

## CONTRIBUTION DES APPORTS EN PHOSPHORE D'ORIGINE NON-PONCTUELLE PAR LES AFFLUENTS DU LEMAN

## CONTRIBUTION OF PHOSPHORUS INPUTS FROM NON-POINT SOURCES BY TRIBUTARIES OF LAKE GENEVA

CAMPAGNE 2001-2017

PAR

**Sabesan SABARATNAM, stagiaire**

SECRETARIAT DE LA COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LÉMAN -  
Changins, Case postale 1080, CH - 1260 NYON 1

### RÉSUMÉ

*En 2017, la teneur moyenne en phosphore total dans les eaux du Léman s'élève à 17.75 µgP/L. Cette valeur reste supérieure à l'objectif fixé dans le Plan d'Action 2011-2020 de la CIPEL, qui définit une teneur en phosphore dans le lac comprise entre 10 et 15 µgP/L.*

*Dans l'objectif d'avoir une vision prospective de l'évolution des apports en phosphore dans le lac, la CIPEL souhaite mieux connaître l'origine de ces différents apports. Ainsi un bilan de flux a été établi sur les principaux affluents du Léman, sur la période 2001-2017, pour établir l'importance des apports non-ponctuels. Ces apports qui sont définis comme étant la différence entre le flux total à l'exutoire du bassin et la somme des flux ponctuels (effluents domestiques et industriels), représentent un ensemble de sources agricoles ou autres.*

*Les résultats démontrent que les apports de phosphore dans les affluents du Léman sont essentiellement dominés par les apports non-ponctuels pour le phosphore total, en moyenne à 94% sur le Rhône amont. Les flux sont ainsi fortement dépendant des débits mesurés. Lors de forts épisodes pluvieux, des quantités plus importantes de phosphore total, essentiellement constitué de phosphore particulaire, sont relargués dans les eaux. Concernant le phosphore dissous, les apports non-ponctuels s'élèvent en moyenne à 77% sur le Rhône et la relation flux/débit est moins évidente que sur le phosphore total. En 2018, un flux de 898t de phosphore total et de 24t de phosphore réactif soluble ont été mesurés à l'exutoire du Rhône amont.*

*La limitation des phénomènes d'eutrophisation dans le lac passe par un meilleur traitement du phosphore dissous dans les stations d'épuration et par une accentuation des efforts pour la réduction du phosphore diffus.*

### ABSTRACT

*In 2017, the total phosphorus content in Lake Geneva waters was 17.75 µgP/L. This value is still higher than the target set in the CIPEL Plan d'Action 2011-2020, which defines a phosphorus content in the lake between 10 and 15 µgP/L.*

*In order to have a prospective vision of phosphorus inputs evolution into the lake, the CIPEL wishes to better understand the origin of the sources of these different inputs. Thus, a flux balance was established on the main tributaries of Lake Geneva, over the period 2001-2017, in order to establish the importance of non-specific inputs. These inputs, which are defined as the difference between the total flux at the outlet of the basin and the sum of point fluxes (domestic and industrial effluents), represent a set of agricultural or other sources.*

*The results show that phosphorus inputs to the Lake Geneva tributaries are essentially dominated by non-specific inputs for total phosphorus, averaging 94% for the Rhône River. The fluxes are thus dependent on the measured discharges. During heavy rainfall events, larger amounts of phosphorus are released into the water, reflecting the importance of the particulate phosphorus attached to the soil. Concerning dissolved phosphorus, non-specific inputs amount to an average of 77% for the Rhône River.*

*The limitation of eutrophication phenomena in the lake requires better treatment of dissolved phosphorus in wastewater treatment plants and increased efforts to reduce diffuse phosphorus.*

## 1. INTRODUCTION

Le phosphore a fait l'objet de 50 ans de lutte et d'effort pour réduire ses apports au lac Léman, évitant son asphyxie. En 2017, sa concentration moyenne annuelle est de 17.75 µgP/L. L'objectif de la CIPEL (Plan d'Action 2011-2020) d'atteindre entre 10 et 15 µgP/L.

La CIPEL a souhaité approfondir les réflexions concernant l'évolution de l'apport en phosphore au lac par son bassin versant sur la période 2001-2017, période de disponibilités des données.

Cette étude s'attache à établir les bilans de flux de phosphore sur cinq affluents principaux du bassin du Léman dans le but de quantifier les apports d'origine non-ponctuelle. Les caractéristiques du milieu récepteur (activité biologique, hydrodynamique, caractéristique des sédiments, topographie), ne sont pas traités ici.

## 2. MÉTHODOLOGIE

L'évaluation des apports en phosphore d'origine non-ponctuelle a été effectuée comme illustré en

Figure à l'exutoire de chaque affluent en procédant à la différence entre le flux total à l'exutoire et la somme des flux ponctuels considérée par les effluents des stations d'épuration.

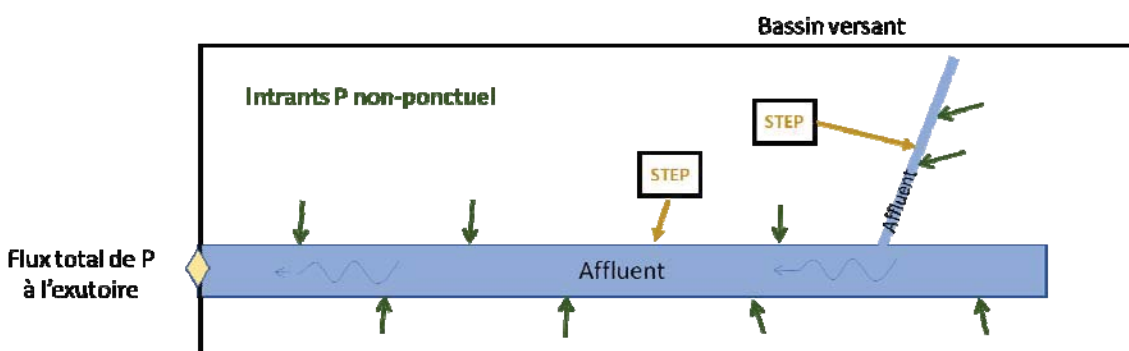


Figure 1 : Schéma du bilan pour le calcul de la contribution des apports non-ponctuels sur les affluents

Figure 1 : Balance sheet diagram for calculating the contribution of non-specific inputs to tributaries

D'autre part, les flux de sorties induits par les STEP (Figure 2) comprennent non seulement les flux d'eaux usées traitées ( $F_s$ ), mais aussi les flux d'eau usées déversés en cours de traitement et en amont du traitement (respectivement  $F_{ddp}$  et  $F_{de}$ ). Il faut toutefois rester attentif au fait que les données concernant  $F_{de}$  et  $F_{ddp}$  sont souvent lacunaires et probablement sous-estimées, influençant ainsi l'estimation des flux de sortie de la STEP.

