dans des flacons de 2 litres correspondant à 8 heures de prélèvements, ils sont stockés à 4°C et à l'obscurité. Les analyses portent sur un échantillon moyen hebdomadaire proportionnel aux débits écoulés, cet échantillon est réalisé à partir des flacons de 2 l.

Des enquêtes réalisées auprès des différents corps institutionnels (mairie, SIVOM, DDAF, ...) permettent de constituer la base de données nécessaire pour la détermination du bilan des apports.

3.2 Venoge

Le Bassin Versant topographique (BV) de la Venoge est, du fait de sa superficie de 241 km², le 3^{ème} affluent du Léman. Il se situe sur la rive nord du Léman dans le canton de Vaud (Suisse). La Venoge prend sa source au pied de la chaîne du Jura, pour se jeter dans le Léman entre Morges et Lausanne. Elle parcourt 500 m de dénivellation, essentiellement sur des terres agricoles sur une longueur de 37,6 km (Stryjenska, 1987). La Venoge se caractérise par un régime torrentiel fortement influencé par les précipitations et la fonte des neiges. Le débit annuel moyen enregistré de 1980 à 2004 est de 4,3 m³/s avec un écart-type de 1 m³/s.

Le dispositif de suivi comprend : un limnigraphe, installé par l'Office Fédéral de l'Environnement qui enregistre en continu les débits. Sur le même site, le SESA a installé un préleveur automatique qui réalise un prélèvement « asservi » au débit : les prélèvements séquentiels sont ajustés en fonction du débit, 8 mL sont prélevés par cycle et l'intervalle de pompage est calculé selon un indice du débit ajusté chaque semaine. Les échantillons sont stockés à 4°C et à l'obscurité. Les campagnes d'échantillonnage sont généralement réalisées sur une période d'une semaine.

Actuellement, le bassin versant compte près de 53.000 habitants répartis sur 53 communes soit une densité moyenne de 223 hab/km². Le tourisme y occupe une place importante puisque la population saisonnière représente près de 10 % de la population permanente. On dénombre également 22 Stations d'EPurations (STEP) déversant leurs eaux dans la Venoge dont la première d'entre elles, fut construite en 1968 et la dernière, en 1996.

La SESA procède à un état des lieux du réseau d'assainissement du bassin versant de la Venoge depuis 1973 à intervalle de temps régulier, en suivant le nombre total d'habitants par commune et le nombre de personnes raccordées ou non aux STEP.

Les analyses disponibles au niveau des deux sites d'études portent sur : les différentes formes d'azote (N-NH₄, N-NO₃), les différentes formes de phosphore (brut : PTeb, eau filtrée : PTEf, Orthophosphate : P-PO₄, particulaire : Ppart) et les paramètres physico-chimiques de base : la conductivité, Cl⁻, les matières en suspension (MES). Les protocoles analytiques pour le site INRA suivent les normes AFNOR. De plus les protocoles analytiques des deux services d'analyses sont annuellement soumis aux analyses inter - laboratoires organisées par le groupe « Méthodologique » de la CIPEL (Strawczynski 2005).

4 Résultats

4.1 Foron

4.1.1 Bilan des apports ponctuels au moyen d'enquêtes :

L'ensemble des informations obtenues sur le système d'assainissement et les charges permet un calcul des apports ponctuels à la rivière en 1993 et 2003 (tableau 1). L'augmentation du nombre total d'habitant (31% en 10 ans) se fait sans amélioration notable du système d'assainissement, jusqu'au transfert hors du bassin des eaux usées dirigées précédemment vers la STEP de Bons (fin 2003). En dix ans le nombre d'habitants raccordés à la STEP de Bons a augmenté de 53% et celui des rejets industriels ont pratiquement doublé. La STEP de Bons en 2003, rejette 3600 kgP/an, soit près de 80% des apports ponctuels connus.

