

# EFFETS 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

## EFFECTS OF CHANGES IN LAND USE, AND ATTEMPTS TO CONTROL POLLUTION ON THE PHOSPHORUS EQUILIBRIUM IN THE CATCHMENT BASIN OF THE FORON RIVER

Campagnes 1990-1993 et 2002-2004

PAR

Philippe QUÉTIN, Olivier BOUVIER, Jérôme LAZZAROTTO, Jean-Paul MOILLE,  
Jérôme POULENARD et Jean-Marcel DORIOZ

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

### RÉSUMÉ

Les enquêtes effectuées en 1993 et en 2003 montrent qu'en dix ans, les apports de phosphore à la rivière Foron n'ont augmenté que de 20 %. Cette évolution résulte principalement de dynamiques inverses : forte croissance de la population du bassin versant (31 %), augmentation du nombre de raccordements et des rejets industriels (75 %), baisse de la quantité de P domestique rejetée par individu (due à une limitation progressive des teneurs en TPP des détergents). Parallèlement les exportations mesurées à l'exutoire fluctuent en fonction des conditions hydrologiques.

Le transfert en 2003, des rejets de la station d'épuration de Bons hors du bassin versant (80 % des apports ponctuels répertoriés, soit près de 3'600 kg de P total par an, équivalent au minimum à 1/3 du P exporté) fournit une situation privilégiée pour tester en vraie grandeur, l'inertie du système rivière vis-à-vis des exportations du P et la sensibilité des méthodes et des indicateurs utilisés pour évaluer le bilan d'un bassin.

### ABSTRACT

The surveys carried out in 1993 and in 2003 have demonstrated that over these ten years the input of phosphorus into the River Foron increased by only 20 %. This has been the outcome of several disparate trends : a considerable increase in the human population in the catchment area (31 %), an increase in the number of connections to the sewerage system and industrial discharges (75 %), and a fall in the per capita discharge of domestic phosphorus (due to the progressive lowering of the permitted TPP contents of detergents). Over the same period, the outputs measured at the outflow have fluctuated, depending on the hydrological conditions.

The transfer in 2003, of discharges from the Bons waste water treatment plant out of the catchment basin (80 % of the specific inputs recorded, i.e. nearly 3'600 kg of total P per year, equivalent to at least 1/3 of the P discharged) has provided an exceptional opportunity to carry out a life-sized trial, to determine the inertia of the river system with regard to outputs of P, and the sensitivity of the methods and the indicators used to assess the net movements in the catchment basin.

## 1. INTRODUCTION

Pour évaluer ou réactualiser la stratégie mise en place pour maîtriser la pollution du Léman par le phosphore, il est utile de déterminer périodiquement la contribution relative des diverses sources au transfert du phosphore (P) des bassins versants au lac. C'est dans cette perspective que nous avons reproduit, en 2002-2005, le bilan de P effectué, en 1990-1993, dans le bassin versant du Foron (un bassin de 48 km<sup>2</sup>, en Haute-Savoie, sur le versant sud du Léman, représentatif des conditions du "Bas Chablais").

En 2003, un événement majeur modifie ce bilan : l'arrêt des rejets de la station d'épuration (STEP) de BONS (capacité de 2'700 EH) et l'exportation hors du bassin de près de 3'600 kg de P total par an, soit 1/3 du flux total annuel à l'exutoire. Cet événement fournit une occasion assez exceptionnelle pour évaluer :

- l'inertie due au stockage dans les sédiments, du P total provenant des apports ponctuels (DORIOZ et al., 1998,
- la sensibilité de certains indicateurs utilisés pour caractériser les bilans ou les régimes d'exportation (relations concentrations - débits notamment).

Pour mesurer l'impact de cet événement et pour comparer les bilans, nous disposons d'un suivi hydrochimique à l'exutoire (prélèvement automatique intégré avec échantillons moyens proportionnels au débit) et d'enquêtes sur l'état du bassin (assainissement, occupation des sols).

## 2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

- ▶ Le bilan du 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 biodisponibles. 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). Ces conditions sont rarement remplies dans nos bassins ruraux où la dispersion spatiale des points de rejets est la règle. En conséquence, les apports ponctuels sont en général évalués à partir d'un calcul intégrant des données d'enquêtes (nombre d'habitants par exemple) et des ratios (quantité de P total émise par jour et par habitant). Ce type d'approche, appliqué en 1990-93 sur le bassin du Foron, a été reconduit en 2002-2004 pour caractériser l'évolution de cette composante majeure du bilan de P total du bassin lémanique qu'est la pollution ponctuelle.

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 leur 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 de P ne repose pas (sauf exception) sur une technologie, mais sur la gestion des sols. Difficiles à localiser et à prévoir, les sources diffuses de P 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. A titre d'exemple, sur le bassin versant du Mercube (petit bassin de 300 ha, pas très éloigné géographiquement du Foron, avec une dominance céréalière), le "flux spécifique" varie sur 10 ans, de 0.3 à 1 kg/ha.an de P total selon l'hydrologie. L'approche en flux spécifiques peut être utile pour de grands bassins mais ne fournit qu'un ordre de grandeur à manipuler avec précautions s'il s'agit de raisonner des impacts et des évolutions qui, en ce qui concerne le diffus, sont probablement très lentes.

Bilans et flux spécifiques sont généralement présentés en Ptotal, alors que l'impact d'un apport dépend aussi de caractéristiques qualitatives se rapportant aux formes du P transférées (particulaire, dissous, organique, minéral). Dans la mesure où une spéciation exhaustive est impensable pour le Ptotal des eaux, les caractérisations proposées partent de considérations opérationnelles. Le tableau 1 (d'après LOGAN, 1982 modifié) fournit un exemple, celui adopté pour ce travail et par la CIPEL.

Tableau 1 : Spéciations du phosphore (les formes prises en compte sont en gras).

Table 1 : Species of phosphorus (the species taken into account are shown in bold).

	Fraction désignée	Grandes caractéristiques chimiques	Biodisponibilité potentielle en conditions standard
P total - eau brute <b>(P tot)</b>	P total - eau filtrée <b>(Ptotal ef)</b> ( $< 0.7 \mu\text{m}$ )	Orthophosphate ( <b>P-PO<sub>4</sub></b> ) P- organique Triphosphosphate Colloïdes fins	Forte et immédiate
	P particulaire <b>(P part)</b> ( $> 0.7 \mu\text{m}$ )	P "labile" adsorbé, facilement échangeable ou hydrolysable ou solubilisable	Forte et à court terme
		P minéral relativement stable participant souvent à des composés avec Fe, Ca, Al	Très variable et à long terme
		P organique relativement stable participant à des molécules humiques	Moyenne et à long terme

- ▶ Enfin, la spéciation du phosphore, 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, apportée 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 dans le Foron (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. Le détournement hors bassin d'une partie des eaux usées rejetées au Foron, nous permet de tester cette hypothèse et au-delà de valider les bilans et d'en discuter les indicateurs.