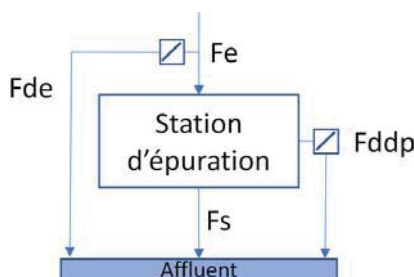


Figure 2 : Schéma des flux d'une station d'épuration

Figure 2 : Flow diagram of a wastewater treatment plant

Les bilans de flux ont été effectués sur : le Rhône amont à la Porte du Scex, la Dranse au pont de Vongy, l'Aubonne à Le Coulet, la Venoge à Les Bois et finalement la Versoix à son embouchure.

Le présent rapport fournit une analyse de données sur la période 2001-2017. Dans un souci de clarté, seul les figures concernant le Rhône et l'Aubonne seront présentées dans les chapitres suivants.

### 3. DÉBITS ET PRECIPITATIONS SUR LES PRINCIPAUX AFFLUENTS DU LÉMAN

La Figure 3 présente la contribution au débit des différents affluents ainsi que la pluviométrie annuelle de l'inter-stations (Genève, Changins, Pully, Thonon). Les débits des affluents sont influencés par la pluviométrie et le Rhône amont représente en moyenne 87% des apports au Léman, avec un volume d'eau fortement influencé par la fonte des neiges. Les contributions de la Dranse se montent en moyenne à 8% sur la période 2001-2017, pour le débit.

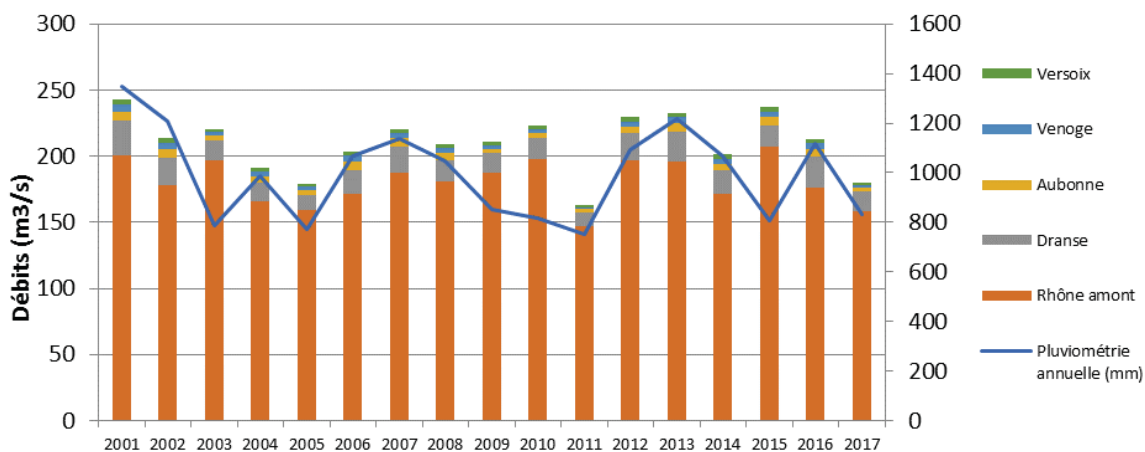


Figure 3 : Débit moyen annuel des affluents et pluviométrie de l'inter-stations

Figure 3 : Mean annual tributary flow and inter-station rainfall

### 4. RÉSULTATS

Les flux de phosphore seront subdivisés en deux catégories (Klein, 2016) :

- **fraction dissoute** : orthophosphate (forme prépondérante dans la fraction dissoute) et phosphore organique dissous
- **fraction particulaire** : phosphore organique particulaire et phosphore inorganique particulaire (apatitique ou non apatitique)

Tableau 1 : Apports annuels de phosphore total à l'exutoire et rejetés par les STEP

Table 1 : Annual total phosphorus inputs to the outfall and discharged by WWTP

tP/an	Rhône amont		Aubonne		Dranse		Versoix		Venoge	
	Ptot exutoire	Ptot STEP	Ptot exutoire	Ptot STEP	Ptot exutoire	Ptot STEP	Ptot exutoire	Ptot STEP	Ptot exutoire	Ptot STEP
2001	1013.8	38.1	16.0	1.1	30.9	2.6	9.7	2.3	22.1	2.4
2002	910.8	35.7	16.8	1.3	31.5	4.0	6.5	1.3	38.9	1.7
2003	1428.8	32.5	11.8	0.9	14.7	2.0	2.9	0.9	10.2	2.3
2004	1179.1	40.3	20.6	1.2	25.2	1.7	3.6	0.0	32.5	2.7
2005	1052.6	42.9	5.1	0.7	9.8	2.5	1.3	0.7	9.0	1.9
2006	1283.2	38.8	11.7	0.6	27.7	2.3	4.3	0.5	31.0	1.9
2007	1006.5	41.1	12.9	0.8	33.6	2.1	3.9	1.1	15.9	2.1
2008	653.4	42.0	9.1	0.7	20.2	1.8	6.6	1.2	59.3	2.5
2009	492.9	42.0	12.4	0.7	18.1	2.6	5.8	1.7	11.2	2.2
2010	617.9	41.9	4.6	0.5	17.7	0.3	10.1	1.0	8.6	2.1
2011	551.8	47.9	1.5	0.6	18.3	1.9	18.9	1.1	4.0	2.1
2012	596.1	42.7	3.6	0.5	37.3	3.1	41.7	1.0	2.8	2.0
2013	550.1	40.3	10.5	0.9	34.5	3.2	7.1	1.3	17.2	2.0
2014	325.5	36.5	7.4	0.5	20.5	3.5	9.3	1.0	8.5	2.4
2015	676.0	28.9	18.9	0.5	26.9	3.7	5.7	0.5	13.9	1.9
2016	495.6	46.2	5.2	0.7	43.3	-	6.0	0.5	11.1	1.8
2017	460.5	70.1	1.6	0.4	20.9	-	4.5	0.5	3.2	2.0

Tableau 2 : Apports annuels d'orthophosphate à l'exutoire et rejetés par les STEP