	Nombre d'habitants dans le B.V.	Ratio P (gP/EH/j)	STEP de Bons			Lagunage de Brenthonne			Systèmes autonomes			Total rejeté (kgP/an)
			Nombre d'habitants	Rejets Industriels (kgP/an)	Rendement épuratoire %	Nombre d'habitants	Rejets Industriels (kgP/an)	Rendement épuratoire %	Nombre d'habitants	Rejets Industriels (kgP/an)	Rendement épuratoire %	
1993	5100	2,9à 3,1	2160	650	10	500	100	20	530	20	10	3700à 3900 ⁿ
2003	6700	2 à 2,2	3300	1200	5	645	65	15	755	30	10	4400 à 4730

Tableau 1 : Bilan des apports ponctuels estimés à partir des enquêtes

Les apports ponctuels à la rivière en 10 ans, augmentent de 20% du fait l'accroissement de la population et du taux de raccordement. La baisse de la consommation de TPP (>50%), constatée par des études menées par Tusseau et Villemin (2002) ou Bosc et Lascombe (2003), ne suffit donc pas à compenser ces tendances liées à l'urbanisme galopante.

4.12 Bilan des apports ponctuels au moyen des relations concentration / débit

La figure 1 présente les relations flux (moyen hebdomadaire) /débit (moyen hebdomadaire) obtenus en compilant l'ensemble des semaines de tarissement des périodes étudiées.

Année	Flux (tonne P /an)			
	P-PO4	+/-	PTeb	+/-
90-93	3,59	0,11	4,06	0,15
02-03 (avant)	1,68	0,04	2,61	0,09
03-05 (après)	0,54	0,03	0,98	0,07

Tableau 2 : Estimations des apports ponctuels

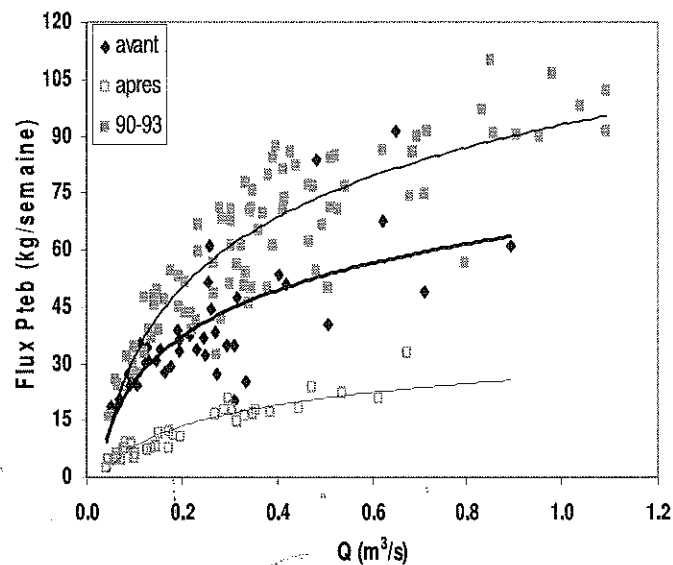


Figure 1 : Relation flux en phosphore -débit lors des tarissements

L'apparente contradiction des relations flux /débit 90 – avant avec les résultats des enquêtes peuvent être expliquées : d'une part par la baisse des TPP dans les produits détergents et d'autre par les mesures 02-03 qui ont été réalisées après deux années à l'hydrologie très importante. Les crues évacuent les stocks, renouvellent les sédiments et biofilms, qui sont les points de fixation du phosphore de la rivière. D'où une rétention du P particulièrement élevée lors des semaines de tarissements succédant aux fortes crues.

Avec les coefficients des courbes de tendances déduits de la figure 1 et le débit limite (déterminé graphiquement, par approches successives) nous pouvons définir le flux moyen hebdomadaire et l'extrapolé à l'échelle annuelle. Les rejets ponctuels sont déduits en retranchant la valeur du bruit de fond, estimé à partir des teneurs en P caractéristiques des zones naturelles et agricoles en tarissement. L'arrêt des rejets de la STEP de Bons se traduit de façon nette sur le flux de P (divisé par 2,5) (tableau 2), le suivi des flux au cours du temps (Quétin 2005) montre que le nouvel état dynamique s'installe très rapidement, l'inertie du système de transfert est donc faible.

4.13 Bilan de P à l'exutoire (comparaison avec d'autres composés) :

Afin de pouvoir comparer l'effet des rejets de la STEP sur le bilan au niveau de l'exutoire nous considérons les exportations totales de novembre à novembre (tableau 3).