### 3. LE BASSIN VERSANT DU FORON

#### 3.1 Le site d'étude

##### 3.1.1 Géographie

Partie intégrante du bassin lémanique, le bassin versant du Foron se trouve à une dizaine de kilomètres à l'ouest de Thonon-les-Bains (figure 1). Son territoire est limité au nord par le Léman, à l'est par le bassin versant du Redon, au sud par les Préalpes et le Massif des Voirons (1'480 m) et à l'ouest par le Mont de Boisy (740 m). Il s'étend sur six communes (Ballaisson, Bons en Chablais, Brenthonne, Fessy, Lully et Sciez) et peut se décomposer en trois zones géographiques principales :

- une partie amont pentue et forestière (10 %),
- une partie médiane moins pentue, plus urbanisée et agricole (élevage à base d'herbages) (25 %),
- une partie aval plane et boisée (65 %).

Au plan géologique ce territoire est caractérisé par la grande prédominance d'argile à blocs quaternaire, laissant rarement apparaître le substratum. Il s'agit donc globalement d'un bassin versant présentant une surface peu perméable (VIAL, 1976).

D'une superficie voisine de 50 km<sup>2</sup> au point de prélèvement, le bassin versant du Foron est marqué par l'importance des boisements (56 %). Les terres agricoles recouvrent environ 37 % de la surface; l'urbanisation et les infrastructures (routes, ...) ne sont pas négligeables (7 %).

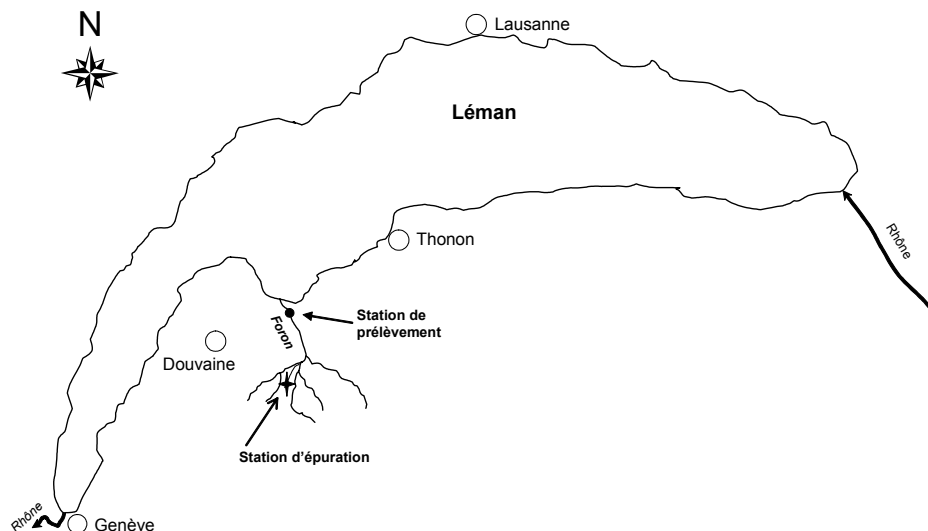


Figure 1 : Carte de situation du bassin du Foron.  
 Figure 1 : Map showing the location of the Foron basin.

##### 3.1.2 Dispositif et analyses

Le dispositif de suivi comprend : un limnigraphe, installé par la D.I.R.E.N. Rhône-Alpes, qui enregistre en continu les débits. Sur le même site, nous avons 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.

Sont mesurés : les différentes formes de phosphore (tableau 1) et les paramètres physico-chimiques de base, la conductivité, le pH, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, les matières en suspension (notées MES) et le carbone organique dissous (noté COD). Les protocoles analytiques suivent les normes AFNOR (tableau 2).

Tableau 2 : Normes AFNOR.  
 Table 2 : Normes AFNOR.

Paramètre	Conductivité à 25 °C	pH	Phosphore	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	MES	COD
Norme	NF EN 2788 / ISO7888	NF T90 -008	NF EN 1189	NF T 90 -015	NF EN ISO 26777	NF EN ISO 10304 -1	NF EN 872	FD T 90 - 102

Le chlorure est dosé en chromatographie ionique et le nitrate en colorimétrie. La détermination du phosphore total sur eau filtrée (noté P<sub>tot ef</sub>) et celle de l'orthophosphate (noté P-PO<sub>4</sub>) est réalisée après filtration à 0.7 µm. Une étude menée au laboratoire de chimie (VAUTEY, 2003) a permis de vérifier qu'il n'existe pas, dans notre contexte hydro-chimique, de différence significative sur les résultats de dosage après filtration à 0.45 ou à 0.7 µm. Les échantillons pour le phosphore total sur eau brute (P<sub>tot</sub>) et pour le phosphore total sur eau filtrée (P<sub>tot ef</sub>) subissent une hydrolyse acide à haute température selon MENZEL et CORVIN (1965) avant une détermination spectrophotométrique selon MURPHY et RILEY (1968). L'orthophosphate est dosé directement après filtration selon le même protocole MURPHY et RILEY (1968). Les résultats sont exprimés en phosphore élément (mgP/L). La différence P<sub>tot</sub> - P<sub>tot ef</sub> représente le P particulaire (P<sub>part</sub>). L'ensemble des méthodes d'analyse utilisées est validé 2 fois par an par des analyses interlaboratoires (STRAWCZYNSKI, 2004). Les informations permettent de calculer les flux de P exportés à l'exutoire, pour les périodes allant de 1990 à 1993 et pour les années 2002 à 2004.

### 3.2 Caractérisations hydroclimatiques des périodes d'études

La figure 2A présente les relevés hebdomadaires de la pluviométrie du poste météorologique de Thonon et de l'hydrométrie à l'exutoire :