Table 2 : Annual orthophosphate inputs to the outlet and discharged by WWTPs

tP/an	Rhône amont		Aubonne		Dranse	Versoix	Venoge	
	PO4 exutoire	PO4 STEP	PO4 exutoire	PO4 STEP	PO4 exutoire	PO4 exutoire	PO4 exutoire	PO4 STEP
2001	33.8	7.0	3.8	0.6	6.9	3.9	4.7	0.9
2002	40.1	7.4	3.4	0.6	5.3	3.1	4.5	0.5
2003	40.1	7.1	1.7	0.5	3.1	1.5	1.9	0.7
2004	41.4	6.6	2.1	0.3	3.6	1.6	3.5	0.7
2005	44.6	7.4	1.1	0.4	3.4	1.0	1.8	0.6
2006	83.4	7.9	2.1	0.3	6.9	1.8	5.9	0.7
2007	64.3	6.9	2.3	0.3	5.9	2.8	3.6	0.5
2008	27.6	5.2	2.0	0.3	5.1	2.8	4.4	0.7
2009	36.6	12.4	1.6	0.1	4.0	2.0	2.9	0.7
2010	61.3	10.7	1.5	0.2	3.5	2.7	2.4	0.8
2011	56.3	11.1	0.4	0.2	2.5	1.5	1.3	0.6
2012	26.7	11.9	1.1	0.1	4.7	4.4	2.5	0.5
2013	58.7	11.2	3.2	0.1	4.7	1.9	5.1	0.6
2014	58.2	10.3	1.3	0.2	4.3	3.8	2.5	1.0
2015	21.4	11.3	3.9	0.1	3.8	2.1	3.2	0.5
2016	19.3	6.8	2.4	0.3	4.9	1.9	3.5	0.6
2017	23.4	3.8	1.1	0.1	2.6	1.2	1.4	0.8

Le Rhône amont représente en moyenne 92% des apports de Ptot sur l'ensemble des contributions des 5 affluents alors que cette valeur descend à 76% pour l'orthophosphate. La Dranse est, en moyenne, le second contributeur d'orthophosphate avec une contribution de 9% (3% sur le phosphore total).

En raison de l'information lacunaire sur le paramètre de l'orthophosphate, au niveau des stations d'épuration sur la Dranse et la Versoix, il n'est pas pertinent de fournir ces données.

#### 4.1 PHOSPHORE TOTAL D'ORIGINE NON-PONCTUELLE

La Figure Erreur ! Source du renvoi introuvable. montre que l'essentiel des flux de phosphore à l'exutoire du Rhône en amont du lac sont dû à des apports diffus de phosphore. Ces derniers représentent ainsi entre 85 à 98% des apports totaux de phosphore (Figure 5). Ainsi la courbe des flux diffus suit de près celle du Ptot mesuré à l'exutoire du Rhône. Nous remarquons qu'après la grande diminution des flux de Ptot sur la période 2006-2009, il y a une certaine stabilité. Les fluctuations du Ptot d'origine non-ponctuelle correspondent en grande partie à la pluviométrie. Les flux ponctuels sont stables (Voir Annexe 1 pour une meilleure visibilité) et l'augmentation de l'apport ponctuel sur 2017 correspond à des données non-consolidées de la station d'épuration de Regional-Ara Visp. Cette observation nécessite donc d'être considérée avec précaution.

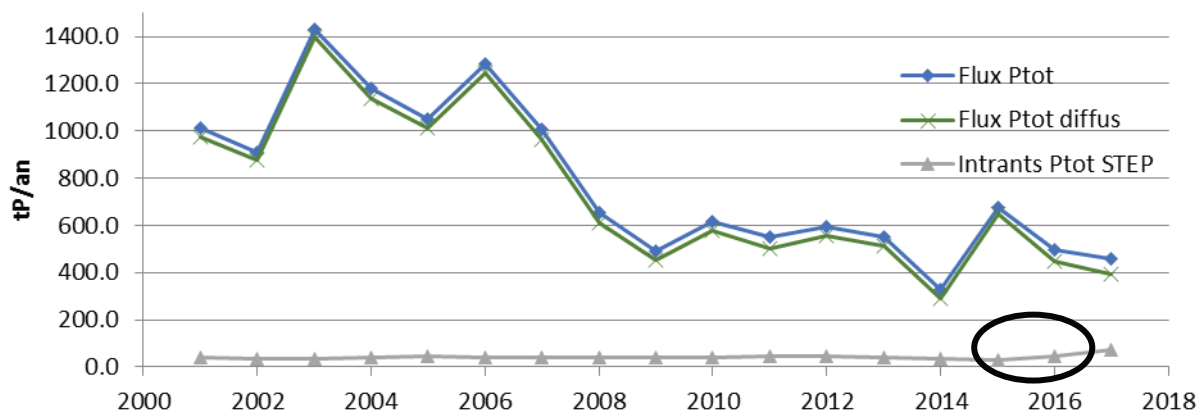


Figure 4 : Flux de phosphore total à l'exutoire du bassin versant du Rhône amont  
 Figure 4 : Total phosphorus flow at the outlet of upstream Rhône catchment area

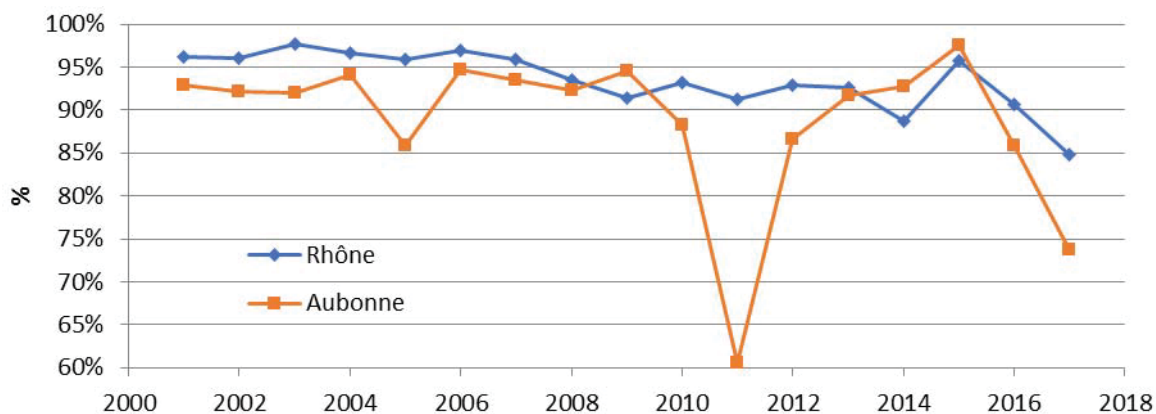


Figure 5 : Contribution des apports diffus sur le phosphore total  
 Figure 5 : Contribution of non-specific inputs to total phosphorus

La situation sur l'Aubonne est très similaire à celle du Rhône, avec des contributions des apports diffus allant de 61 à 98%, en fonction notamment de la pluviométrie (Figure 5). Sur l'Aubonne, les flux diffus les plus faibles ont été observés en 2011, année la plus sèche sur la période étudiée. Aucune tendance ne semble apparaître sur le phosphore non-ponctuel (Figure 6). Sur la période d'évaluation, un coefficient de corrélation de 0.6 est observé entre le phosphore total diffus et le débit moyen annuel sur l'Aubonne.

Une baisse continue est observée sur les rejets de STEP, depuis 2001, avec une tendance à la stabilisation depuis 2012 autour de 0.5tP/an (Voir Annexe 2 pour une meilleure visibilité).