	Pluie	Débit moyen	MES	P Teb	P tef	P part	PO ₄	NH ₄	NO ₃	Cl
	mm	m ³ /s	tonnes/an							
Moyenne 90-93	882	0,65	1600	4,58	3,25	1,35	2,96	0,95	38,6	211
2002-2003	892	0,78	2100	4,86	2,47	2,39	2,08	1,52	39,6	303
Moyenne 03-05	843	0,47	1121	2,18	1,02	1,17	0,81	0,54	34,1	280

Tableau 3 : Bilan comparatif des flux annuels moyens pendant les périodes novembre – novembre

Les périodes considérées ont sensiblement la même pluviométrie moyenne, mais des répartitions différentes : l'année 2002 est particulièrement humide, 2003 particulièrement sèche, et l'été 2004 et 2005 offre un nombre important d'événements pluvieux participant peu à l'hydrologie.

L'arrêt des rejets de la STEP est marqué par une baisse nette du flux annuel de P tef, P-PO₄ et NH₄, alors que les flux de NO₃ et Cl⁻, varient peu. Une analyse plus détaillée du régime d'exportation montre que ces diminutions de flux annuels à l'exutoire ne sont pas dues à un régime hydrologique exceptionnel mais bien à l'arrêt des rejets.

4.2 Venoge

Les STEP regroupent en général plusieurs communes. Mais dans ce bassin versant de nombreux cas particuliers apparaissent : une STEP extérieure BV déverse ses rejets dans la Venoge. Les communes du BV se trouvant le plus proche de l'exutoire sont raccordées quant à elles, sur les STEP de Morges ou Lausanne (hors BV de la Venoge). Une petite partie de la population est en assainissement individuel. Enfin, certaines communes sont raccordées à plus d'une STEP. Du fait de ces cas particuliers, le taux de raccordement n'est pas simplement le rapport entre la population raccordée sur le bassin versant et la population totale.

Le traitement de l'ensemble des informations disponibles nous amène à une vue d'ensemble de l'assainissement présentée par le tableau 4.

Années	Population totale du B.V.		Population raccordée sur le B.V.		Taux de raccordement		Nombre de STEP
	Permanente	Saisonnière	Permanente	Saisonnière	Population permanente	Population saisonnière	
1973	31287		6464		20.7%		8
1977	34406		17046		42.3%		13
1981	37526		17046		42.8%		13
1984	39865		17660		79.5%		15
1985	40665		20506		87.6%		15
1990	45025		24758		93.1%		16
1991	45091	4218	34337	2851	95.5%	89.1%	16
1992	47151	4218	36934	3229	97.1%	97.3%	18
1993	49259	4291	39509	4393	98.2%	97.6%	20
1994	49259	4291	39619	3426	98.6%	97.7%	21
1995	49259	4291	39762	3283	98.6%	97.7%	21
1996	49718	4356	40152	3361	98.8%	97.8%	22
1998	51239	4356	41391	3361	98.9%	97.8%	22
1999	51239	4356	41391	3361	98.9%	97.8%	22
2002	52689	4356	41472	3355	98.9%	97.8%	22

Tableau 4 : Evolution de la population totale, de la population raccordée en permanence et saisonnière, des taux de raccordements et du nombre de STEP du bassin versant de la Venoge de 1973 à 2002

De 1973 à 2002, la population raccordée permanente s'accroît : multipliée par 6, passant ainsi de 6500 à près de 41500. La mise en place de 5 nouvelles STEP, en 1977, permet de doubler le taux de raccordement de la population permanente. C'est grâce au transfert des eaux usées des communes proches de l'exutoire vers d'autres bassins versants que le taux de raccordement atteint près de 80 % en 1984. La construction de nouvelles STEP et l'amélioration du réseau d'assainissement permettent d'estimer qu'aujourd'hui le taux de raccordement est proche de 100 %. Compte tenu de l'interdiction des polyphosphates dans les produits de lavage textile (**1^{er} Juillet 1986**) et de leur limitation dans les autres détergents (2,5 gPTeb par cycle de lavage pour les lave vaisselles) et des progrès réalisés dans les procédés de déphosphatation qui ont permis d'augmenter le rendement des STEP (+ 10% pour le PTeb) et de diminuer considérablement les apports à la rivière. Alors que la Venoge recevait 4,2 tonnes de PTeb en 1989, provenant des STEP, moins de 1,5 tonnes sont apportées aujourd'hui,

Les dispositifs techniques et réglementaires mis en place pour maîtriser la pollution ponctuelle en relation avec l'évolution de la population de ce bassin peuvent être évalués par la dynamique des relations concentrations débits au cours de la période d'étude (tableau 5).