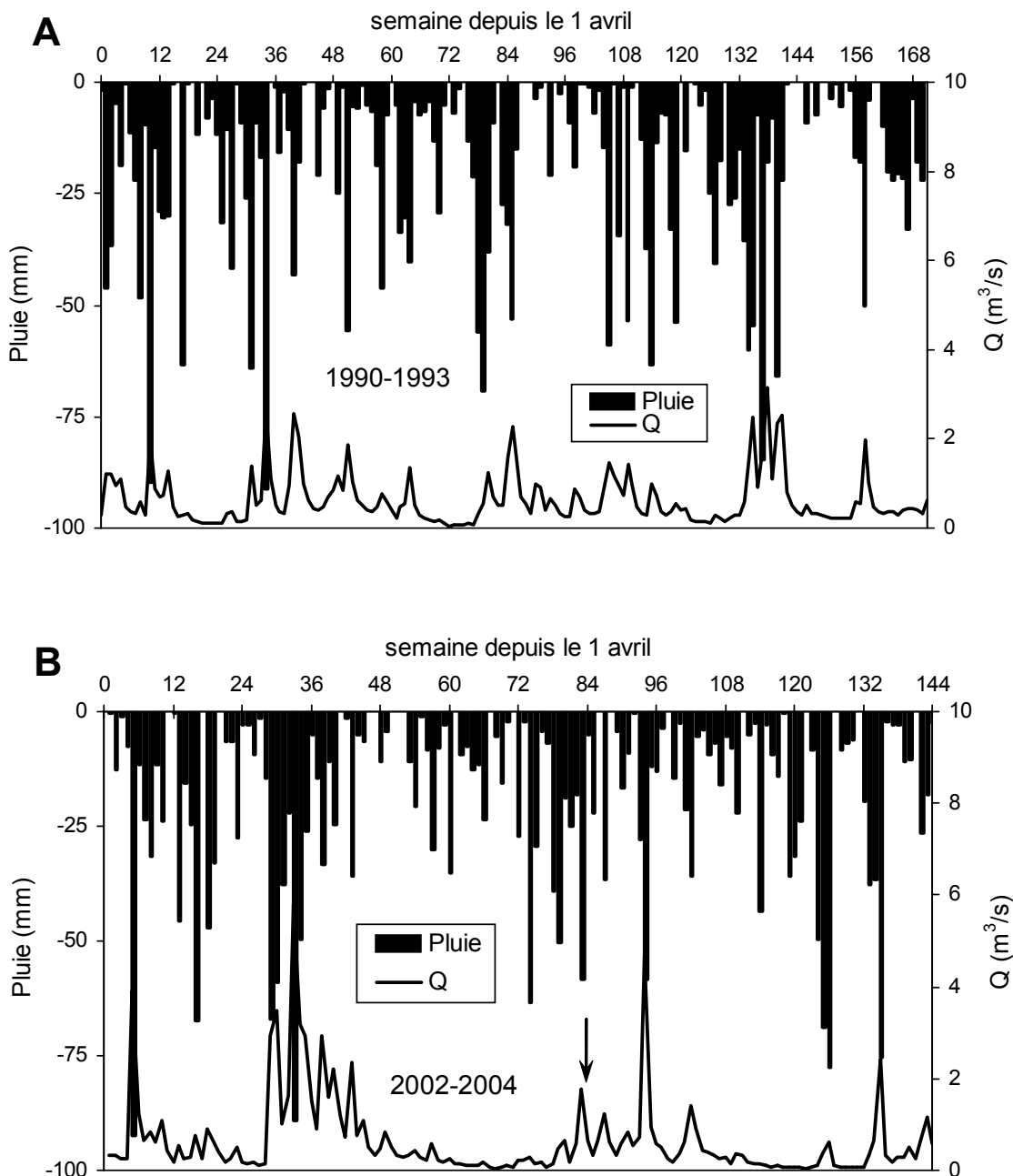


Figure 2 : Pluviogrammes et Hydrogrammes pour les périodes : A)1990-1993 et B) 2002-2004 (la flèche indique l'arrêt des rejets de la STEP).

Figure 2 : Rainfall recorder charts and hydrographs for the periods : A)1990-1993 and B) 2002-2004 (the arrow indicates, when discharges from WWTPs stopped).

Les années 2003-2004 se caractérisent par une forte sécheresse, avec des débits d'étiage (45 L/s) inconnus en 1990-1993 et paradoxalement par quelques pointes de crues particulièrement élevées. La période suivant l'arrêt des rejets de la STEP est caractérisée par une faible pluviosité avec un puissant épisode de crue survenant deux mois et demi après (le 13/01/2004 débit journalier mesuré à l'exutoire de 9.2 m<sup>3</sup>/s, figure 2b).

### 3.3 Caractérisations de l'assainissement des eaux usées

La gestion des eaux usées est connue grâce à des enquêtes réalisées auprès des différentes mairies du bassin versant, des SIVOM (du Bas Chablais et du Pays de la Côte), de la DDAF, du Conseil Général, de la Chambre d'Agriculture, des gardes de pêche, des responsables des entreprises. Des informations obtenues hors bassin versant (du Syndicat Inter-communal du lac d'Annecy, STEP de Thonon, Agence de l'eau, IFEN) et dans la bibliographie, complètent la base de données nécessaire pour la détermination des composantes du bilan (tableau 3). Le mode d'occupation des sols a été étudié à partir de photos aériennes de 1992 et de 2000 et vérifié à l'aide d'observations de terrain (2003).

Tableau 3 : Paramètres du bilan des apports au Foron.

Table 3 : Parameters used to assess net inputs into the Foron.

Type de Source		Enquêtes	Informations complémentaires obtenues dans la bibliographie
Apports ponctuels	domestiques	- Nombre d'habitants en assainissement collectif (STEP+lagonage) - Nombre d'habitants en assainissement autonome - Nombre de puits dits " perdus " - Efficacité des assainissements collectifs (STEP + lagonage) Apports ponctuels - Efficacité des assainissements autonomes	- Flux de P rejeté par habitant (gP/j)
	industriels	- Types de rejets industriels - Flux de P rejetée - Epuration de ces rejets industriels	
	agricoles	- Flux transmis au lagonage - Aucune autre information disponible	
Apports diffus	urbain	- Surface imperméabilisée	- Flux spécifique de P (kgP/ha.an)
	agricole	- Surface des pâtures - Surface des prairies de fauche - Surface des cultures	- Flux spécifique de P issu des différentes surfaces agricoles (kgP/ha.an)
	naturel	- Surface des zones naturelles	- Flux spécifique de P (kgP/ha.an)

## 4. RÉSULTATS

### 4.1 Exportations à l'exutoire : comparaisons interannuelles

Les données d'exportations sont calculées d'avril à avril (tableau 4).

Tableau 4 : Bilan comparatif des flux annuels moyens pendant les périodes avril- avril.

Table 4 : Comparative assessment of mean annual flows over the April-April period.

	Pluie	Débit moyen	MES	P tot	Ptot ef	P part	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
	mm	m <sup>3</sup> /s	tonnes/an							
1990-1991	998	0.73	1'460	4.1	3.0	1.09	2.7	-	40	199
1991-1992	695	0.54	1'530	5.3	3.5	1.78	3.3	0.9	35	212
1992-1993	954	0.69	2'800	4.4	3.2	1.15	2.9	1.0	39	222
2002-2003	1025	1.06	5'210	8.5	3.2	5.28	2.6	1.7	51	357
2003-2004	691	0.50	1'570	3.6	1.8	1.82	1.5	0.8	40	277

Remarquable au plan hydrologique avec un débit moyen 30 % supérieur à la moyenne, l'année 2002-2003 se singularise également par une exportation exceptionnelle de MES (x2) et de P part (x4) ce qui résulte de conditions particulièrement favorables au ruissellement et à l'érosion. Une part importante des exportations du P part se faisant lors des crues, on peut relier la différence des flux moyens annuels, entre les années 1990-1993 et la période 2002-2003, à un nombre de semaines de crues plus élevé (6 semaines supérieures à 3 m<sup>3</sup>/s répertoriées en 2002-2003 contre 1 seule en 1990-1993) et des débits de crue plus importants (le maximum hebdomadaire pour 2002-2003 est de 5.8 m<sup>3</sup>/s, pour 1990-1993 il est de 3.1 m<sup>3</sup>/s). On note aussi un accroissement relatif de flux annuels par ailleurs assez stables, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et Cl<sup>-</sup>. Seuls P<sub>tot</sub> et P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> sont dans le même ordre de grandeur que les valeurs enregistrées dans les années 90. Ceci signale une relative indépendance des dynamiques d'exportation du P particulaire et des formes de P dissous.