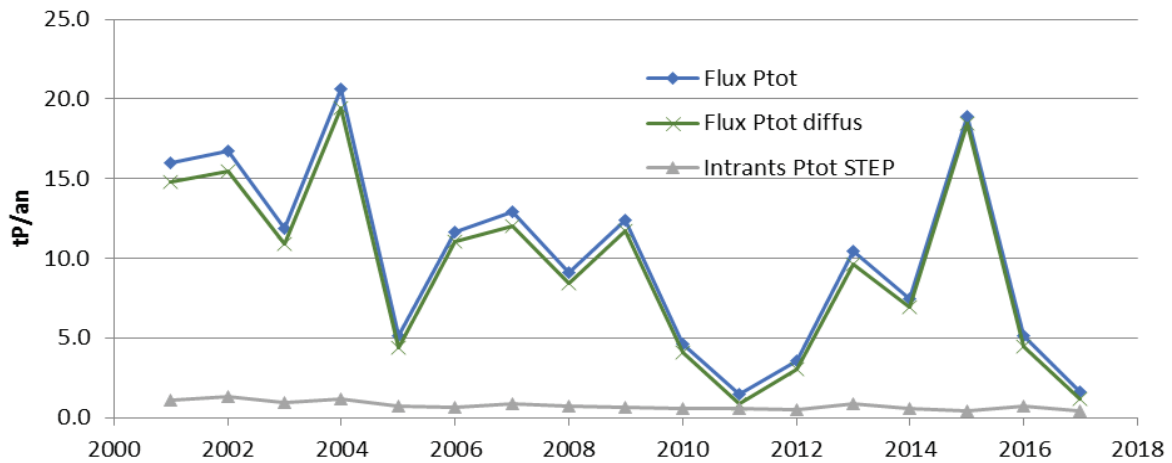


Figure 6 : Flux de phosphore total à l'exutoire du bassin versant de l'Aubonne

Figure 6 : Total phosphorus flow at the outlet of Aubonne catchment area

Concernant la répartition de charge du phosphore total au cours de l'année, les régimes d'écoulement des cours d'eau choisis n'étant pas les mêmes, de grandes différences s'observent. En 2001, année la plus pluvieuse de la période d'étude, les charges se concentrent surtout en été pour le Rhône (Figure 7), alors que les charges les plus importantes s'observent durant la fin de l'hiver sur l'Aubonne (Figure 8).

Par ailleurs, une relation exponentielle s'observe entre le débit et la charge de Ptot, aussi bien sur le Rhône que sur l'Aubonne (Figure 9 et Figure 10). La corrélation devient d'autant plus importante que le régime pluviométrique est intense. Cette situation illustre l'importance des processus d'érosion dans le relargage du phosphore total. Toutefois Burrus et al. (1990) ont mis en évidence que ces charges estivales importantes sur le Rhône étaient largement dominées par le phosphore apatitique, peu mobilisable et dont le rôle sur les phénomènes d'eutrophisation est faible. Les rapports phosphore apatitique, phosphore organique et phosphore non-apatitique inorganique sont de 12.6 :1.5 :1.0 (particules > 63 µm) durant cette période estivale de fort relargage.

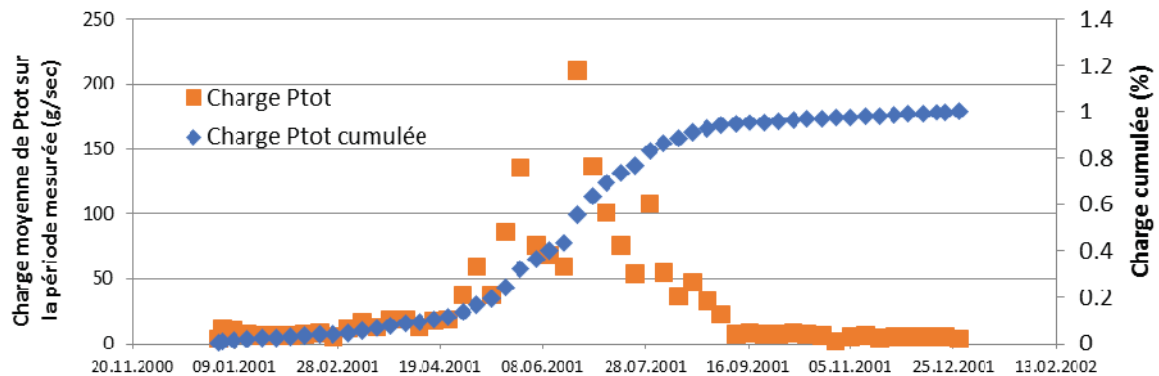


Figure 7 : Répartition de la charge cumulée de Ptot sur une année pluvieuse – Rhône amont 2001

Figure 7 : Distribution of the cumulative load of Ptot over a rainy year - Upstream Rhône 2001

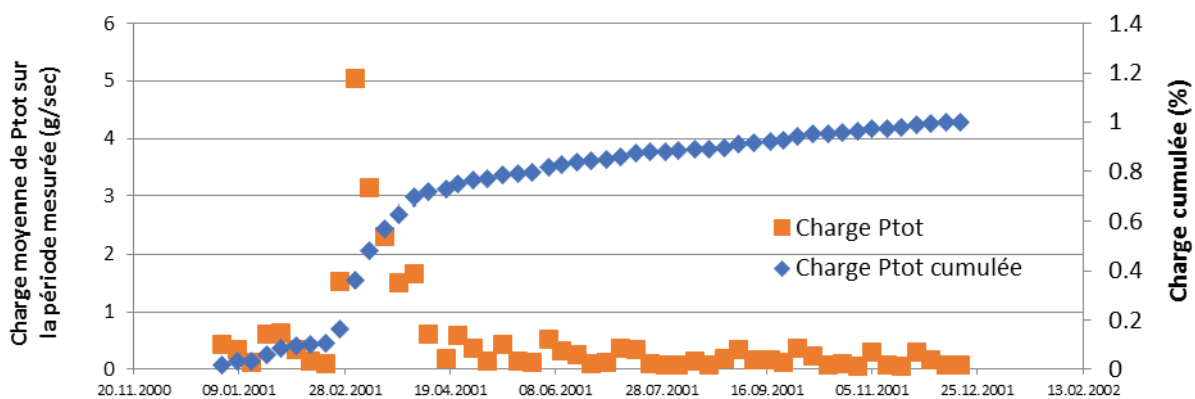


Figure 8 : Répartition de la charge cumulée de Ptot sur une année pluvieuse – Aubonne 2001

Figure 8 : Distribution of the cumulative load of Ptot over a rainy year - Aubonne 2001

