

**Interreg**



France ( Channel  
Manche ) England

Channel Payments for Ecosystem Services

European Regional Development Fund



**CPES**

# **Bilan des Travaux Préliminaires Conduits sur le Bassin Versant du Lac au Duc en vue d'Implanter des Paiements pour Services Environnementaux avec l'Objectif de Réduire les Apports de Phosphore d'Origine Agricole au Lac**

Estimation des apports, localisation des sources dans le bassin versant et détermination de l'objectif de réduction des apports en fonction des usages du lac

Estimations coûts/efficacités/bénéfices de la réduction des apports

G. Gruau, R. Dupas, P. Le Goffe, C. Ropars, C. Weigand, L. Brient, P. Latouche, S. Moisan, A. Casquin, S. Gu, M. Le Moal, M. Houenou Housinou, J. Canlet & M. Poulain

## Préambule

L'objectif de ce rapport « bilan » est de présenter les résultats acquis entre janvier 2018 et septembre 2019 sur le bassin versant du Lac au Duc (bassin versant de l'Yvel-Hivet) dans le cadre des travaux conduits par les équipes du CNRS, de l'INRA et d'Agro-campus Ouest, travaux dont les objectifs étaient les suivants :

- 1) estimer les flux de phosphore (P) entrant dans le lac, et la part dans ces flux entrant des sources agricoles et domestiques de P ;
- 2) déterminer l'objectif de réduction du flux à atteindre en entrée de lac, en fonction des usages/services du lac que l'on souhaite pouvoir préserver/restaurer (production d'eau potable, pêche, activités nautiques, baignade) ;
- 3) quantifier économiquement la perte de bien-être des usagers du lac induite par les efflorescences de cyanobactéries et les restrictions d'usage auxquelles ces efflorescences conduisent ; cumuler ces coûts avec les coûts des pertes économiques directes (surcoût de la production d'eau potable, par exemple) et indirectes (actions curatives sur le lac) de manière à quantifier l'ensemble des dommages économiques causés par les excès de P arrivant au lac et les blooms de cyanobactéries que ces excès génèrent, et ce afin d'évaluer au final les bénéfices économiques d'une diminution des flux en provenance du bassin-versant ;
- 4) quantifier les coûts de réduction des émissions diffuses de P agricole, en fonction de l'objectif visé de réduction du flux de P entrant dans le lac ; évaluer différents scénarios de réduction, incluant ou non un ciblage des mesures préconisées (ciblage géographique ; ciblage des parcelles les plus coût-efficaces, etc..), et estimer les coûts des différents scénarios.

Le rapport est volontairement organisé en une succession de chapitres répondant à des questions précises du type « Quelle est la valeur du flux de P entrant annuellement dans le Lac au Duc ? » ou « Quel est le coût estimé d'une réduction d'un facteur 3 des émissions agricole de P ? ». L'objectif, en procédant de la sorte, est de fournir un cadre aussi clair que possible, permettant de procéder au dimensionnement et à l'implantation de Paiements pour Services Environnementaux visant à réduire les émissions agricoles de P sur le bassin versant, et d'en évaluer à priori le coût et l'efficacité du point de vue de l'état écologique du lac et des services qu'il fournit. Le cadre produit dépend évidemment des démarches d'évaluation mises en œuvre dans ce travail préalable d'analyse, et notamment du choix faits par les économistes de l'UMR SMART d'Agrocampus Ouest d'évaluer les coûts et les bénéfices d'une réduction des flux de P agricole par des enquêtes en face à face, reposant sur la méthode dite des choix dans laquelle différents scénarios, préalablement dimensionnés d'un point de vue économique, sont proposés aux enquêté(e)s.

## Les questions auxquelles il a été tenté de répondre

**Question 1 :** Comment ont évolué les flux et les concentrations de P en entrée du Lac au Duc dans la période récente? Quelles sont aujourd’hui les quantités de phosphore entrant dans le lac ?

**Question 2:** Quelles sont les parts domestiques/industrielles (émissions ponctuelles) et agricoles (émissions diffuses) du flux de phosphore entrant aujourd’hui dans le Lac au Duc?

**Question 3 :** Une approche par sous-bassins versants fait-elle apparaître une sectorisation des émissions diffuses de phosphore agricole dans le bassin versant du Lac au Duc? Fait-on apparaître des sous-bassins dans lesquels cibler l’implantation de Paiements pour Services Ecosystémiques (PSE) pourrait avoir un impact maximal sur la réduction du flux de phosphore agricole en entrée de lac ?

**Question 4 :** Quels objectifs de réduction du flux de phosphore en entrée de lac doit-on viser en fonction des services fournis par le lac que l’on souhaite préserver/restaurer ? Autrement dit, par quel facteur doit-on diviser le flux actuel, dépendant du service ou de l’usage recherché au niveau du lac?

**Question 5:** Quels attributs techniques peuvent être proposés aux agriculteurs pour réduire le flux de phosphore agricole rentrant dans le Lac au Duc ? Comment estimer l’effet de l’appropriation de ces attributs par les agriculteurs sur la réduction du flux?

**Question 6 :** Comment estimer les coûts d’adoption par les agriculteurs du bassin versant du Lac au Duc des différents attributs techniques proposés pour réduire les flux de phosphore agricole rentrant dans le Lac? A quels coûts moyens à l’hectare arrive-t-on dépendant du, ou des attributs ciblés? Comment ces coûts varient-ils en fonction du type d’exploitation ?

**Question 7 :** Quels sont les montants requis pour réduire les émissions diffuses de phosphore agricole arrivant au Lac au Duc ? Comment ces montants évoluent-ils en fonction de l’exigence de réduction de ces émissions ?

**Question 8:** Une analyse coût/efficacité de la réduction des flux fait-elle apparaître un intérêt de cibler les PSE sur certaines parties du bassin versant? Ce ciblage correspond-il aux zones d’émission maximale de phosphore établies à partir des suivis faits aux exutoires des sous-bassins versants?

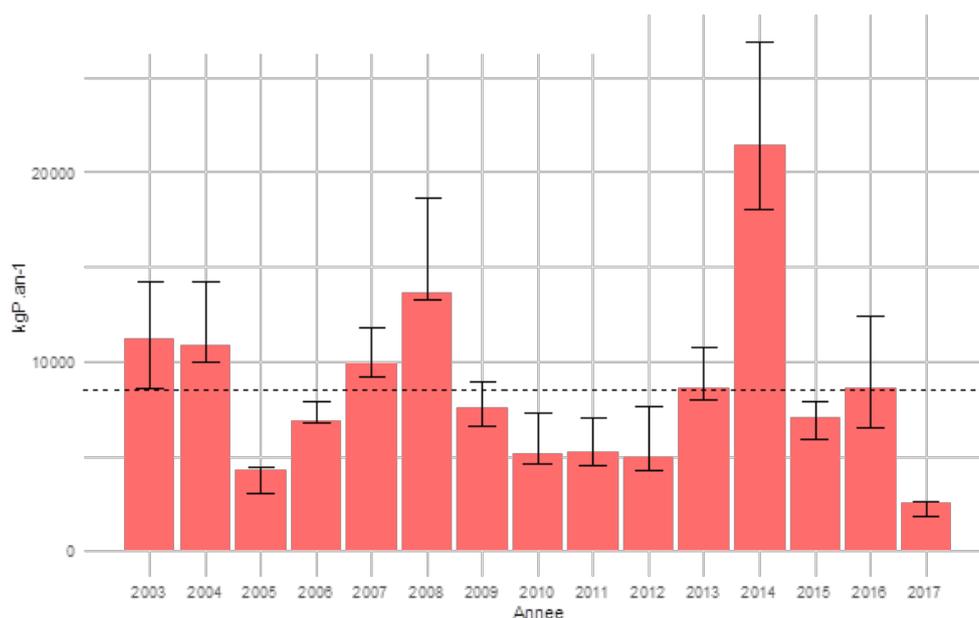
**Question 9 :** A combien chiffre-t-on les dommages engendrés par le mauvais état écologique du Lac au Duc? Quelle est au final la balance entre offre et demande de services environnementaux pour le bassin versant du Lac au Duc?

## Question N°1

**Comment ont évolué les flux et les concentrations de phosphore en entrée du Lac au Duc dans la période récente? Quelles sont aujourd'hui les quantités de phosphore entrant dans le lac ?**

*Rappel de la méthodologie déployée.* Analyse des données collectées par le syndicat Mixte du Grand bassin de l'Oust (SMGBO) entre 2007 et 2017 sur les 10 points de suivis implantés dans le bassin versant de l'Yvel-Hivet, dont le point YV2 disposant d'une station de mesure des débits de l'eau et implanté juste en amont du lac. La fréquence de mesure est généralement de 10 échantillons collectés et analysés par an, sauf au point YV2, où la fréquence de mesure est de 20 échantillons collectés et analysés par an.