L'année 2003-2004 se caractérise par un retour à la normale en terme de flux exporté d'eau, de MES, P part et par une baisse du P dissous (P<sub>tot</sub> et P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) associée à l'arrêt des rejets de la STEP en novembre. L'effet de cet événement sera détaillé ultérieurement.

## 4.2 Evaluation des entrées dans le réseau hydrographique

### 4.2.1 Inventaire des sources de phosphore

L'inventaire des sources du bassin du Foron permet de dresser un schéma de transfert qui reste valable quelque soit la période d'étude (figure 3). Le Foron offre un fonctionnement assez banal avec une grande diversité de sources et de connections. Deux installations de traitement des eaux usées sont recensées sur le bassin du Foron, le reste des rejets se faisant soit à partir d'assainissements autonomes, soit en rejets sauvages :

- La station d'épuration à boues activées de Bons-en-Chablais est en activité depuis 1978, elle a reçu en 2003, les eaux usées d'environ 3'300 habitants ainsi que celles d'une zone industrielle, alors que sa capacité nominale est de seulement 2'700 équivalents-habitants (EH). La suppression de cette STEP avec basculement hors du bassin versant de ses eaux usées est effective depuis novembre 2003. Le rendement est estimé entre 5 et 10 %.
- Le lagunage de Brenthonne, mis en service en 1985, a été dimensionné pour 1'700 EH ; son rendement épuratoire vis-à-vis de P (15 %) a été contrôlé en 2002.

Toutes les grandes catégories d'activités humaines fournissent aussi un réseau hydrographique des sources diffuses (il existe aussi du diffus urbain). La quantité de P<sub>total</sub> apportée au réseau par chacune des sources peut être évaluée comme le produit d'une quantité fournie, par un taux de transfert.

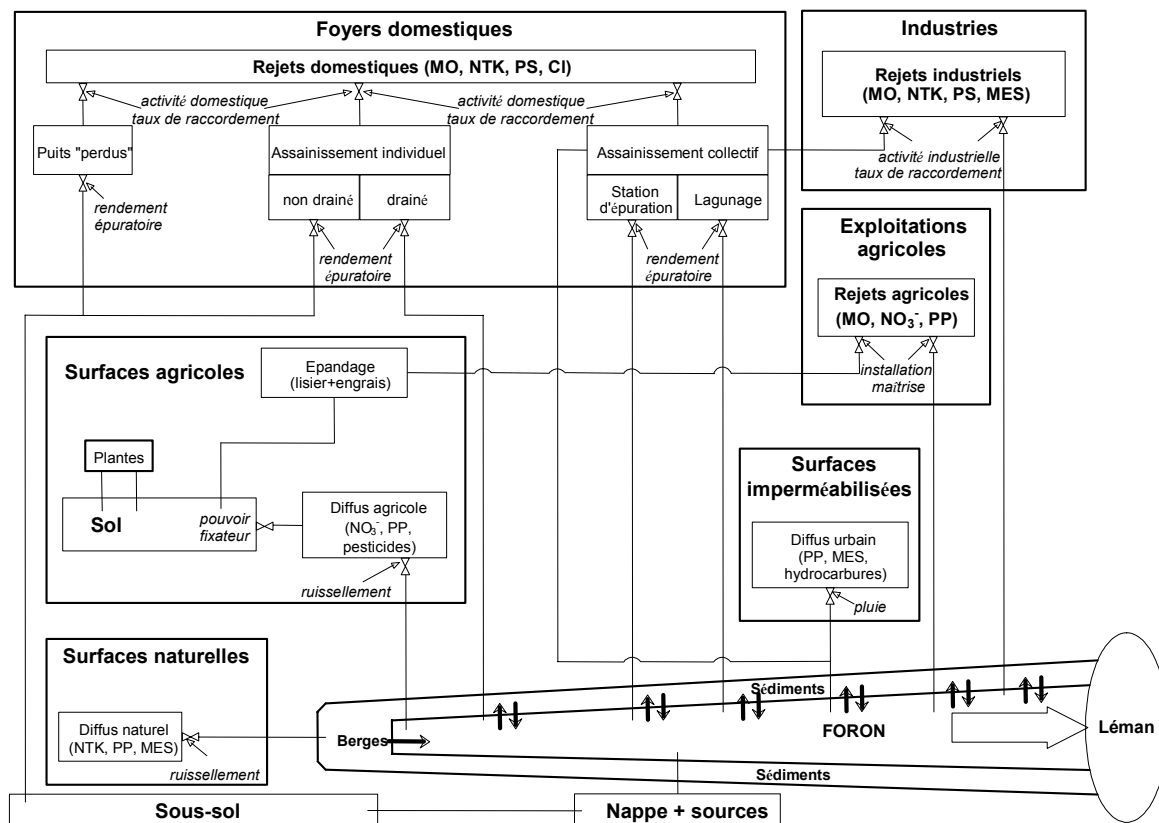


Figure 3 : Schéma des transferts de phosphore d'un bassin versant (type du Foron).

Figure 3 : Diagram showing the transfer of phosphorus out of a catchment basin (Foron model).

### 4.2.3 Evaluation et évolution des apports diffus

Les flux spécifiques de Ptotal sont évalués sur la base des valeurs fournies par DORIOZ et TRÉVISAN (1997) pour le contexte lémanique (tableau 5). Nous considérons que ces valeurs moyennes n'ont pas changé en 10 ans, c'est-à-dire qu'il existe une relative stabilité des pratiques de culture, ce que confirme le conseiller agricole local. Les évolutions du P diffus ne dépendent donc que de changements dans l'occupation des sols.

Tableau 5 : Les apports diffus, comparaison des évaluations 1993 et 2003.

Table 5 : Diffuse inputs, comparison of values found for 1993 and 2003.

Mode d'occupation des sols	Surfaces imperméabilisées	Surfaces agricoles			Surfaces naturelles	P diffus total entrant dans le réseau hydrographique
		pâtures	Prairies de fauche	cultures		
Flux spécifiques de P- total (kgP/ha.an)	0.5 à 1.5	0.1 à 0.2	0.4 à 0.5	0.7 à 2.5	0.1 à 0.2	
<b>1993</b> Surface en ha	325	1'220	370	385	3'000	1'000 à 2'450
Flux (kgP/ha.an)	160 à 490	120 à 240	150 à 190	270 à 930	300 à 600	
<b>2003</b> Surface en ha	380	1'210	370	370	3'000	1'020 à 2'530
Flux (kgP/ha.an)	190 à 570	120 à 240	150 à 190	260 à 930	300 à 600	

Les apports diffus annuels moyens apportés au Foron évoluent peu. Par contre on note un accroissement net du diffus urbain (+17 %). La surface agricole, principale contributrice varie peu (-2 %). Bien entendu ces chiffres ne donnent que des ordres de grandeurs moyens. Une étude (AQUAE, 2004) confirme que les apports provenant des nappes et sources sont faibles et n'ont pas varié au cours des deux périodes d'études, ce qui suggère un bruit de fond faible mais constant.