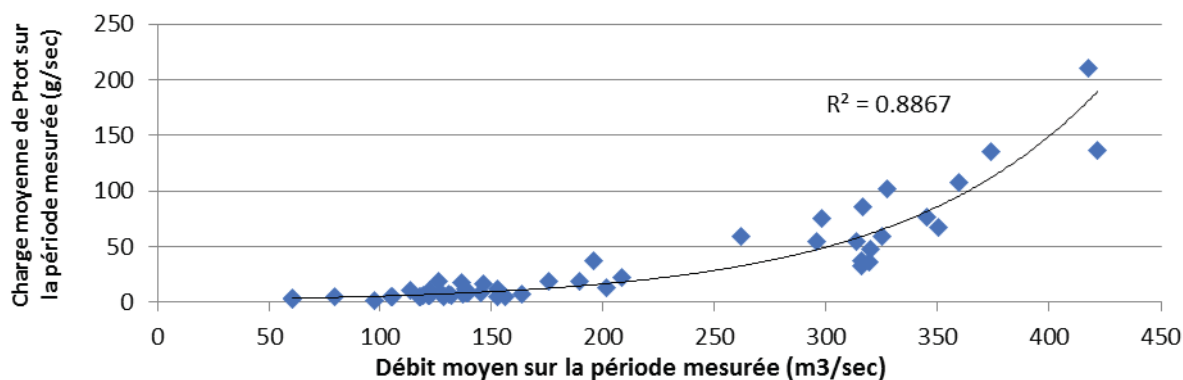


Figure 9 : Relation entre la charge de Ptot et le débit à l'exutoire du Rhône amont au cours d'une année pluvieuse (2001)

Figure 9 : Relationship between the Ptot load and the flow at the outlet of Rhône upstream during a rainy year (2001)

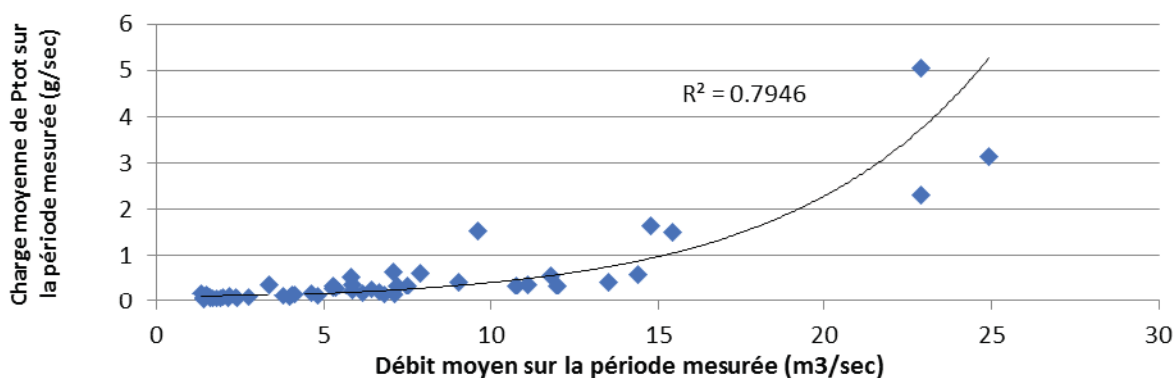


Figure 10 : Relation entre la charge de Ptot et le débit à l'exutoire de l'Aubonne au cours d'une année pluvieuse (2001)

Figure 10 : Relationship between the Ptot load and the flow at the outlet of Aubonne during a rainy year (2001)

#### 4.2 ORTHOPHOSPHATE D'ORIGINE NON-PONCTUELLE

Dans le cas du Rhône et de l'Aubonne, la contribution des STEP sur l'orthophosphate mesuré à l'exutoire (Figure 11 et Figure 12) représente respectivement 23% et 17%, ce qui est supérieur à la contribution des STEP au phosphore total. En 2015, sur le Rhône amont, l'apport ponctuel a été supérieur aux apports diffus (respectivement 53% et 47%). De plus, en raison de la non-obligation des STEP d'informer sur ce paramètre, les contributions sont sous-estimées.



Ainsi, la soudaine augmentation d'apport ponctuel entre 2008 et 2009, sur le Rhône, correspond simplement à la transmission des données sur ce paramètre par plusieurs grandes STEP, tels que Sion Châteauneuf (EH = 66'667) ou Sion Chandoline (EH = 32'500).

A contrario, la tendance à la baisse observée à partir de 2015 correspond à une non-information de plusieurs STEP et non pas à une réelle diminution des flux ponctuels. Un meilleur renseignement de la part des STEP permettrait ainsi de correctement quantifier les apports ponctuels et d'évaluer la possibilité d'une meilleure séquestration de cet élément. Nous rappelons ici que l'orthophosphate présente une biodisponibilité largement supérieure au phosphore particulaire et que sa réduction participe activement au contrôle de la végétation lacustre.

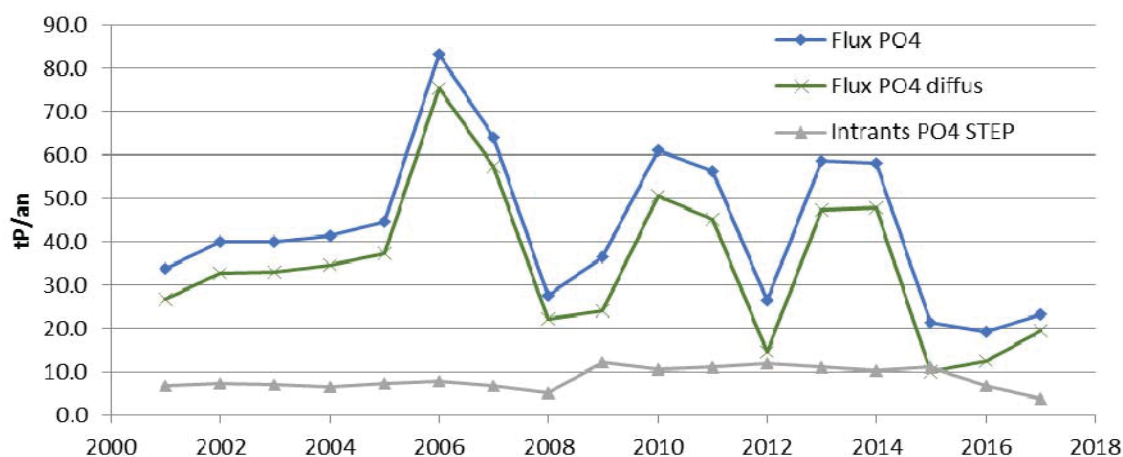


Figure 11 : Flux d'orthophosphate total à l'exutoire du bassin versant du Rhône amont

Figure 11 : Total orthophosphate flow at the outlet of upstream Rhône catchment area