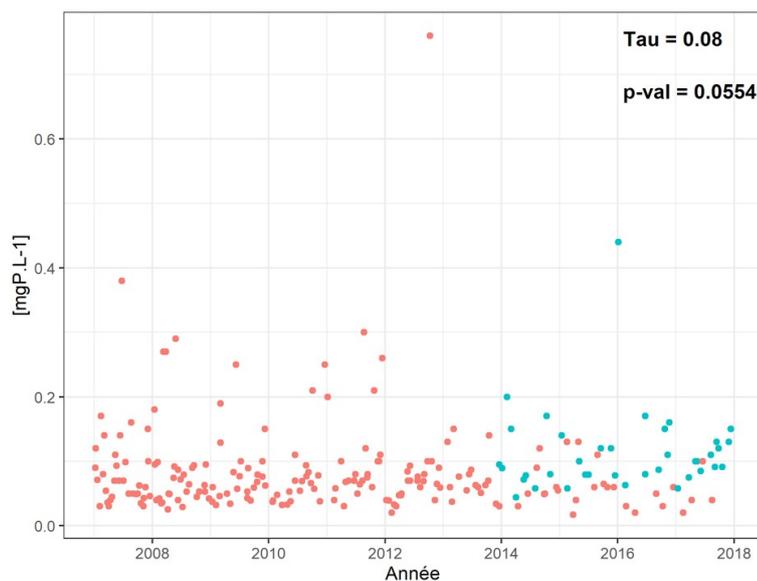
L'analyse des données historiques collectées par le SMGBO en entrée de lac entre 2007 et 2017 montre une variabilité importante du flux de  $P_{total}$  entrant dans le lac à l'échelle inter-annuelle (Fig 1), variabilité imputable aux variations interannuelles du débit de l'eau et des précipitations. Les valeurs du flux, exprimées en Kg de  $P_{total}$  par hectares (ha) et par an, varient entre 0.1 (2012) et 1.1 (2012), avec une **valeur moyenne du flux** sur la période s'établissant à **0.23 kg  $P_{total}$ /ha/an**.



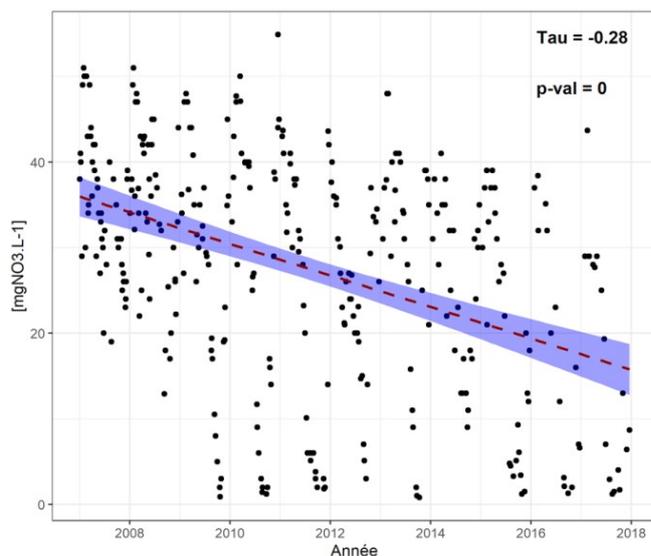
**Figure 1 :** Flux annuels de  $P_{total}$  calculé en entrée ( ) du Lac au Duc sur la période 2007 – 2017. Le flux annuel moyen sur la période est de 8506 Kg.P.an<sup>-1</sup>.

**Aucune tendance ni à la hausse, ni à la baisse n'est détectée** du point de vue des entrées de  $P_{total}$  lors de la période 2007-2017, que ce soit du point de vue des flux annuels (Fig. 1) ou du point de vue des concentrations instantanées de  $P_{total}$  (Fig. 2). Ceci veut dire que le flux moyen annuel de  $P_{total}$  de 0.23 Kg $P_{total}$ /ha/an calculé entre 2007 et 2017 peut être vu comme correspondant à la valeur moyenne du flux annuel entrant aujourd'hui dans le Lac au Duc. Divisé par le flux moyen d'eau, ce flux moyen annuel correspond à une **concentration**

**moyenne annuelle en  $P_{total}$  pondérée** du débit en entrée de lac de **0.100 mg/l**. Cette valeur peut être prise comme la valeur actuelle de la concentration moyenne pondérée en  $P_{total}$  en entrée de lac et donc comme la concentration guide correspondant à l'état « 0 » avant tout nouveau plan d'action visant à réduire les apports de  $P_{total}$  au lac. On notera que l'absence de tendances à la baisse des flux et des concentrations de  $P_{total}$  est très différente de la situation du nitrate (Fig. 3) dont les concentrations en entrée de Lac ont été diminuées d'un facteur 2 entre 2007 (40 mg/L de  $NO_3$  en moyenne) et 2017 (20 mg/l en moyenne). On notera que le  $P_{total}$  entrant dans le lac est constitué à >80% de  $P_{particulaire}$ .



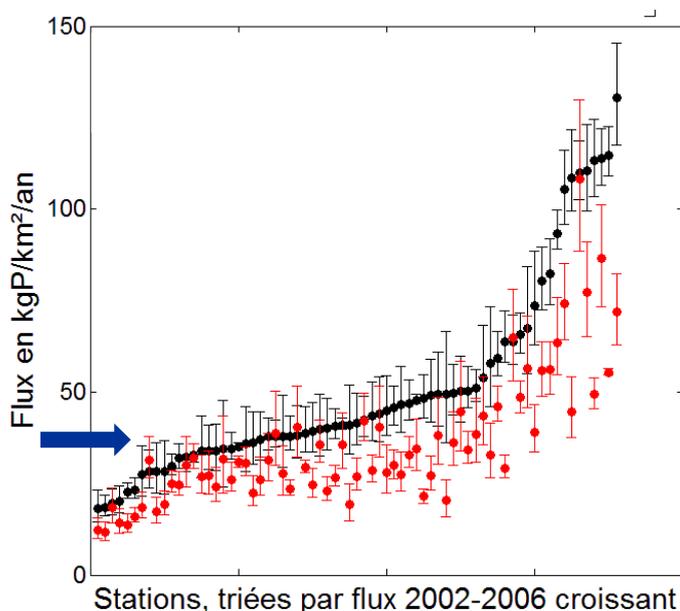
**Figure 2** : Variation des concentrations de  $P_{total}$  mesurées dans la rivière Yvel en entrée du Lac au Duc sur la période 2007 - 2017



**Figure 3** : Variation des concentrations de  $NO_3$  mesurées dans la rivière Yvel en entrée du Lac au Duc sur la période 2007 - 2017

Plusieurs remarques importantes se doivent d'accompagner ces résultats :

- 1) Le fait que les concentrations en  $P_{total}$  des rivières varient fortement en fonction du débit conduit généralement à une sous-estimation des flux de  $P_{total}$  à partir des réseaux de mesure mis en place, qui n'analyse pas la concentration en  $P_{total}$  de l'eau à la haute fréquence nécessaire. Dans le cas présent (moyenne établie sur 10 années de mesures) on peut évaluer cette sous-estimation à 25%, signifiant que le flux moyen annuel et la concentration moyenne annuelle pondérée du débit en entrée de lac pourraient être en réalité sans doute légèrement plus élevés que les chiffres donnés plus haut, respectivement de l'ordre de 0.30 kg  $P_{total}$ /ha/an pour le flux et 0.130 mg/l de  $P_{total}$  pour la concentration moyenne pondérée.
- 2) Une concentration moyenne annuelle en  $P_{total}$  de 0.100-0.130mg/l classe les eaux entrant dans le Lac au Duc dans la catégorie des eaux en bon état écologique (limite <0.200 mg/l de  $P_{total}$ ). Ce relativement bon état écologique « réglementaire » de la masse d'eau entrante, en condition moyenne, renvoie au fait que des efforts importants ont déjà été accompli dans le bassin versant de l'Yvel-Hivet, comme ailleurs en Bretagne pour réduire les flux de  $P_{total}$  (division en moyenne par un facteur 2.5 des flux de  $P_{total}$  en Bretagne depuis 30 ans). Il démontre aussi que l'état écologiquement dégradé du Lac au Duc est la résultante d'une très grande sensibilité des masses eaux stagnantes de type retenues ou lacs au paramètre « phosphore » (concentration seuil pour l'apparition de cyanobactéries beaucoup plus faible que la concentration seuil définissant le bon état écologique « réglementaire » des masses d'eau\*), combiné au fait que ces masses d'eau de type « retenues » ou « lacs », en stockant les sédiments, stockent aussi en leur sein des quantités très importante de P (plusieurs tonnes accumulés par an), fournissant une réserve interne de P dégradant l'état écologique du lac.