### 4.2.4 Apports ponctuels

#### ► Evolutions des quantités de phosphore rejetées par individu

Les rejets du métabolisme humain selon BILLEN *et al.*, 1999 (cités par TUSSEAU-VILLEMIN, 2002) tournent autour de 1.2 gP/EH.j (idem pour FOY *et al.*, 1995). Cette valeur est relativement basse comparativement à d'autres données bibliographiques, qui situent les rejets métaboliques autour de 1.5 à 2 gP/jour (PILLEBOUE, 1987). Quoiqu'il en soit ces rejets ont peu varié en 10 ans dans les pays développés. La situation est différente pour les rejets de Ptotal dus aux produits détergents. La contribution aux apports de P varie selon la législation en vigueur : de 0.2 gP/EH.j, selon GRAY et BECKER (2002) en Australie, où la législation interdit les phosphates dans les détergents, jusqu'à 2 gP/EH.j, en France, dans les années 80-90, au pic d'usage des tripolyphosphates (TPP). Depuis une dizaine d'années une baisse des TPP, liée à l'évolution du marché européen est constatée (CLERC et LASCOMBE, 2004) et provoque une évolution à la baisse de la charge totale en P. Parallèlement la charge spécifique totale azotée a peu varié au cours du dernier siècle (cf. BILLEN *et al.*, 1999). Elle se stabilise autour d'une valeur physiologique de 12.5 g/EH.j. En conséquence en connaissant pour une station d'épuration les charges journalières d'azote total (N) et de phosphore total on peut en déduire la quantité de P total rejeté par habitant (TUSSEAU VILLEMIN *et al.*, 2002). La charge de pollution traitée par une station d'épuration peut être calculée en nombre d'équivalents-habitants à partir du rapport suivant :

$$EH = \frac{NTK}{12.5} \quad \text{avec } NTK = \text{charge entrante journalière en azote Kjeldalh, en gN/j}$$

La quantité de phosphore rejetée ( $R_p$ ) par habitant et par jour s'obtient alors en appliquant :

$$R_p = \frac{Pt}{EH} \quad \text{avec } Pt = \text{charge entrante journalière en phosphore total, en gP/j}$$

Cette méthode est appliquée pour les charges entrantes journalières des stations d'épuration de Thonon-les-Bains et d'Annecy pour chaque année de la période allant de 1993 à 2003 (figure 4).

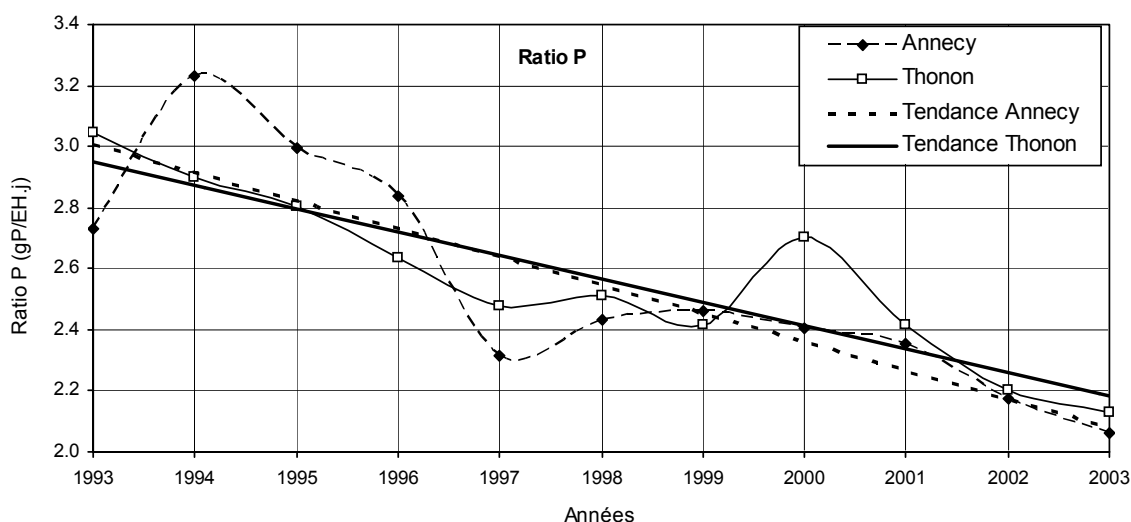


Figure 4 : Evolution de la quantité journalière émise par individu.  
 Figure 4 : Change in the daily *per capita* discharge.

La quantité journalière moyenne de phosphore rejetée par équivalent habitant fluctue plus ou moins au cours de ces dix dernières années autour d'une tendance moyenne significativement décroissante (les responsables de ces stations attribuent les fluctuations à des variations de l'activité industrielle). En moyenne, la charge par habitant décroît de 2.7 - 3.2 gP/EH.j dans les années 1993-95, à 2.0 - 2.2 gP/EH.j. TUSSEAU-VILLEMIN et al. (2002) obtiennent des valeurs du même ordre de grandeur (1.9 à 2.3 gP/EH.j) pour 2 stations en région parisienne. Seule une diminution de la charge liée aux détergents peut expliquer cette évolution. L'étude menée par BOSCH et LASCOMBE (2003) évalue à 50 % en 10 ans la baisse de la consommation des phosphates lessiviels en France, d'où une baisse équivalente des rejets.

► **Bilan des apports ponctuels**

L'ensemble des informations obtenues sur le système d'assainissement (figure 3) et les charges (figure 4) permet un calcul des apports ponctuels à la rivière en 1993 et 2003 ( tableau 6). Pour ce calcul, nous prenons comme quantité journalière de phosphore rejetée par habitant pour 1993 la valeur de  $3 \pm 0.1$  gP/EH.j et  $2.1 \pm 0.1$  gP/EH.j, pour 2003.

L'augmentation du nombre total d'habitants (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). 2000 personnes n'ont pas leurs eaux usées traitées par une installation. En dix ans le nombre d'habitants raccordés à la STEP de BONS a augmenté de 53 % et celui des rejets industriels qui y sont raccordés ont pratiquement doublé. La STEP de BONS en 2003, rejette 3600 kgP/an, soit près de 80 % des apports ponctuels connus.

Tableau 6 : Bilan des apports ponctuels.  
 Table 6 : Assessment of specific inputs.

	Nombre d'habitants dans le B.V.	Ratio P (gP/EH.j)	STEP de BONS			Lagunage de BRENTONNE			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	5'100	2.9 à 3.1	2'160	650	10	500	100	20	530	20	10	3'700 à 3'900
2003	6'700	2.0 à 2.2	3'300	1'200	5	645	65	15	755	30	10	4'400 à 4'730



### 4.3 Evolution du bilan entrée - sortie

Les données sur les entrées estimées et les mesures de flux peuvent être comparées (tableau 7).