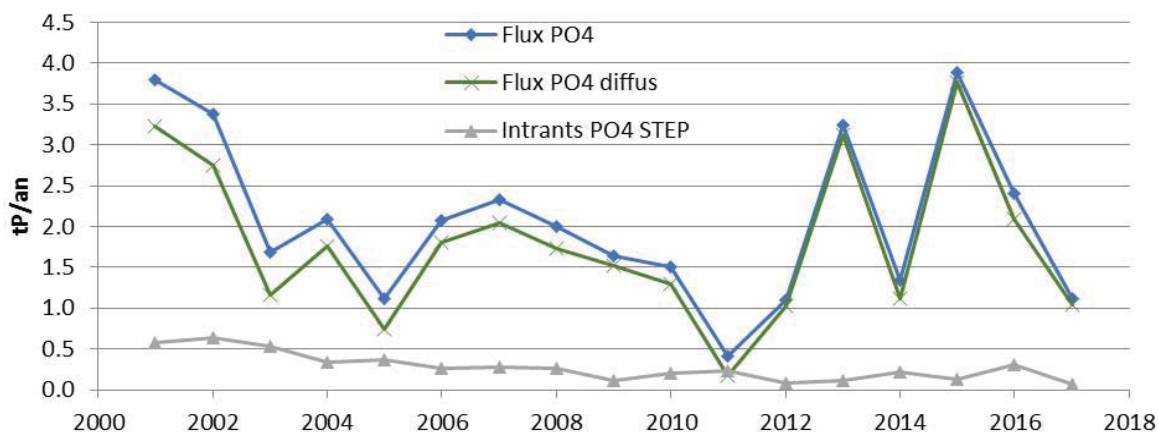


Figure 12 : Flux d'orthophosphate total à l'exutoire du bassin versant de l'Aubonne

Figure 12 : Total orthophosphate flow at the outlet Aubonne catchment area

Sur l'Aubonne, l'information concernant les apports ponctuels de P-PO4 est complète. Ici nous observons une situation analogue au Ptot, avec une tendance à l'augmentation des apports non-ponctuels. Ce phénomène est parfaitement visible sur la Figure 12, où la courbe de P-PO4 total (bleu) et la courbe de P-PO4 d'origine non-ponctuelle (orange) se resserrent. Ainsi, alors que les apports non-ponctuels représentaient en moyenne 83% sur la période 2001-2010, cette valeur monte à 92% sur la période 2012-2017.

Une action sur les apports ponctuels au niveau du Rhône amont, contributeur à 76% pour les entrées du P-PO4 dans le Léman (moyenne sur la période 2001-2017), est à envisager dans une démarche de réduction des flux au lac. Comme signalé précédemment, cela nécessite une étroite collaboration avec les STEP concernées.



#### 4.3 RELATION ENTRE LE PHOSPHORE TOTAL ET L'ORTHOPHOSPHATE

La part de phosphore particulaire ( $= 1 - \frac{P_{PO4}}{P_{tot}}$ ) domine largement sur le Rhône, avec en moyenne 94% du P<sub>tot</sub>. Une légère tendance à l'augmentation de la part dissoute s'observe sur la période 2001- 2014, avec un pic à 18% (Figure 13). Toutefois, à partir de 2015, ce chiffre est retombé à des valeurs observées au début des années 2000. La domination de la part particulaire s'observe sur plusieurs affluents (81% pour la Dranse, 62% pour la Versoix et 73% pour la Venoge).

Concernant l'Aubonne la situation semble un peu différente avec une tendance marquée à la hausse de la part dissoute. Ceci s'explique comme nous l'avons vu plus haut par une diminution des flux de P<sub>tot</sub> depuis 2001 alors que le P-PO<sub>4</sub> présente une relative stabilité sur la même période (Figure 6 et Figure 12). Ainsi, la part dissoute était en moyenne de 18% sur la période 2001-2008, et de 32% sur la période 2009-2017. La valeur la plus élevée s'observe en 2017 avec 69%.

En excluant les apports ponctuels, ces différences qui s'observent entre les flux de phosphore particulaire et de phosphore dissous s'expliquent par le comportement chimique associé à leur forme. Sur le Rhône, par exemple, le phosphore particulaire provient essentiellement de particules grossières issues de l'érosion, et seulement une petite part de ce phosphore particulaire peut être considéré comme biodisponible (14% en hiver et 7% en été selon Burrus et al., 1990). L'orthophosphate se trouve quant à lui essentiellement dans l'eau interstitielle des sols et sédiments, répondant de façon très différente au débit moyen mesuré (Figure 14). Cette situation atteste probablement pour ce bassin versant d'un mode de mise en circulation différent de celui du phosphore particulaire.

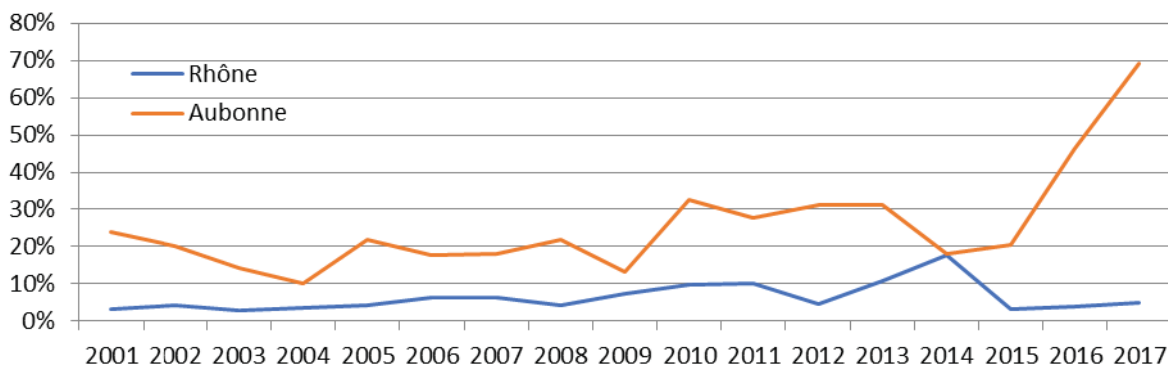


Figure 13 : Part de l'orthophosphate sur le phosphore total à l'exutoire du Rhône amont et l'Aubonne

Figure 13 : Share of orthophosphate in total phosphorus at the outlet of Rhône upstream and Aubonne