**Figure 4 :** Comparaison du flux de  $P_{total}$  émis par l'Yvel en entrée du Lac au Duc en moyenne chaque année (flèche bleue) par rapport aux rivières bretonnes disposant de stations de mesure du flux de  $P_{total}$ .

\*La limite du bon état écologique est beaucoup plus faible pour les lacs et les retenues (<0.050 mg/l) que pour les rivières (<0.200 mg/l) du fait du caractère stagnant des eaux qui les rend plus sensibles au développement de micro-algues.

- 3) Comparer aux autres cours d'eau breton (Fig. 3), l'Yvel en entrée du Lac au Duc rentre dans la catégorie des 50% des cours d'eau bretons exportant le moins de  $P_{total}$ . Ceci renforce l'idée que le bassin versant du Lac au Duc est un bassin versant en relativement bon état du point de vue du P dans le contexte breton, et que réduire les quantités de  $P_{total}$  exportées par un bassin versant qui exporte relativement peu de  $P_{total}$  aujourd'hui demandera le déploiement sur ce bassin versant d'actions forcément plus radicales que toutes celles entreprises jusqu'ici.

**Ce qu'il faut retenir :** Le bassin versant de l'Yvel-Hivet fait partie des 50 % des bassins bretons exportant le moins de  $P_{total}$ . Le flux annuel moyen de  $P_{total}$  entrant dans le Lac au Duc est de 0.23 kg/ha/an, avec des variations inter-annuelles importantes en phase avec les variations inter-annuelles de la pluviométrie. La concentration moyenne pondérée en  $P_{total}$  (concentration guide) est de 0.100 mg/L. le  $P_{total}$  entrant dans le lac est constitué à >80 % de P particulaire.

L'état écologique dégradé du Lac au Duc est la résultante de la forte sensibilité des masses eaux stagnantes de type « retenues » ou « lacs » au paramètre « phosphore ».

## Question N°2

**Quelles sont les parts domestiques/industrielles (émissions ponctuelles) et agricoles (émissions diffuses) du flux de phosphore entrant aujourd'hui dans le Lac au Duc?**

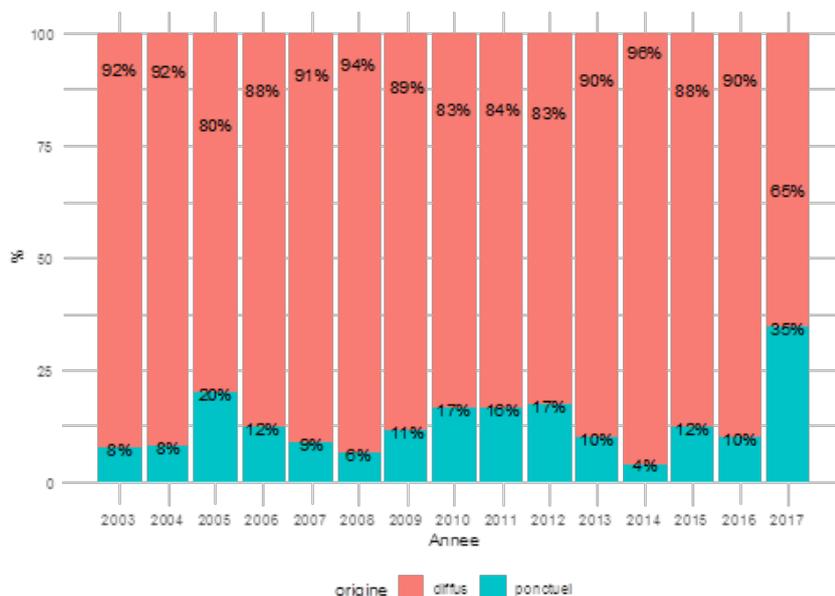
*Rappel de la méthodologie déployée. Deux campagnes de mesure réalisées lors de l'été 2018 en amont et en aval des principales stations d'épurations du bassin versant du Lac au Duc pour estimer les flux de  $P_{total}$  et de  $P_{PO4}$  émis par ces stations. Comparaison des chiffres obtenus avec les estimations produites par le SMGBO sur la base des flux déclarés par les exploitants.*

L'analyse des données acquises lors de l'été 2018 à l'amont et à l'aval des stations d'épuration du bassin versant de l'Yvel-Hivet conduit à estimer les quantités de  $P_{total}$  émises par ces stations à un total cumulé de 1.9 kg  $P_{total}$ /jour, dont près de 80% est du  $P_{PO4}$  (1.5 kg équivalent P/jour). Ramené sur une base annuelle et exprimé en flux spécifique, ce chiffre correspond à un flux spécifique de  $P_{total}$  domestique/industriel de 0.018 kg  $P_{total}$ /ha/an, soit 8% du flux spécifique moyen de  $P_{total}$  calculé en entrée de lac. En d'autres termes et d'après ces chiffres **92% du flux entrant aujourd'hui dans le Lac au Duc serait d'origine diffuse agricole, contre 8% ayant une origine ponctuelle, domestique et/ou industrielle.**

Ces chiffres sont assez voisins des estimations faites par le SMGBO à partir des données d'autocontrôle des exploitants : entre 2 et 4 kg  $P_{total}$ /jour. Considérant l'option haute de 4 kg  $P_{total}$ /jour, celle-ci conduit à une part estimée des apports de  $P_{total}$  d'origine ponctuelle, domestique et/ou industrielle, au Lac au Duc égale à 13% du flux annuel entrant dans le lac (87% d'origine diffuse agricole).

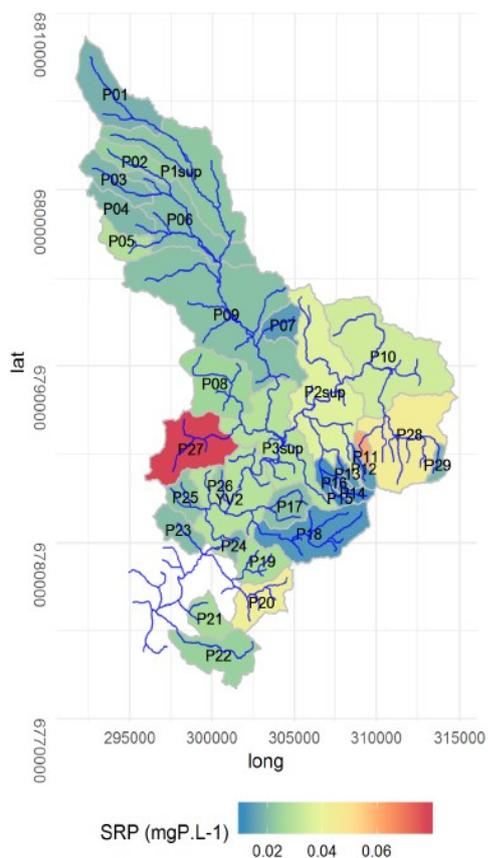
La comparaison de ces chiffres cohérents entre eux indique donc que le phosphore entrant dans le Lac au Duc serait en base annuelle à **92% d'origine agricole**, justifiant l'idée que le principal des actions de prévention à entreprendre sur le bassin relève d'actions visant à réduire les émissions diffuses d'origine agricole.

Ce résultat amène cependant deux remarques. La première est que cette valeur de 92% du flux entrant d'origine diffuse agricole est une valeur établie sur une base annuelle. La situation est très différente sur une base mensuelle, base sur laquelle la part des apports ponctuels domestiques/industriels augmente très fortement les mois d'été du fait de la réduction des débits des cours d'eau (déconnexion des cours d'eau des réservoirs de P du sol). Ainsi, la part des apports ponctuels de P peut excéder celle des apports diffus d'origine agricole en juillet, août et septembre, devenant ainsi prépondérante en entrée de Lac à ces périodes. La période estivale correspondant à la période de développement des cyanobactéries, principal dommage écologique du Lac au Duc, la question est posée d'un rôle peut-être beaucoup plus important qu'il n'y paraît sur une base annuelle des apports ponctuels de P d'origine domestique/industrielle, ceux-ci pouvant jouer le rôle de facteur déclenchant des blooms de cyanobactéries. Cette question demeure toutefois encore aujourd'hui une question ouverte de recherche.



**Figure 5** : Variations sur une base mensuelle de la proportion (en %) de phosphore d'origine diffuse agricole (*en rouge*) et ponctuelle, domestique et/ou industrielle (*en bleu*), rentrant dans le Lac au Duc.