Années	Coefficient directeur a	Puissance b	R ²	Nombre de valeurs
80-82	343,7	-0,447	0,51	37
83-84	296,1	-0,557	0,84	31
85-86	239,9	-0,34	0,46	37
87-89	157,5	-0,467	0,63	43
90-91	119,5	-0,33	0,46	39
92-94	108,3	-0,2	0,49	42
95-97	73,8	-0,37	0,22	29

98-00	61.2	-0,41	0,29	36
01-02	66.5	-0,326	0,33	27
03-04	68.72	-0,396	0,59	20

Tableau 5 : Evolution des relations concentration/ débit pendant la période 1980-2004,

La baisse du coefficient, divisé par 5 de 1980 à 2004, sur toute la gamme des débits de tarissements, traduit une baisse considérable des apports ponctuels. Cette évolution est cependant irrégulière. De 1980 à 1986, le coefficient est presque divisé par 1,4, amélioration qui peut être attribuée aux progrès du taux de raccordement qui passe de 42 % en 1981 à 88% en 1985 (tableau 3). De 1985-86 à 1990-91 le coefficient directeur est divisé par 2. Dans un bassin déjà assaini à 90% ceci traduit surtout l'effet de l'interdiction des TPP dans les produits lessiviels. Enfin, depuis 1995 le coefficient directeur est relativement stable.

421 Evaluation des apports ponctuels :

Les valeurs obtenues des apports ponctuels (tableau 6) constituent probablement une estimation par défaut, légèrement sous estimée car on ne peut exclure l'existence de certains rejets d'eaux usées plus aléatoires et non associés à un rythme hebdomadaire (accidentel, déversoir d'orage).

Année	Flux (tonne P / an)			
	P-PO4	+/-	PTeb	+/-
80-82	11,1	0,41	15,1	1,00
83-84	7,9	0,18	11,7	0,67
85-86	6,0	0,29	11,1	0,94
87-89	3,5	0,17	5,9	0,43
90-91	1,1	0,04	4,7	0,48
92-94	1,7	0,17	4,8	0,56
95-97	0,5	0,03	2,2	0,28
98-00	0,4	0,06	1,4	0,20
01-02	0,5	0,04	1,9	0,27
03-04	0,7	0,10	1,8	0,24

Tableau 6 : Estimations des apports ponctuels

Cette évaluation révèle l'effet spectaculaire des mesures de maîtrise de la pollution ponctuelle prise depuis 1980. Malgré l'accroissement de la population (+68,4% de la population totale permanente sur le BV pendant la période d'étude), le doublement du taux de raccordement entre 1980 et 1986 (43 à 88 % de population raccordée) permet la suppression de 4 tonnes PTeb /an. L'interdiction des TPP en 1986 divise encore par 2 en 3 ans les apports ponctuels. La construction de 5 STEP et l'amélioration de l'assainissement (+ 5,5 % du taux de raccordement) entre 1989 et 1994 permettent la soustraction d'une tonne de P. La transformation des STEP (n = 5) pour le traitement des phosphates en 1995-96 permet la suppression d'environ 3 tonnes de PTeb. Depuis 1997, les apports ponctuels de P sont stables autour de 1,7 tonnes P/ an, soit des apports ponctuels équivalents au bruit de fond estimé.

4.22 Bilan de P à l'exutoire (comparaison avec d'autres composés) :

Année	Débit (m ³ /s)	Flux moyen annuel (tonne /an)							
		N-NH4	N-NO2	N-NO3	P-PO4	PTef	PTeb	Cl	MES
80-82	5,28	20,2	5	531	19,2	25	50,7	2 498	14 014
83-84	5,29	21,4	5	551	16	20,7	37	2 447	-
85-86	3,57	25,6	4,3	441	9	11,7	27,2	2 144	12 513
87-89	4,14	25,7	7	501	7,4	9,6	21,6	2 130	7 309
90-91	3,05	20,87	8	478	3,5	5,8	20,23	1 945	8 531
92-94	4,30	24,3	7	615	5,3	7,3	34	2 214	16 996
95-97	4,24	15,7	4,6	525	4,5	5,4	22,5	2 235	12 303
98-00	4,21	8,9	3,7	558	3,5	4	18,6	2 235	10 173
01-02	5,21	10,1	4	564	4,4	5,1	29,4	2 063	21 430
03-04	3,01	9	3	423	2,6	3,2	20,5	1 667	12 057

Tableau 7 : Evolution des flux de sorties de différents éléments.