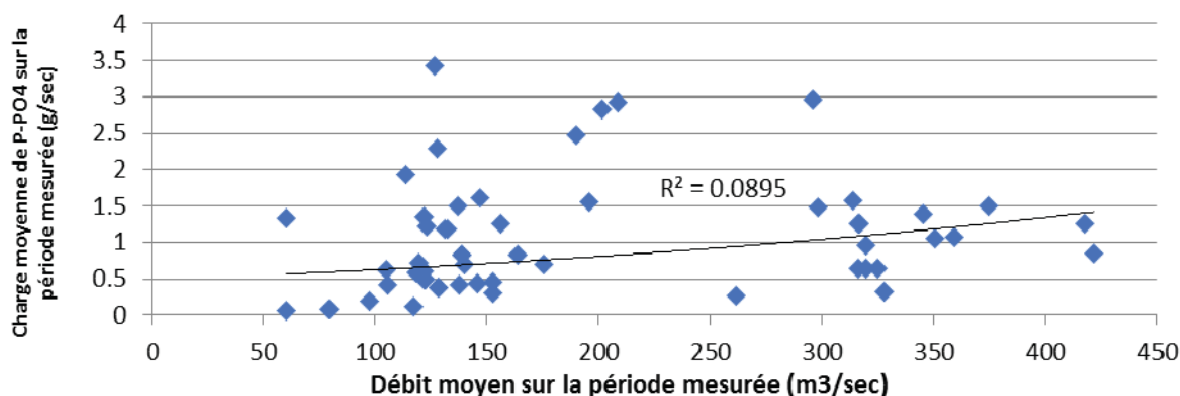


Figure 14 : Relation débit/charge de P-PO<sub>4</sub> à l'exutoire du Rhône amont au cours d'une année pluvieuse (2001)

Figure 14 : Relationship between flow and P-PO<sub>4</sub> load at the outlet of Rhône upstream during a rainy year (2001)

#### 4.4 RAPPORT AZOTE/PHOSPHORE À L'EXUTOIRE

Le rapport N/P molaire a été calculé de la façon suivante :  $\frac{n_{N_{totbrut}}}{n_{P_{totbrut}}}$

Au niveau du Rhône, la diminution des apports de phosphore total à partir de 2006 se fait clairement ressentir au niveau du rapport N/P (Figure 15). Ainsi, alors que celui-ci était situé entre 5 et 10, il est remonté autour de 15. La valeur la plus haute observée concerne 2014, avec une valeur proche de 30 et qui correspond à l'année qui présentait le flux de phosphore total le plus faible observé sur la période d'étude. Actuellement, ce rapport semble être restabilisé autour de 15.

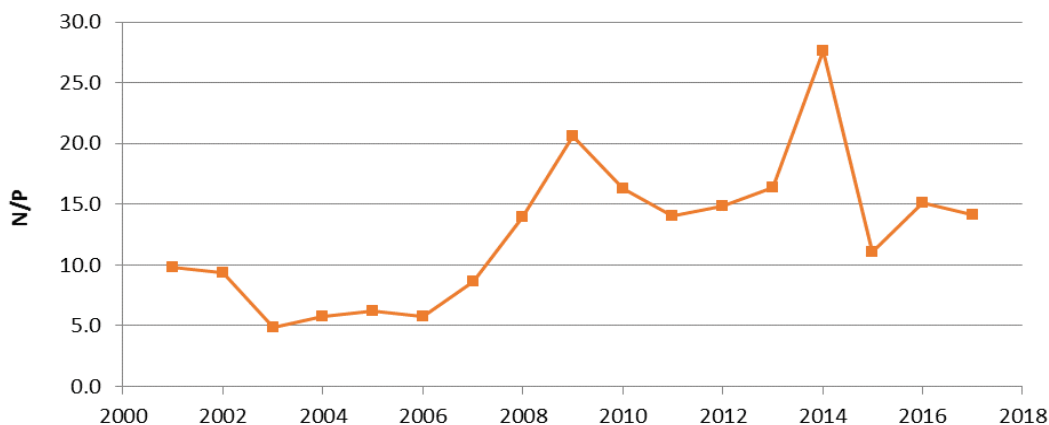


Figure 15 : Rapport molaire N/P à l'exutoire du Rhône

Les résultats du rapport N:P pour l'Aubonne ne sont pas présentés ici car les valeurs pour l'azote total ne sont pas disponibles de façon systématique sur cet affluent.

## 5. CONCLUSION

La présente étude a permis de quantifier, au moyen des données disponibles depuis 2001, les flux de phosphore ponctuels et diffus sur plusieurs affluents du Léman et permettre ainsi de mettre en évidence l'évolution de ces flux.

Il a ainsi été montré que la phase diffuse du phosphore total représente toujours la grande majorité des intrants dans les eaux du Léman. Parmi ce phosphore, la phase particulaire, essentiellement non biodisponible, domine aussi bien sur le Rhône que sur l'Aubonne avec en moyenne respectivement 94% et 74%. Sur ce dernier bassin la phase dissoute du phosphore est largement dominée par des intrants diffus. Des mesures de limitation de l'érosion sur les sols dont le mode d'utilisation est réputé à risque en termes de transfert de phosphore peuvent porter leurs fruits dans le contrôle des apports nutritifs au lac.

Concernant les apports ponctuels, les efforts consentis par les stations d'épuration, semblent porter leurs fruits avec des contributions en baisse sur le phosphore total. Cette situation est toutefois à nuancer avec le fait que les contributions sur les orthophosphates sont probablement sous-estimées, en raison de la non-obligation d'informer. De plus, il reste une marge de manœuvre importante sur le traitement du phosphore dissous, fraction biodisponible, notamment sur le bassin du Rhône. En moyenne près du quart (23%) du phosphore dissous provient en effet des STEP pour ce bassin. La collaboration avec les STEP pour un meilleur renseignement sur le P-PO4 permettrait d'évaluer la contribution réelle des rejets ponctuels. Une meilleure séquestration du phosphore dissous reste par ailleurs une mesure active à la diminution des intrants de phosphore biodisponible dans les eaux lémaniques et par conséquent de la limitation des phénomènes d'eutrophisation.

Finalement, l'atteinte des objectifs fixés dans le Tableau de Bord de la CIPEL passe impérativement par une combinaison de mesures visant à limiter les apports ponctuels et diffus de phosphore ayant un effet sur la vie aquatique. Dans ce cadre, une prise en compte de la pression anthropique grandissante sur le bassin lémanique ainsi que des forçages climatiques attendus dans le contexte du changement climatique est nécessaire.