La deuxième remarque est que les suivis effectués en têtes de bassin versant entre début 2018 et mi 2019 montrent certaines anomalies vraisemblablement à mettre en lien avec des apports ponctuels de P, la principale et la plus visible étant les valeurs très élevées de concentrations en  $P_{PO_4}$  à l'aval de la station de la commune de Guilliers, valeurs témoignant d'un mauvais fonctionnement probable de cette station (Fig. 6). Une augmentation dans le temps des teneurs en  $P_{PO_4}$  dans certains sous-bassins versants impactés par des rejets en provenance de lagunes interrogent également sur la possibilité que certaines lagunes anciennes voient leurs rejets en  $P_{PO_4}$  augmenter du fait d'un engorgement progressif, et donc d'une augmentation de la charge interne en P. Clairement, des actions de modernisation des stations d'épuration du bassin versant pourraient être entreprises pour diminuer les apports ponctuels de P d'origine domestique au Lac au Duc, actions qu'il conviendrait d'activer en parallèle des efforts justifiés demandés à la profession agricole pour diminuer les apports diffus de P au lac.



**Figure 6.** Carte sectorielle des émissions de  $P_{P04}$  au sein du bassin versant du Lac au Duc montrant le caractère anormalement élevées des émissions enregistrées dans le secteur de la commune de Guilliers

**Ce qu'il faut retenir :** La part des émissions agricoles dans le total du P entrant dans le Lac au Duc est estimée à 92%, les 8 % restant provenant de sources ponctuelles, domestiques et/ou industrielles. Même si des travaux de modernisation des stations d'épuration sont à envisager, les actions de prévention à entreprendre pour réduire le flux de P entrant dans le lac relèvent donc principalement d'actions visant à réduire les émissions diffuses de P agricole.

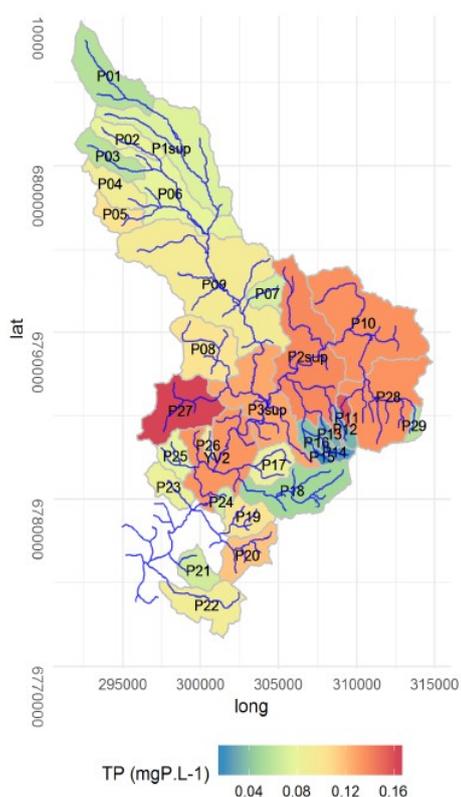
Ces actions seront forcément difficiles et coûteuses, les gains en réduction d'émission nécessaires venant après une diminution déjà conséquente des émissions agricoles de P en Bretagne depuis 30 ans (division par un facteur 2.5 des flux en moyenne).

### Question N°3

**Une approche par sous-bassins versants fait-elle apparaître une sectorisation des émissions diffuses de phosphore agricole dans le bassin versant du Lac au Duc? Fait-on apparaître des sous-bassins dans lesquels cibler l'implantation de Paiements pour Services Ecosystémiques (PSE) pourrait avoir un impact maximal sur la réduction du flux de phosphore agricole en entrée de lac ?**

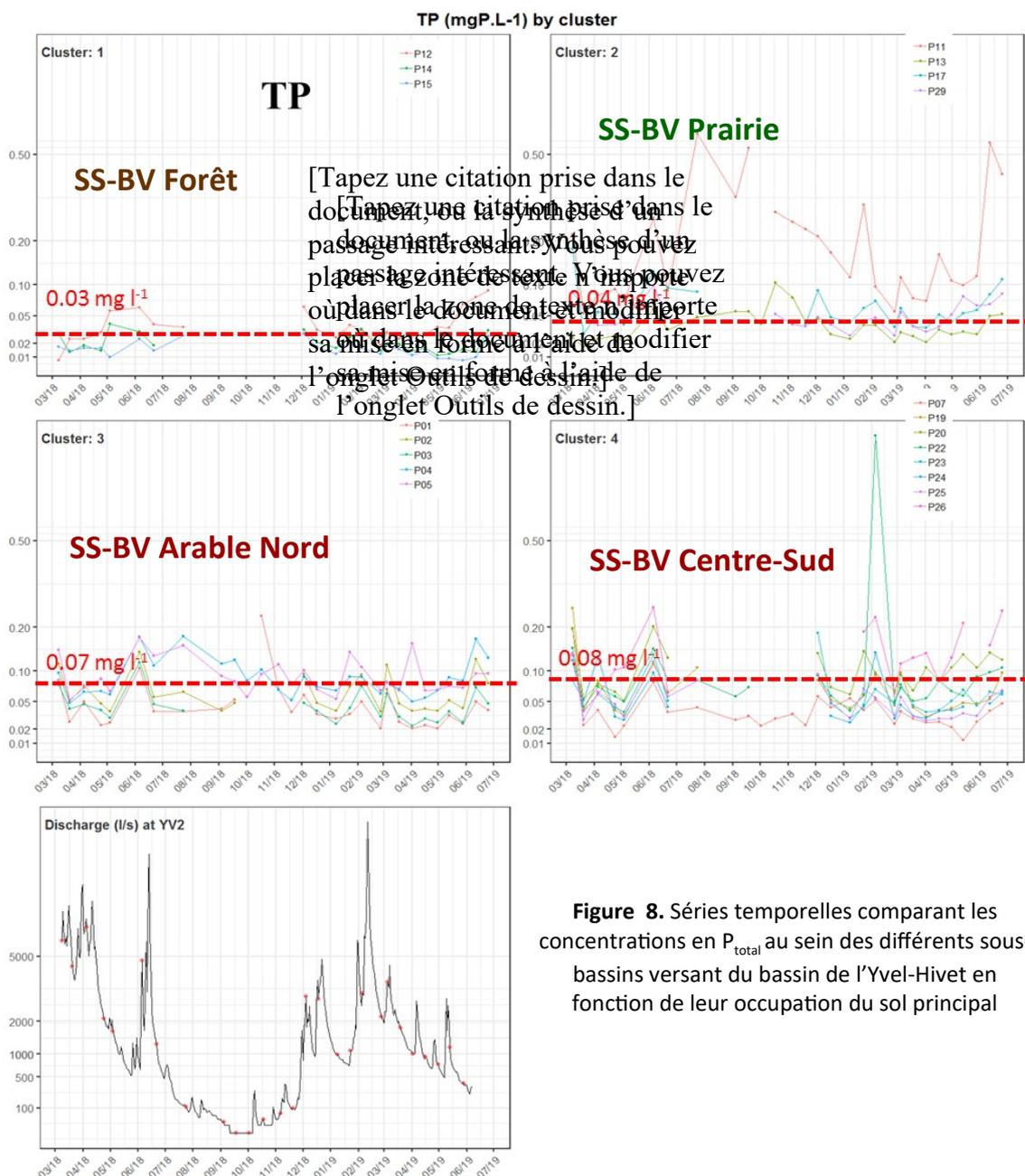
*Rappel de la méthodologie déployée. Dans l'optique de faire apparaître une éventuelle sectorisation des émissions de P diffus agricole dans le bassin versant du Lac au Duc qui pourrait orienter l'implantation de PSE, le territoire du bassin versant du Lac au Duc a été divisé en 25 sous-bassins versants aux exutoires desquels des suivis des concentrations en  $P_{total}$  et  $P_{PO4}$  ont été effectués à raison d'une mesure tous les quinze jours, entre mars 2018 à juillet 2019, de manière à les hiérarchiser entre eux du point de vue de leur capacité à émettre du P agricole en direction du Lac.*

Les résultats montrent des flux sensiblement plus élevés dans les parties centrales et sud du bassin-versant (0.13 kg/ha), par rapport à la partie nord (0.11 kg/ha), légèrement moins émettrice de P (Fig. 7). Cette répartition est cohérente avec l'existence de sols plus épais (et donc peut-être plus infiltrants) dans la partie nord par rapport aux parties centrale et sud du bassin (secteurs de Loyat, Guilliers, Néant sur Yvel, Mauron) dans lesquelles les sols sont moins profonds et donc probablement plus propices au transfert de P par ruissellement. Ces résultats tendraient donc à suggérer un ciblage des PSE dans la partie sud-centre du bassin versant pour un effet maximal sur la réduction des flux de P en entrée de lac.