Les débits et les flux de MES annuels varient du simple au double (données non présentées ici) sans tendance temporelle, sans pour autant que ceux-ci soient liés de façon significative avec le débit.

Dans ce contexte on peut distinguer 2 comportements types : les composés montrant une décroissance importante entre le début et la fin de la période étudiée (N-NH4, P-PO4) et ceux qui fluctuent indépendamment du temps (N-NO3, MES, Cl).

La baisse constatée surtout depuis 1997 sur le flux de N-NH4 est à rapprocher de l'amélioration de traitements des eaux usées (nitrification). Cette évolution n'affecte pas N-NO3 dont les flux sont 20 à 40 fois supérieurs à ceux de N-NH4 (et de P-PO4). L'absence d'évolution du N-NO3 avec le temps suggère que la dynamique des Modes d'Occupation des Sols (MOS), et des pratiques agricoles ont peu d'impact sur celui-ci par comparaison aux effets hydrologiques.

On retrouve évidemment une évolution du P marquée par la régression des pollutions ponctuelles : les formes dissoutes, très liées aux rejets d'eaux usées, sont les plus sensibles, la contribution des formes dissoutes aux exportations de PTeb baissent 40 % et 50 % en 80-82, 15 % en 95-04.

5 Conclusions :

- De 1990 à 2000, le BV du Foron s'est fortement urbanisée (population plus 31%), évolution qui s'accompagne surtout d'un accroissement de la pression de pollution due aux rejets domestiques et industriels. Pour P, les apports ponctuels au réseau hydrographique dument recensés, augmentent sur la période considérée d'environ 20%, ceci malgré la baisse notable (1/3) de la charge en P des rejets domestiques individuels due à la réduction des teneurs en TPP des produits détergents. Les mesures d'exportations faites à l'exutoire ne permettent pas de mettre en évidence un changement de flux relié à cette évolution, ni à l'échelle annuelle, ni en ne considérant que les périodes de tarissement homogènes au plan hydrologique. Les évolutions sont masquées par la variabilité hydrologique et les bilans difficiles à comparer en raison des marges d'erreur des divers composantes de ceux-ci (par exemple : rejets clandestins et non répertoriés). En fait, seule la baisse nette et importante (près de 3600 kg de P total par an) correspondant à l'arrêt des rejets de la STEP de Bons, a un résultat enregistrable à l'exutoire : diminution du flux annuel par 2 de PTef et changement du régime d'exportations lors des tarissements (plus grande variabilité des concentrations aux bas débits). Ces évolutions sont rapides (quelques semaines) ce qui montre : 1) une faible inertie du stockage de P due aux échanges eaux sédiments en régime de tarissement ; 2°) une évacuation rapide du P stocké lors des crues.

- Pour la Venoge, le flux annuel de P-PO₄ (comme celui de PTef et de N-NH₄) est ainsi divisé par 5 et celui de PTeb diminué de moitié entre 1980 et 2004. Sur la même période N-NO₃, MES et CI fluctuent indépendamment du temps. La baisse des flux annuels est donc une évolution spécifique du P. Elle résulte d'une maîtrise des pollutions ponctuelles associées à des mesures spécifiques de gestion du phosphore sur le bassin. Elles sont différentes de celles adoptées sur le bassin versant suisse du Rhin sur lequel Prasuhn et Sieber (2005) obtiennent, depuis l'interdiction des phosphates dans les lessives, des résultats de 20% plus faibles que ceux obtenus sur le BV de la Venoge. Le constat majeur de cette analyse est que les mesures de maîtrise des entrées ponctuelles de P prises depuis 1980 dans le bassin de la Venoge, ont eu un résultat spectaculaire et ceci, dans le contexte pourtant à priori peu favorable d'un quasi doublement de la population du bassin (actuellement 223 hab/km²). La situation habituellement décrite dans la bibliographie est celle d'une neutralisation des améliorations du système d'assainissement par l'augmentation de la population (Foy et Lennox 2000, Quétin et al 2005). Dans la Venoge depuis 1997, les apports ponctuels de P sont stables autour de 1,7 tonnes P/ an.