Tableau 7 : Bilan des entrées.

Table 7 : Assessment of inflows.

	Apports en P total (kgP/an)					
	Période 1990 - 1993			Période 2002 - 2003		
	mini.	moyenne	maxi.	mini.	moyenne	maxi.
Rejets ponctuels	3'700	3'800	3'900	4'400	4'650	4'720
Apports diffus	1'000	1'720	2'450	1'020	1'800	2'500
Entrée : total estimé	4'700	5'520	6'350	5'420	6'450	7'220
Exportations moyennes mesurées à l'exutoire	4'600			8'500		

Les apports ponctuels à la rivière dominent largement les apports diffus (en moyenne 70 % du total en 2003) et en 10 ans, augmentent de 20 % du fait de l'accroissement de la population et du taux de raccordement. **La baisse de la consommation de TPP (> 50 %) ne suffit donc pas à compenser ces tendances liées à l'urbanisation galopante.**

Si l'on compare les entrées totales estimées avec les sorties totales mesurées, la situation est différente selon les époques mais aucune estimation n'est catastrophiquement différente. Les chiffres estimés s'écartent de 50% du mesuré moyen dans le scénario le plus pessimiste. Il faut aussi considérer pour apprécier ce résultat, que les valeurs de flux mesurés sont associées elles aussi à une incertitude (souvent évaluée à 10 ou 20 %).

Dans le détail, en 1990-1993 les sorties à l'exutoire sont au niveau de l'estimation basse des entrées ce qui pourrait traduire probablement une surestimation du diffus. Par contre pour 2002-2003 les mesures à l'exutoire sont supérieures à l'évaluation maximaliste. Cet écart peut être mis en relation avec le niveau exceptionnel des crues et des exportations de P part lors de cette période, ce dont les flux spécifiques ne peuvent rendre compte.

## 5. EFFETS DE LA MODERNISATION DE L'ASSAINISSEMENT SUR LE BILAN DE P À L'EXUTOIRE ET LE RÉGIME D'EXPORTATION

### 5.1 Effet sur le bilan

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

Tableau 8 : Bilan comparatif des flux annuels moyens pendant les périodes novembre - novembre.

Tableau 8 : Comparative assessment of the annual flows for the November - November periods.

	Pluie	Débit moyen	MES	P tot	Ptot ef	P part	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
Moyenne	mm	m <sup>3</sup> /s	tonnes/an							
1990-1993	882	0.65	1'600	4.58	3.25	1.35	2.96	0.95	38.6	211
2002-2003	892	0.78	2'100	4.86	2.47	2.39	2.08	1.52	39.6	303
2003-2004	925	0.49	1'400	2.51	1.10	1.41	0.88	0.57	38.2	247

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 offre un nombre important d'événements pluvieux participant peu à l'hydrologie.

L'année de l'arrêt des rejets de la STEP est marquée par une baisse nette du flux annuel de Ptot ef, P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, alors que les flux de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et Cl<sup>-</sup>, à nouveau, 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.

## 5.2 Effet sur les relations flux et concentrations débits des rejets de la STEP

Le suivi des flux au cours du temps (figure 5) permet de distinguer nettement l'effet de l'arrêt des rejets de la STEP malgré le bruitage normal dû à l'hydrologie. Ceci est surtout sensible en basses eaux. Ainsi dans la même gamme de débit ( $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ), les exportations de Ptot ef sont divisées par 2 (ramenées à environ  $50 \text{ kg/semaine}$ ) après la fermeture de la STEP le 05/11/2003 (semaine 85).

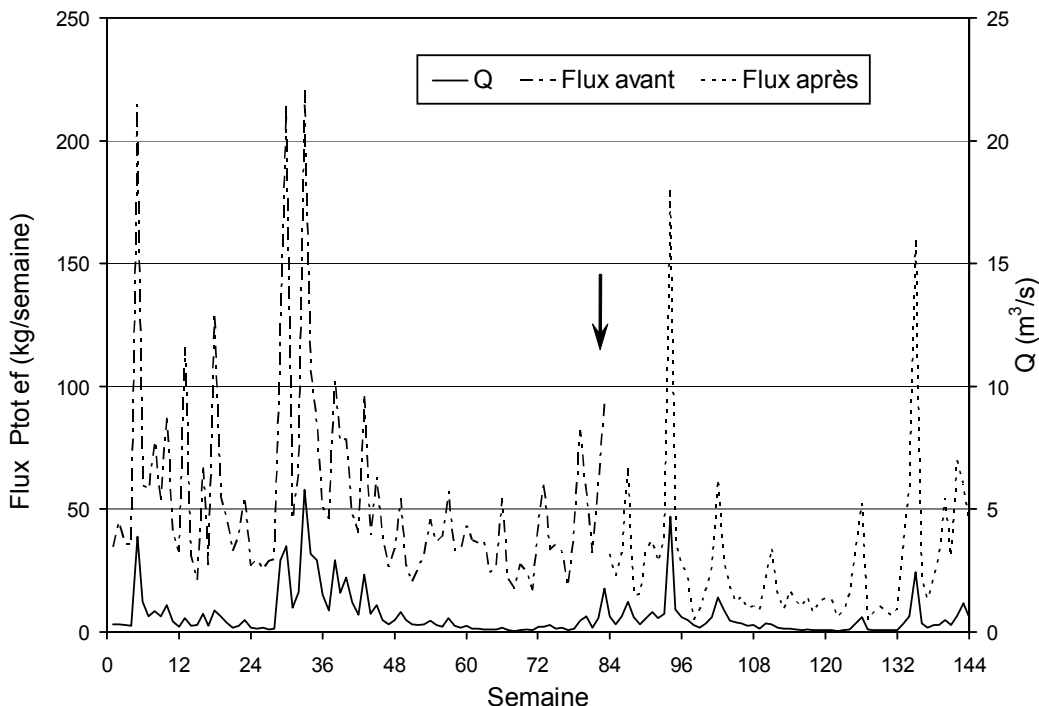


Figure 5 : Evolution du débit et du flux de Ptot ef à partir du 1 avril 2002 (la flèche indique l'arrêt des rejets de la STEP).

Figure 5 : Change in the flow rate and total phosphorus (filtered water) flow from April 1, 2002 (the arrow indicates when WWTP discharges stopped).

Une analyse plus détaillée est possible sur la base des relations flux - débits (MAY et al., 2001) et concentrations - débits (DORIOZ et al., 2004). Les relations flux - débits sont utilisées au niveau mensuel (figure 6) pour les différentes formes de P.