**Figure 7.** Carte de répartition des concentrations pondérées du débit en  $P_{total}$  dans les têtes de bassins constitutives du bassin versant du Lac au Duc, montrant des concentrations plus élevées dans les parties centrales et sud du bassin versant, par rapport à la partie nord.

Les suivis effectués des concentrations en  $P_{total}$  et  $P_{PO4}$  à l'échelle des têtes de bassins-versants constitutives du bassin versant de l'Yvel-Hivet ont également permis de déterminer les concentrations de bases des sous bassins-versants forestiers (état pré-agriculture du bassin) et des sous-bassins versants dominés par la prairie permanentes (référence pour des parcelles bénéficiant d'un couvert végétal permanent). Les résultats (Fig. 8) montrent des concentrations en  $P_{total}$  d'un facteur 2 à 3 inférieures en moyenne pour les sous-bassins versants forestiers par rapport aux sous bassins-versants arables, les sous-bassins versants sous prairie occupant une position intermédiaire (facteur de division par rapport aux sous-bassins versants arables compris entre 1.5 et 2). On notera également une très forte atténuation des pics de crue dans les sous-bassins versants forestiers dénotant l'absence de mobilisation significative de  $P_{total}$  par ruissellement dans ces bassins. Une hiérarchie équivalente est observée pour les concentrations en  $P_{PO4}$ .



**Figure 8.** Séries temporelles comparant les concentrations en  $P_{total}$  au sein des différents sous-bassins versant du bassin de l'Yvel-Hivet en fonction de leur occupation du sol principal

**Ce qu'il faut retenir :** Les suivis des concentrations et des flux de P au sein du bassin versant du Lac au Duc montrent que les parties centrale et sud du bassin versant sont plus émettrices de P que le secteur nord.

Ainsi, un ciblage prioritaire des PSE dans la partie centre-sud du bassin est envisageable, avec un effet maximal sur la réduction des flux de P en entrée de lac.

## Question N°4

**Quels objectifs de réduction du flux de phosphore en entrée de lac doit-on viser en fonction des services fournis par le lac que l'on souhaite préserver/restaurer ? Autrement dit, par quel facteur doit-on diviser le flux actuel, dépendant du service ou de l'usage recherché au niveau du lac?**

*Rappel de la méthodologie déployée. La méthodologie a consisté à faire appel à la littérature et au lien que cette littérature fait apparaître entre concentrations en  $P_{total}$  et état trophique d'une masse d'eau, puis à classer les différents services fournis par le Lac au Duc et leur pérennisation ou restauration en fonction du niveau trophique du Lac.*

L'analyse de la littérature scientifique montre une certaine disparité des seuils de teneur en P retenus pour qualifier les niveaux trophiques et l'état écologique des retenues peu profondes du type du lac au Duc (Tableau 1). Dans ce travail les seuils les plus permissifs (teneurs en P les plus élevées) ont été retenus (seuils définis par Søndergaard et al. 2005), dans une perspective de limiter au maximum l'effort à opérer de diminution du flux en entrée du lac.

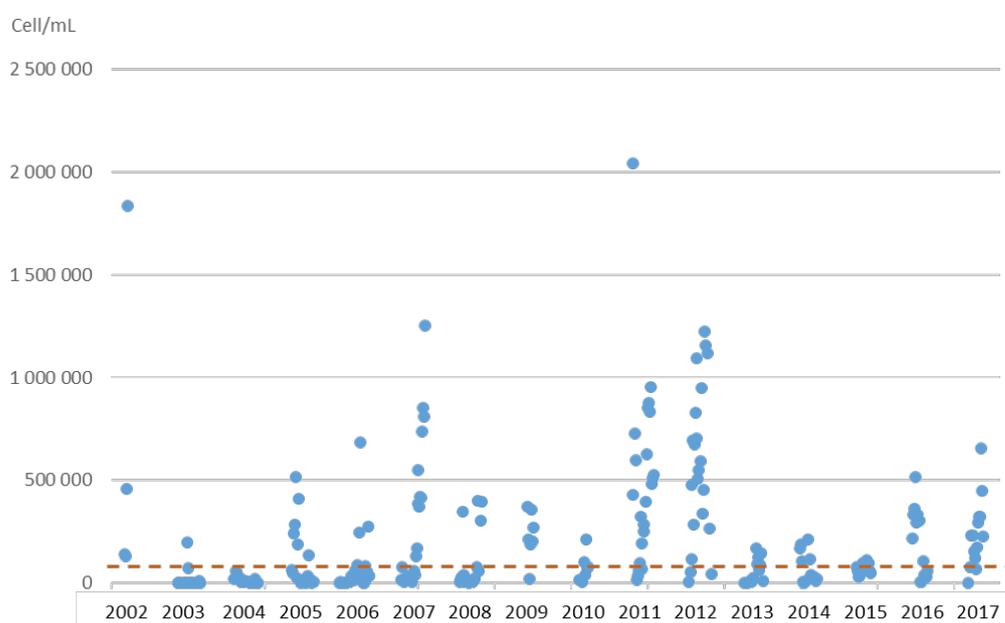
Paramètre	Etude	Ultraoligotrophe Tréb bon	Oligotrophe Bon	Mésotrophe Moyen	Eutrophe Médiocre	Hyper eutrophe Mauvais
P total ( $\mu\text{g/l}$ )	1	$[C]<5$	$5<[C]<10$	$10<[C]<30$	$30<[C]<100$	$[C]>100$
	2	$[C]<15$	$15<[C]<30$	$30<[C]<50$	$50<[C]<75$	$[C]>75$
	3	$[C]<25$	$25<[C]<50$	$50<[C]<100$	$100<[C]<200$	$[C]>200$
Chlorophylle a ( $\mu\text{g/l}$ )	1	$[C]<2,5$	$2,5<[C]<8$	$8<[C]<25$	$25<[C]<75$	$25<[C]<75$
	2	$[C]<10$	$10<[C]<20$	$20<[C]<30$	$30<[C]<50$	$[C]>50$
	3	$[C]<5$	$5<[C]<11$	$11<[C]<21$	$21<[C]<55$	$[C]>55$
Disque Secchi Transparence (m)	1	$T>6$	$6>T>3$	$3>T>1,5$	$1,5>T>0,7$	$T<0,7$
	2	$T>3$	$T>3$	$3>T>2$	$2>T>1$	$T<0,9$
	3	$T>2$	$2>T>1,5$	$1,5>T>1$	$1>T>0,8$	$T<0,8$

Tableau 1 : Liens entre teneur en P total et état trophique/écologique dans le cas des plans d'eau peu profonds. 1 : Nemery 2018 ; 2: Moss et al. 2003, 3 : Søndergaard et al. 2005.

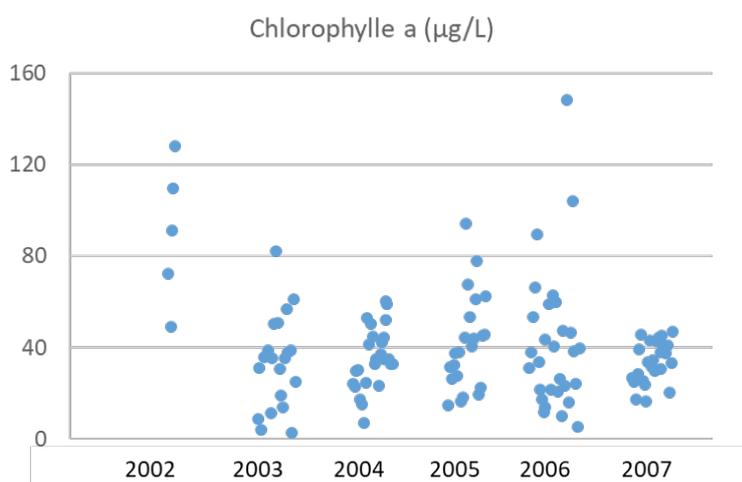
Un lien a ensuite été tissé entre concentration en P, niveau trophique/état écologique du Lac au Duc et services/usages fournis par ce lac. Cette mise en relation s'est faite à dire d'experts et est donc sujette à contestation ou révision. L'état trophique ultra-oligotrophe ( $[C]$  en  $P < 25 \mu\text{g/l}$ ) est vu comme l'état apportant la garantie la plus forte de la fourniture en permanence par le lac du service « baignade », et donc par voie de conséquence de l'ensemble des autres services (pêches, activités nautiques), le service « baignade » étant considéré comme le plus contraignant à la fois d'un point de vue sanitaire, et du point de vue des exigences qu'il impose quant au niveau de concentration en P en entrée de lac. Il est important de souligner ici que la cible d'une concentration moyenne en  $P < 25 \mu\text{g/l}$  en entrée de lac se superpose à la nécessaire diminution du stock de P présent dans les

sédiments du lac, et dont l'export vers l'aval prendra nécessairement du temps, une fois une bonne qualité d'eau restaurée en entrée de lac.