## BIBLIOGRAPHIE

- Burrus, D., Thomas, R. L., Dominik, J., & Vernet, J. P. (1990). *Seasonal delivery of the particulate forms of phosphorus to Lake Geneva from the upper Rhone river*. *Aquatic Sciences*, 52(3), 221-235.
- Burrus, D., Thomas, R. L., Dominik, B., Vernet, J. P., & Dominik, J. (1990). *Characteristics of suspended sediment in the Upper Rhone River, Switzerland, including the particulate forms of phosphorus*. *Hydrological processes*, 4(1), 85-98.
- Dorioz, J. M., & Trevisan, D. (2013). *Le transfert diffus du phosphore dans les bassins agricoles: ordres de grandeur, mécanismes, maîtrise*. *Revue EAT thématique*, 27-47.
- Haygarth, P. M., & Jarvis, S. C. (1999). *Transfer of phosphorus from agricultural soil*. *Advances in agronomy* (Vol. 66, pp. 195-249). Academic Press.
- Klein, A. (2016). *Les apports par les affluents au Léman et au Rhône à l'aval de Genève et leur qualité*. *Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2015*, 108-114.
- Kronvang, B., Laubel, A. R., Larsen, S. E., Pedersen, M. L., & Svendsen, L. M. (2000). *Bank erosion as a source of sediment and phosphorus delivery to small Danish streams. In the role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer*. *Proceedings of a symposium held at Waterloo, Ontario, Canada in July 2000* (pp. 75-82). IAHS Press.
- Müller, B., & Schmid, M. (2009). *Bilans du phosphore et de l'oxygène dans le lac de Morat*. *Rapport EAWAG pour les cantons de Fribourg (SEN) et de Vaud (SESA)*.
- Oriez, A. (2018). *Contrôle annuel des stations d'épuration (STEP)*. *Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2017*, 176-192.
- Pinay, G., Gascuel, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Le Moal, M., Levain, A., ... & Souchu, P. (2018). *L'eutrophisation: manifestations, causes, conséquences et prédictibilité*. Editions Quae.
- Rapin, F. (2008). *Les apports par les affluents au Léman et au Rhône à l'aval de Genève*. *Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2007*, 117-138.

ANNEXE

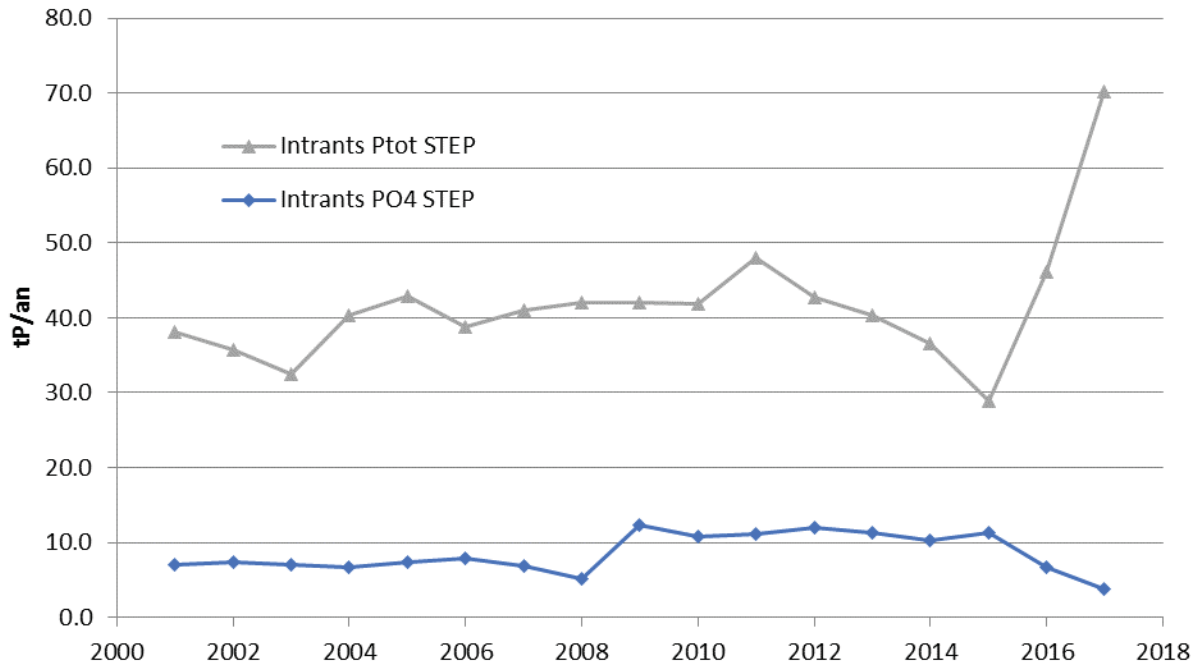


Figure 16 : Effluents de phosphore issus des STEP du bassin versant du Rhône amont  
Figure 16 : Phosphorus effluents from WWTP in the upstream Rhône catchment area

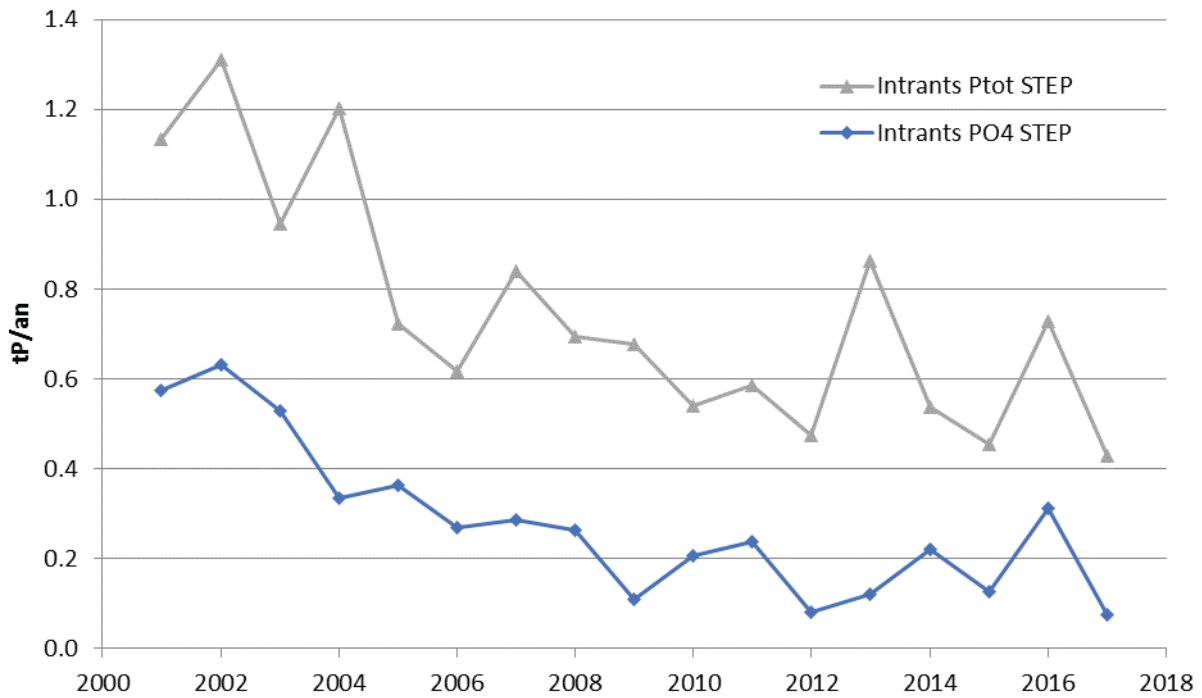


Figure 17 : Effluents de phosphore issus des STEP du bassin versant de l'Aubonne  
Figure 17 : Phosphorus effluents from WWTP in the Aubonne catchment area