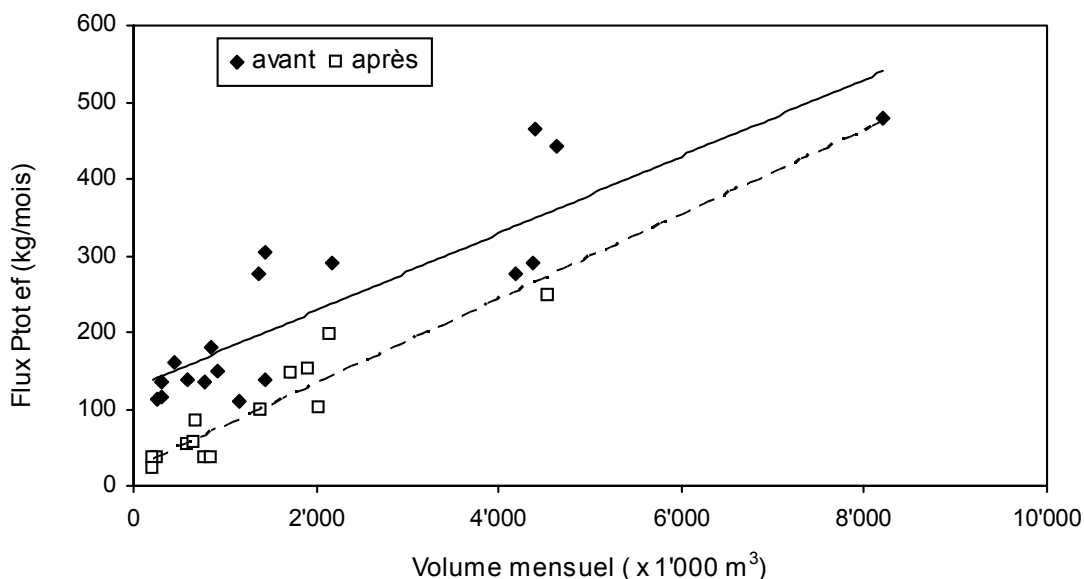


Figure 6 : Relation flux Ptot ef - débit mensuel pour la période 2002 - 2004.

Figure 6 : Monthly total phosphorus (filtered water) flow / flow rate for the period 2002 - 2004.

Les flux mensuels de P part et de P total ne présentent pas de corrélation nette avec le débit mensuel. Ceci traduit la multiplicité des sources et la grande variabilité des conditions de mobilisations de celles ci lors des crues (DORIOZ *et al.*, 1998). Le flux P<sub>tot ef</sub> (figure 6) comme celui de P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, augmente par contre linéairement avec le débit dans la gamme disponible. Une légère baisse de concentration moyenne se manifeste après l'arrêt des rejets de la STEP. En considérant l'ordonnée à l'origine, on constate un abattement marqué du flux de base (divisé par 6). Cette approche ne permet pas une interprétation plus détaillée car elle mélange divers types d'épisodes hydrologiques et donc d'origines et de modalités de transfert de P<sub>tot ef</sub> différentes. Elle montre cependant qu'il existe un effet global sur le système de transfert de P.

En ne considérant que les semaines de tarissement, on homogénéise les conditions hydrologiques. La figure 7 présente les relations concentration (moyenne hebdomadaire) - débit (moyenne hebdomadaire) obtenues en compilant l'ensemble des semaines de tarissement de la période d'étude. L'utilisation de l'inverse de la racine du débit permet la linéarisation de la courbe concentration - débit.

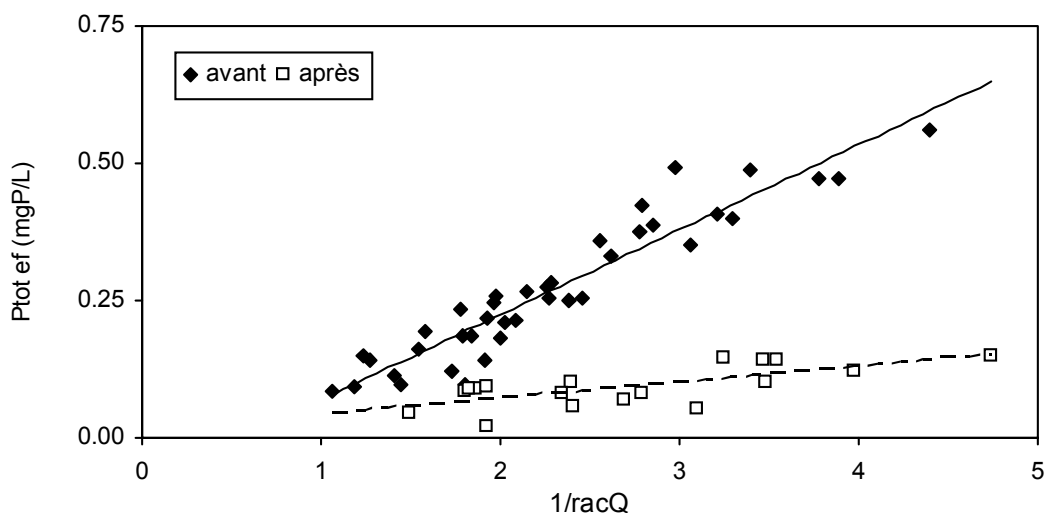


Figure 7 : Relation concentration de P<sub>tot ef</sub> - débit en tarissement pour la période de 2002 - 2004.  
Figure 7 : Concentration of total phosphorus (filtered water) / flow rate of the drying up period (for the period 2002 - 2004).

L'effet de l'arrêt des rejets se manifeste par un changement de pente des droites de régression qui traduit certes une baisse des rejets totaux mais aussi un changement dans le régime de transmission de la pollution ponctuelle vers l'exutoire avec un flux de base, lors des étiages les plus sévères, peu différent.

Le retour sur les chroniques (figure 7) montre que ce nouvel état de la dynamique de P s'installe très rapidement. L'inertie du système de transfert est donc faible. Une crue (semaine 87) provoquant un renouvellement des sédiments de la rivière semble suffisante.

## 6. SIMULATION, PROSPECTIVES

Afin de comprendre l'évolution des exportations de P dans le bassin versant du Foron, nous calculons le bilan des apports annuels de P à la rivière sur une période donnée pour divers scénarios. Le calcul s'appuie sur une modélisation simple à l'aide du logiciel STELLA (HPS, 1998). Le P exporté vers le lac est évalué comme la somme des apports ponctuels (évaluation par enquêtes et ratio) et des apports diffus (calculs surface flux spécifique). Il s'agit de la même procédure que celle utilisée pour le tableau 3. Le bilan est modélisé de 1993 à 2043 avec plusieurs dynamiques d'évolution du système d'assainissement. Tous les scénarii présentés ici (tableau 10) prennent en compte l'arrêt de la STEP de BONS fin 2003 et la mise en service en 2005 de celle de Fessy (prévue par la mairie) et l'augmentation de l'urbanisation sur les bases actuelles. Le scénario 1 (scénario tendanciel) prend en compte la baisse du P rejeté par habitant et son inévitable plafonnement. Le scénario 2 considère une situation où la charge en P par habitant n'aurait pas évolué depuis les années 80 (avant la limitation). Enfin le scénario 3 représente l'évolution de la situation si les TPP avaient été interdits dès les années 85-90 comme dans la partie Suisse du bassin versant du Léman.

Tableau 10 : Bilan des résultats des simulations.

Table 10 : Summary of the findings of the simulations.