On rappellera qu'en France, la législation fixe une concentration de 100 000 cellules de cyanobactéries par ml comme concentration maximale autorisée pour pratiquer la baignade et une concentration  $<0.1 \mu\text{g}$  en toxines produites par les cyanobactéries (microcystine-LR, notamment) pour la production d'eau potable. On rappellera aussi que le seuil des 100 000 cellules est dépassé quasi chaque année dans le Lac au Duc avec des pics de concentrations en cyanobactéries pouvant atteindre 2 millions de cellules par ml (Fig. 9). On rappellera aussi que le Lac au Duc peut être vu comme un plan d'eau hyper-eutrophe sous l'angle de ses teneurs en Chlorophylle a (Fig. 10). On rappellera enfin que pour la pêche, la réglementation prévoit l'interdiction de la consommation du poisson en cas d'écume dans les zones d'efflorescence (voir <http://baignades.sante.gouv.fr>).



**Figure 9.** Concentrations en cyanobactéries relevées sur le Lac au Duc entre 2002 et 2017. Le seuil réglementaire des 100 000 cellules/ml est indiqué par la ligne pointillée rouge.



**Figure 10.** Teneurs en Chlorophylle a mesurées sur le Lac au Duc entre 2002 et 2017, classant le lac dans la catégorie des plans d'eau hyper-eutrophe.

Partant du seuil d'ultra-oligotrophie comme seuil garantissant l'ensemble des services ou usages du lac, une grille de déclassement du lac du point de ses usages/services a été construite par seuil d'augmentation du niveau trophique, le déclassement se faisant dans l'ordre baignade, pêche, activités nautiques, pour atteindre une perte totale de tous les services pour un état eutrophe/hyper-eutrophe (Tableau 2). Cette mise en relation « teneur en P<sub>total</sub> », « état trophique » et « service/usages du lac » fournit un cadre pour définir les niveaux de concentration en P à atteindre en entrée de lac pour garantir la pérennité dans le temps d'un usage/service fourni par le lac, ou la permanence dans le temps de sa restauration (cas de la baignade qui subit actuellement de fréquentes interdictions).

Compte tenu de la concentration moyenne annuelle actuelle de 100 µg/l de P en entrée de lac, il apparaît **qu'une division par un facteur 4-5 des émissions actuelles de P est nécessaire pour garantir l'ensemble des usages**, incluant l'usage « baignade » vu comme le plus contraignant du point de vue de l'état trophique du lac, une **division par 2-3 étant nécessaire pour garantir les seuls usages « pêche » et « activités nautiques »**.

Teneur en P total (µg/l)	Niveau trophique	Etat écologique	Activités praticables
[C]<25	Ultra-oligotrophe	Très bon	Baignade, Pêche, Activités nautiques
25<[C]<50	Oligotrophe	bon	Pêche, Activités nautiques
50<[C]<100	Mésotrophe	Moyen	Activités nautiques
100<[C]	Eutrophe/hyper-eutrophe	Médiocre/Mauvais	Aucune

**Tableau 2.** Mise en relation des teneurs en P à viser en entrée du Lac au Duc pour garantir tel ou tel usage/service fourni par ce Lac.

On notera que l'objectif de réduire le flux de P en entrée du Lac au Duc sous le seuil des 25µg/l est un objectif ambitieux qui peut nécessiter la mobilisation de tous les agriculteurs du bassin versant. Un objectif intermédiaire pourrait être de diminuer le flux de P agricole à l'échelle de sous-bassins versants particulièrement contributifs, comme ceux des sous-bassins versants situés dans les parties centrales et sud du bassin (voir précédemment). Dans ce cas, l'objectif de réduction du flux devrait être établi à partir du flux mesuré aujourd'hui à l'exutoire de ces sous-bassins versants. On verra par la suite à quel niveau de réduction du flux en entrée de lac un tel ciblage des actions pourrait permettre d'arriver.

On notera également que d'autres indicateurs, plus centrés sur les sols eux-mêmes, pourraient être utilisés pour évaluer l'efficacité de modifications de pratiques agricoles visant à réduire le flux de P agricole entrant dans le Lac au Duc. On pensera ici par exemple au taux de saturation en P du sol qui fournit une estimation à priori de la concentration en P d'une eau en équilibre avec un sol (ou un sédiment dérivé d'un sol). Un objectif de réduction du taux de saturation en P des sols du bassin versant du Lac au Duc, calibré sur la réduction visée de la concentration en P des eaux du lac, notamment pour ceux des sols contribuant le plus aux écoulements d'eau, pourrait donc constituer la base de contrats de type Paiements

pour Service Environnement proposés aux agriculteurs du bassin versant, en lieu et place de contrats ciblant une réduction sensu-stricto du flux.

**Ce qu'il faut retenir :** Afin de garantir l'ensemble des usages intrinsèquement liés à une bonne qualité de l'eau du Lac au Duc (baignade, pêche, activités nautiques), la littérature scientifique montre qu'une concentration en P au maximum de 0.025 mg/L doit être garantie en entrée de lac.

Par rapport à la concentration actuelle de 0.100 mg/L, l'objectif que l'on doit se fixer est ainsi de réduire le flux de P entrant dans la Lac au Duc d'un facteur au moins égal à 4.

## Question N°5

## Quels attributs techniques peuvent être proposés aux agriculteurs pour réduire le flux de phosphore agricole rentrant dans le Lac au Duc ? Comment estimer l'effet de l'appropriation de ces attributs par les agriculteurs sur la réduction du flux?

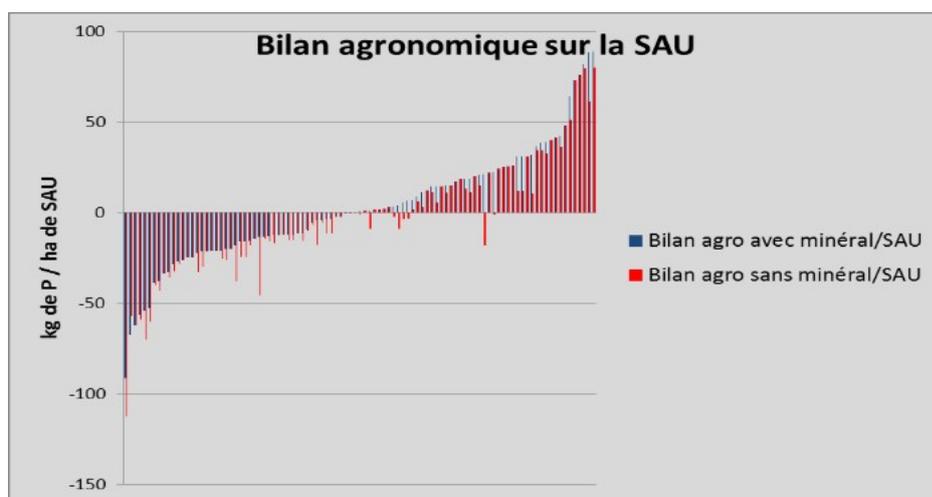
*Rappel de la méthodologie déployée. La teneur en P du sol et le ruissellement à la surface du sol étant, à dire d'expert, le principal mécanisme de mobilisation du  $P_{total}$  dans les bassins versants agricoles, il a été procédé à un inventaire des attributs techniques capables de réduire le flux de P transféré par ruissellement et érosion dans le contexte du bassin versant du Lac au Duc.*

Trois attributs techniques ont été au final retenus, incluant 1) l'arrêt de la fertilisation minérale phosphatée, 2) la mise en place de couverts végétaux permanents ; et 3) l'implantation de haies anti-érosives, perpendiculairement à la pente en limite de parcelle. Les visées de ces attributs du point de vue du flux érosif de P sont différentes. L'attribut « arrêt de la fertilisation » vise à diminuer la teneur en P directement au niveau du sol, et cible donc directement la source du flux érosif. L'attribut « couvert végétal permanent » vise à limiter le développement du flux érosif, en s'attaquant à un facteur clé de contrôle de ce flux. Le dernier attribut (« implantation de haies anti-érosives ») a lui pour objectif d'intercepter tout flux érosif produit, avant qu'il n'arrive dans le cours d'eau.