Les formes dissoutes de P, dominantes dans les rejets, répondent le mieux à ces évolutions des entrées. L'étude sur la Venoge confirme ce que constate Foy et al (1995), de plus grandes réductions sur P-PO₄ et PTef que sur PTeb après la suppression des TPP. D'où une meilleure connaissance sur la biodisponibilité et les modifications de spéciation de P s'imposent.

La baisse des transferts à partir des sources ponctuelles explique l'attention particulière portée désormais aux sources diffuses. Elles apportent actuellement 92 % du PTeb transférées au Léman. Cette contribution relative s'est nettement accrue sur 20 ans alors qu'en valeur absolue le flux annuel d'origine diffuse, calculé sur la base de bilans entrées/sorties, fluctue indépendamment du temps autour d'une moyenne à environ 18 t de PTeb/an.

- L'ensemble de cette analyse repose sur une méthodologie assez classique à base de bilans partiels et annuels, établie pour des bassins de quelques dizaines de km². La possibilité de traiter près de 25 années sur un bassin relativement grand et diversifié fait bien apparaître une limite de la méthode utilisée pour calculer la pollution ponctuelle. Les relations concentrations débits en tarissement sur lesquelles reposent ce calcul sont plus ou moins statistiquement significatives selon les années. En raison de la taille du bassin et de la dispersion des points de rejets, une mesure intégrée à l'exutoire des flux ponctuels sur un pas de temps court subit une variabilité importante. De fait la qualité de la mesure dépend du débit et donc en partie du régime hydrologique de l'année.

6 Bibliographie :

- BOSC N. et LASCOMBE C., (2003) : Impact des actions de lutte contre l'eutrophisation sur quelques cours d'eau du bassin Rhône Méditerranée Corse. AGENCE DE L'EAU Rhône Méditerranée Corse. 36p
- DORIOZ J. M., CASSEL A., ORAND A., EISENMAN K. (1998). Phosphorus storage, transport and export dynamics in the Foron river watershed. *Hydrol. Processes*, 12 : 285-309
- DORIOZ J. M., QUETIN P., LAZZAROTTO J., ORAND A. (2004). Bilan de Phosphore dans un bassin versant du lac Léman : conséquences pour la détermination de l'origine des flux exportés. *Revue des Sciences de l'Eau* 17(3) : 329-354.
- FOY R.H., SMITH R. V., JORDAN C., LENNOX S. D. (1995). Upward trend in soluble phosphorus loadings to lough neagh despite phosphorus reduction at sewage treatment works. *Water Res.* 29(4): 1051-1063
- FOY R. H., LENNOX S. D. (2000). Contributions of diffuse and point sources to the phosphorus loads in the River Main over a 22-year period. *Boreal Environment Research* 5: 27-37
- KRONVANG B., (1992). The export of particulate matter, particulate phosphorus and dissolved phosphorus from two agricultural river basin : implications on estimating the non point phosphorus load. *Water Res.*, 26, 10 : 1347-1358.
- PILLEBOUE E. (1987) Origines, bilans, mécanismes de transfert du phosphore et de l'azote d'un bassin versant à un lac. Thèse Doct. Univ. Paris 6, 250p.
- PRASUHN V., SIEBER U. (2005). Changes in diffuse phosphorus and nitrogen inputs into surface waters in the Rhine watershed in Switzerland. *Aquat. Sci.* 67 : 363-371.
- QUETIN P., BOUVIER O., LAZZAROTTO J., MOILLE J.-P., POULENARD J., DORIOZ J.-M. (2005). Effet des évolutions du mode d'occupation des sols et d'opérations de maîtrise de la pollution, sur le bilan de phosphore du bassin versant du Foron. Campagne 2004. Rapport de la Commission Internationale pour la protection des Eaux du Léman. 157-169
- SHARPLEY, A. N., T. C. DANIEL, EDWARDS. D.R., (1993). Phosphorus movement in the landscape. *J. Prod. Agric.* 6: 492-500.
- STRAWCZYNSKI A., (2005). Analyses comparative inter laboratoires. Campagne 2004. Rapport de la Commission Internationale pour la protection des Eaux du Léman. 183-193
- STRYJENSKA W. (1987). Transport du phosphore dans une rivière en crue: la Venoge, canton de Vaud, Suisse. Faculté des Sciences de l'Université de Genève, Institut F.-A. FOREL. 106p.