Apports en phosphore (kgP/an)	1993	2003	2004	2043
scénario 1 : tendanciel	5'800	6'800	3'200	5'800
scénario 2 : ponctuels avec ratio 4.0 gP/EH.j	4'800	7'500	2'000	8'750
scénario 3 : ponctuels avec ratio 1.5 gP/EH.j	2'200	3'750	800	3'750

Dans le scénario tendanciel, l'arrêt des rejets fait chuter l'apport de P mais en 2043 les flux atteignent à nouveau le même niveau qu'en 1993. Ce scénario intègre les améliorations prévues (STEP de FESSY) et un entretien des réseaux d'assainissement. Il montre que la poursuite de l'urbanisation suppose de nouvelles mesures pour une meilleure gestion du P dans le bassin du Foron.

La suppression des phosphates dans les lessives était possible et aurait eu un effet non négligeable sur le P transféré au Léman, surtout dans l'état du système d'assainissement de 1993 à 2003. Il aurait encore un effet positif actuellement, même si les hypothèses restent à affiner.

## 7. CONCLUSIONS

De 1990 à 2000, le bassin versant (BV) du Foron s'est fortement urbanisé (population plus 31 %), évolution qui s'accompagne surtout d'un accroissement de la pression de pollution due aux rejets domestiques et industriels. Pour le phosphore (P), les apports ponctuels au réseau hydrographique dûment recensés augmentent sur la période considérée d'environ 20%, ceci malgré la baisse notable (1/3) de la charge en phosphore des rejets domestiques individuels due à la réduction des teneurs en TPP (tripolyphosphates) des produits détergents. Les rejets ponctuels sont dominés par les formes dissoutes ou filtrables (P<sub>tot</sub> ef), majoritairement biodisponibles.

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 (travail en cours). Les évolutions sont masquées par la variabilité hydrologique et les bilans difficiles à comparer en raison des marges d'erreur des diverses composantes de ceux-ci (par exemple : rejets clandestins et non répertoriés), l'impasse sur des sources de phosphore difficiles à quantifier (P agricole ponctuel), la simplification abusive des mécanismes de transfert (le P<sub>tot</sub> ef n'est pas conservatif,...).

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 P<sub>tot</sub> ef et changement du régime d'exportations lors des tarissements. Ces évolutions sont rapides (quelques semaines) ce qui montre :

- une faible inertie du stockage de P due aux échanges eaux sédiments en régime de tarissement,
- une évacuation rapide du P stocké lors des crues.

Cette réaction rapide du système de transfert de la pollution ponctuelle devrait être confirmée par les travaux en cours.

**REMERCIEMENTS** : Le rapport présente des données et des analyses obtenues par Olivier BOUVIER dans son D.E.S.S. (Diplôme d'études supérieures spécialisées). Nous remercions le SIVOM du Bas Chablais, le SIVOM du Pays de la Côte et les diverses Mairies consultées, leur connaissance du terrain et leur patience ont permis à ce travail d'exister. Remerciements également à la commune de Sciez et au propriétaire du terrain qui accueille notre installation.

## BIBLIOGRAPHIE

- AQUAE (2004) : Effets de la gestion des bassins versants sur les transferts particuliers et dissous et la qualité biologique des eaux de surface en zone d'élevage. Action Structurante INRA-CEMAGREF. Résumé du rapport de synthèse, 30p.
- 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, 36 p.
- BOUVIER, O. (2003) : Bilan et dynamique du phosphore à l'échelle d'un bassin versant. Aspects méthodologiques. Application à un sous-bassin versant du Léman. D.E.S.S. " Ingénierie de l'eau. Mesures et Méthodes", EGID Bordeaux III, 85 p.
- CLERC, A. et LASCOMBE, C. (2004) : Enjeux pour le Léman de la réduction à la source des apports de phosphore liés aux détergents à usage domestique. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2003, 147-153.
- COOPER, D.M., HOUSE, W.A., MAY, L. et GANNON, B. (2002) : The phosphorus budget of the Thames catchment Oxfordshire, UK : 1. Mass balance. The Science of Total Environment, 282-283, 233-251.
- DORIOZ, J. M. et TREVISAN, D. (1997) : Transferts diffus de phosphore des bassins agricoles vers les lacs : impacts, ordre de grandeur, mécanismes. Agriculture et qualité des eaux. O.I.S.I.E.R.C., 1, 241-256.
- DORIOZ, J. M., CASSEL, A., ORAND, A. et EISENMAN, K. (1998) : Phosphorus storage, transport and export dynamics in the Foron river watershed. Hydrol. Processes, 12, 285-309.
- DORIOZ, J. M. et TREVISAN, D. (2002) : Transfert de phosphore des bassins versants agricoles vers les eaux de surfaces: l'expérience du bassin lémanique (France) et sa portée générale. Agrosols, 12(2), 85-97.
- DORIOZ, J. M., QUETIN, P., LAZZAROTTO, J. et ORAND, A. (2004) : Bilan de Phosphore dans un bassin versant du lac Léman : conséquences pour la détermination de l'origine des flux exportés. Revues des Sciences de l'Eau, 17(3), 329-354.
- FOY, R.H., SMITH, R. V., JORDAN, C. et 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.
- GRAY, S. R. et BECKER, N. S. C. (2002) : Contaminant flows in urban residential water systems. Urban Water, 4, 331-346.
- 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.
- LOGAN, T. J. (1982) : Mechanisms for release of sediment bound to water and the effects of agricultural land management on fluvial transport of particulate and dissolved phosphorus Hydrobiologia, 92, 519-530.
- MAY, L., HOUSE, W.A., BOWES, M. et Mc EVOY, J. (2001) : Seasonal export of phosphorus from lowland catchment : upper river Chetwell in Oxfordshire, England. The Science of Total Environment, 269, 117-130.
- MENZEL, O.H. et CORVIN, N. (1965) : The measurement of total phosphorus in seawater based on the liberation of organically bound fraction by persulfate oxydation. Limnol. Oceanogr., 10, 2,280-292
- MURPHY, J., et RIPLEY, J.P. (1968) : A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal Chemo. Acta., 27, 21-36.
- 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.
- SHARPLEY, A.N., DANIEL, T.C. et EDWARDS, D.R. (1993) : Phosphorus movement in the landscape. J. Prod. Agric., 6, 492-500.
- STRAWCZYNSKI, A. (2004) : Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., campagne 2003, 155-161.
- TUSSEAU-VUILLEMIN, M.H., GARNIER, J., SERVAIS, P. et LAROCHE, L. (2002) : Charges domestiques spécifiques et rejets de stations d'épuration. Rapport d'avancement Piren-Seine : Dynamique de la matière organique et des microorganismes dans les systèmes urbains, 18 p.
- VAUTEY, T. (2003) : Influence de la porosité des filtres sur la filtration d'eau. Rapport de fin de stage, IUT d'Annecy-le-Vieux, 22p.
- VIAL, R. (1976) : Etudes géologiques et hydrogéologiques de la région de Thonon. Université. Grenoble, 170p.