Concernant la situation actuelle du bassin versant vis-à-vis de ces attributs, on notera que la densité moyenne de haie bocagère est de 70m/ha, dont seulement 30% auraient un rôle antiérosif avéré. On notera également que des engrais minéraux phosphatés sont utilisés, notamment comme engrais starter pour la culture du maïs, et que les bilans de P demeurent excédentaires pour environ 50% des exploitations (notamment dans la partie sud du bassin versant), l'excédent étant en partie provoqué par l'apport d'engrais minéraux (Fig. 11). On notera enfin, que le semis sous-couvert assurant une couverture permanente du sol est pratiqué sur certaines parcelles du bassin versant, sachant néanmoins que cette pratique est pour l'instant totalement exclue des parcelles en maïs, lesquelles représentent entre 20 et 25% de la SAU du bassin suivant les années.

Estimer le coût de réduction du flux de P agricole émis par le bassin versant du Lac au Duc suppose de connaître les coûts d'adoption de chacun des trois attributs techniques retenus par les agriculteurs du bassin. Cela suppose également de pouvoir connaître à priori l'impact potentiel de chaque attribut sur les objectifs à atteindre de réduction du flux en entrée de lac. Cette estimation à priori de l'impact des attributs sur la réduction des flux émis a été effectuée par une modélisation à la parcelle pour les attributs « engrais » et « couvert végétal permanent ». Cette modélisation de l'impact attendu de l'adoption de ces deux attributs a été effectuée à l'aide du modèle APLE (Annual Lost Phosphorus Estimator) de l'*US Department of Agriculture*. Le modèle mobilise plusieurs données d'entrée qu'il convient de renseigner pour le faire fonctionner, à savoir des données sur le sol (profondeur, teneur en argile et en matière organique, teneur en P extractible), sur les précipitations, le ruissellement et le taux d'érosion, les apports de P organique et minéral, et enfin les exportations de P par les cultures. Les données de sortie du modèle sont les pertes de P par ruissellement et érosion en distinguant les formes dissoutes et particulaires du P. L'impact

de l'arrêt de la fertilisation minérale peut être simulé en attribuant la valeur « 0 » à cette entrée du modèle. L'impact de l'implantation d'un couvert végétal permanent peut être simulé en jouant sur un paramètre particulier du modèle appelé facteur « c », qui intègre le type de couvert et le travail du sol. Ce facteur « c » peut conduire à une diminution maximale du flux érosif d'un facteur 5, par rapport à une situation initiale sans couvert. Le choix a été fait dans cette étude de retenir cette valeur de réduction maximale du flux d'un facteur « 5 », comme valeur de base pour simuler l'effet de l'implantation d'un couvert végétal permanent sur la réduction des flux de P entrant dans le Lac au Duc.



**Figure 11.** Bilan de la pression Phosphore sur la SAU du BV de l'Yvel-Hyvet. Source : SMGBO

Concernant l'impact des haies anti-érosives, aucun modèle permettant de simuler l'effet de leur implantation sur le flux érosif de P n'a pu être remonté de la littérature. Des hypothèses ont donc dû être posées. Le parti-pris retenu ici a été d'attribuer un facteur de rétention du flux arbitraire de 50% pour une haie anti-érosive de 100 m implantée à l'aval d'une parcelle de 1 ha, ce facteur de rétention diminuant de manière linéaire et proportionnelle avec la diminution du linéaire de haie .

Au final, la réduction du flux érosif de P émis par le bassin versant en fonction de l'appropriation des trois attributs techniques proposés aux agriculteurs a été simulée en comparant le flux érosif actuel ( $Flux_{actuel}$ ) calculé par le code APLE et pondéré par le linéaire actuel moyen de haies anti-érosives existant sur le bassin, avec le flux érosif simulé ( $Flux_{simulé}$ ) par ce même code APLE en adoptant les attributs « arrêt de la fertilisation minérale » et « implantation d'un couvert végétal permanent », le résultat étant ensuite pondéré d'un effet implantation d'un linéaire de haies antiérosives. Le rapport  $F_{actuel}/F_{simulé}$  obtenu au final donne alors le facteur de réduction du flux en entrée de lac attendu du fait de l'adoption par les agriculteurs des trois attributs proposés.

On notera que le modèle APLE autorisant une réduction d'un facteur 5 du flux érosif de P en fonction du taux de couverture végétale du sol, ce modèle fournit une validation à postériori du choix de l'attribut « couvert végétal permanent » comme levier pouvant permettre

d'atteindre l'objectif fixé de réduire le flux de P agricole rentrant dans le Lac au Duc d'un facteur 4/5.

**Ce qu'il faut retenir :** Trois mesures sont envisageables pour réduire les émissions de P agricole, principales sources du P entrant dans le Lac au Duc, sans porter atteinte aux systèmes de production et à la structure des exploitations :

- arrêt de la fertilisation minérale phosphatée (objectif : diminuer la taille du stock de P du sol) ;
- mise en place de couverts végétaux permanents (objectif : limiter l'érosion des sols lors des épisodes de pluie) ;
- implantation de haies anti-érosives, perpendiculairement à la pente en limite de parcelle (objectif : capter le flux érosifs avant qu'il n'arrive dans le cours d'eau, dans l'hypothèse où l'implantation d'un couvert végétal permanent n'empêcherait pas son développement.

## Question N°6

**Comment estimer les coûts d'adoption par les agriculteurs du bassin versant du Lac au Duc des différents attributs techniques proposés pour réduire les flux de phosphore agricole rentrant dans le Lac? A quels coûts moyens à l'hectare arrive-t-on dépendant du, ou des attributs ciblés? Comment ces coûts varient-ils en fonction du type d'exploitation ?**

*Rappel de la méthodologie déployée. Il s'agit de déterminer le prix des attributs techniques identifiés, du point de vue des agriculteurs, de manière à pouvoir ensuite quantifier monétairement l'offre susceptible d'être faite par les agriculteurs du bassin versant du Lac au Duc en termes de services environnementaux (au sens d'actions permettant d'améliorer le fonctionnement de l'écosystème bassin versant-lac) dans le but d'améliorer/restaurer les usages/services fournis par le lac. En d'autres termes, il s'agit de quantifier le consentement à recevoir des agriculteurs (CAR).*

*Pour déterminer ces prix, la méthode utilisée a été la méthode des expériences de choix, basée sur les résultats d'enquêtes en face à face dans lesquelles plusieurs scénarios de Paiement pour Services Environnementaux (PSE) sont proposés aux agriculteurs, enquêtes lors desquelles sont également collectées des informations sur la sociologie des agriculteurs et la typologie des exploitations. Quatre niveaux de mise en place de couverts végétaux ont ainsi été proposés aux agriculteurs (20, 40, 60 ou 80% de la SAU), couplés ou non à trois niveaux de haies anti-érosives (40, 70 et 100 m par ha de SAU). La modalité « engrais minéral phosphatée » a été proposée selon une modalité autorisée ou interdite. Deux modalités de durée des contrats et quatre modalités de rémunération par ha de SAU ont été proposées (100, 200, 300, et 400€). On notera que les PSE proposés sont des PSE systèmes, c'est-à-dire portant sur toute la SAU de l'exploitation même si les attributs techniques proposés ne sont implantés que sur une partie de la SAU. Les enquêtes ont été conduites par 6 enquêteurs. Au final 52 agriculteurs ont répondu sur un total de 400 démarchés.*

Le traitement statistique des résultats a montré que l'attribut « engrais minéraux » n'était pas un élément déterminant du choix des agriculteurs (pas d'effet sur le prix demandé), très certainement lié au fait que l'abandon de la fertilisation minérale en P ne nécessite aucun investissement. Par contre, la culture du maïs est apparue comme un élément contraignant du prix demandé dans le cas de l'attribut « couvert végétal permanent », avec des paiements à l'ha très fortement augmentés (20% ou plus) dans le cas de la présence de la culture du maïs sur l'exploitation (voir Tableaux 3 et 4). Ce surcoût est très probablement à mettre en lien avec la difficulté technique que constitue la maîtrise des couverts végétaux sous maïs, et les risques de perte de rendement que la mise en place de ces couverts fait courir à la culture en cas de non maîtrise.

On notera que les coûts estimés ici – entre 300 et 600 € à l'ha, dépendant des mesures adoptées et de leur taux d'adoption - découlent d'expériences de choix dans lesquels il n'y a remise en question ni des systèmes d'exploitation, ni des volumes de production. Les PSE proposés sont des PSE « systèmes » par ha et par an, établis pour couvrir les coûts annuels de fonctionnement des attributs techniques proposés tout en intégrant certains bénéfices.

Ainsi, pour l'attribut « haie » les PSE proposés ont été construits de manière à couvrir les coûts d'entretien des haies et les pertes de rendement associées à leur implantation (effets de bordure), tout en intégrant les éventuels bénéfices générés pour la biodiversité. Les fourchettes de montants ont été établies en s'inspirant des aides de type MAEC proposées par la Région Bretagne dans le cadre de la PAC, ainsi que du résultat de discussions avec les agriculteurs du bassin versant du Lac au Duc. Le fait que les PSE proposés n'aient pas généré d'attitudes de rejet ou d'adoption massive de la part des agriculteurs enquêtés, indique que ces fourchettes correspondent probablement à une certaine réalité de coûts.

Poste	Modèle de prix (consentement à recevoir) d'épendant de	
	Absence de maïs	Présence de maïs
Coût fixe (engagement dans le mécanisme PSE)	130€/ha de SAU	130€/ha de SAU
Coût unitaire lié à ma mise en place d'un couvert permanent	3,2€/ha de SAU et par % de SAU couverte	3,2€/ha de SAU et par % de SAU couverte + 0,054€ par % de SAU en maïs
Coût unitaire lié à la mise en place de haies anti-érosives	1,1€ par mètre de haie anti-érosive par ha de SAU	1,1€ par mètre de haie anti-érosive par ha de SAU

**Tableau 3.** Consentements à recevoir des agriculteurs du bassin versant du Lac au Duc du point de vue des attributs « couvert végétal permanent » et « haies anti-érosives » tels qu'obtenus après dépouillement des résultats des enquêtes conduites auprès des agriculteurs du bassin.

Mesures	% SAU sous couvert permanent	Mètre linéaire haie/ha de SAU	Paiement/ha de SAU	Paiement total à l'exploitation
<b>Exploitation A</b> (cultures seules) SAU = 80 ha 0% prairie permanente 25% SAU en maïs	40%	20 m	334 €	26 720 €
	40%	100 m	422 €	33 760 €
	80%	20 m	516 €	41 280 €
	80%	100 m	604 €	48 320 €
<b>Exploitation B</b> (cultures seules) SAU = 40 ha 0% prairie permanente 0% SAU en maïs	40%	20 m	280 €	11 200 €
	40%	100 m	368 €	14 720 €
	80%	20 m	408 €	16 320 €
	80%	100 m	496 €	19 840 €

**Tableau 4.** Exemples de coûts à l'hectare de SAU et par exploitation pour deux exploitations fictives du bassin versant du Lac au Duc tels que déduits des résultats des enquêtes conduites auprès des agriculteurs du bassin.

On conclura en indiquant que les enquêtes n'ont pas révélées de différences majeures entre les grands types de système d'exploitation présents sur le bassin versant si ce n'est une

propension des exploitations en élevage laitier à conduire à des CAR légèrement plus faibles pour l'attribut « couverts végétal permanent », et une propension des exploitations en production porcine à conduire à des CAR plus élevés pour cet attribut du fait d'une plus grande proportion de parcelles en maïs, utilisées pour l'épandage des déjections porcines. Cette question du lien entre CAR et systèmes d'exploitation n'a toutefois pas pu être traitée avec le niveau souhaitable de précision, du fait d'un biais dans la population d'agriculteur ayant répondu, celle-ci comprenant une surreprésentation des éleveurs laitiers.

**Ce qu'il faut retenir :** Quatre points principaux sont à retenir :

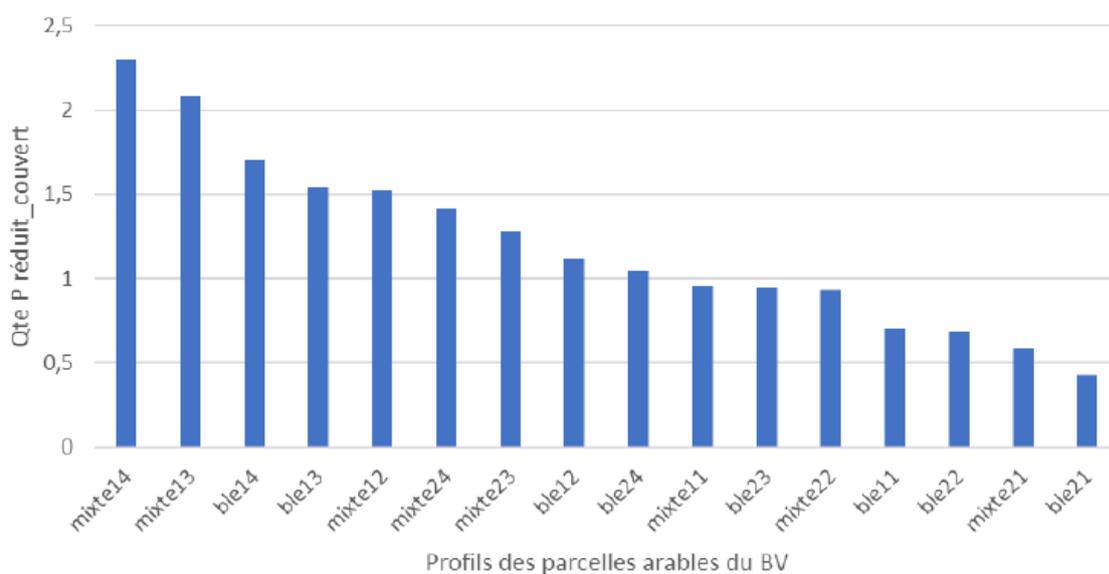
- l'arrêt de la fertilisation du sol en engrais minéraux phosphatés ne conduit à aucun coût ;
- concernant l'implantation d'un couvert végétal permanent et de haies anti-érosives, les montants demandés par les agriculteurs se décomposent entre une part fixe de 130€/ha de SAU et une part variable dépendant de l'effort consenti en matière de taux d'implantation de couvert végétal permanent et de linéaires de haies anti-érosives plantées ;
- la culture du maïs conduit à des montants plus élevés, sans doute du fait du risque que fait courir l'implantation de couverts végétaux sous culture sur les rendements ;
- au final, les montants demandés par les agriculteurs oscillent entre 300 et 600 €/ha dépendant du pourcentage de couvert végétal permanent et de la longueur de haie à implanter, et de la présence ou de l'absence de maïs dans l'assolement.

## Question N°7

**Quels sont les montants requis pour réduire les émissions diffuses de phosphore agricoles arrivant au lac ? Comment ces montants évoluent-ils en fonction de l'exigence de réduction de ces émissions ?**

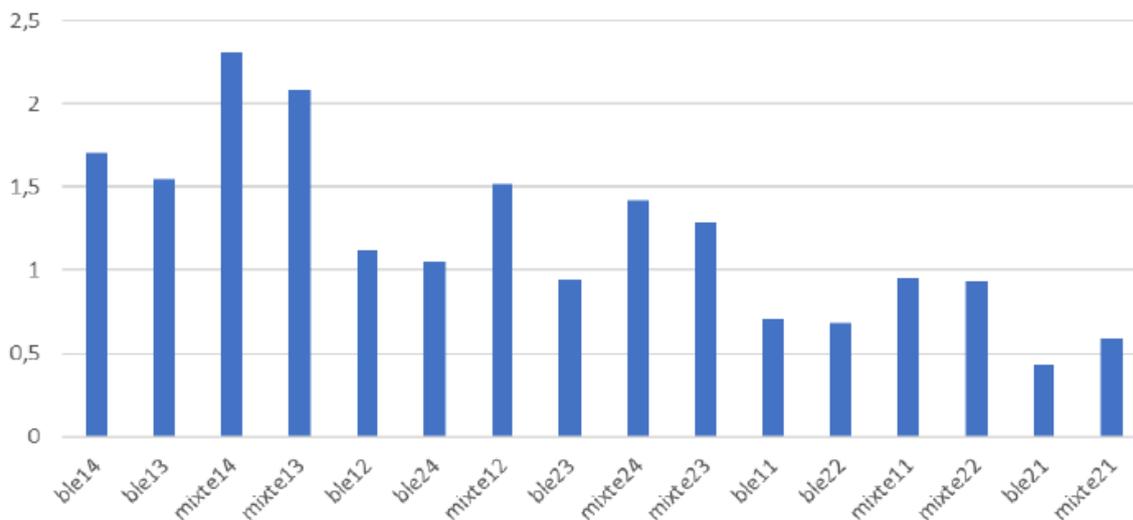
*Rappel de la méthodologie déployée.* La méthodologie déployée ici a consisté à classer les parcelles du bassin versant en grands types principaux pour pouvoir réaliser pour chaque parcelles des simulations des émissions actuelles de P et des émissions après implantations des attributs techniques proposés aux agriculteurs, simulations faites à l'aide du modèle APLE, puis à agréger les simulations de flux à l'échelle du bassin-versant pour calculer la réduction du flux obtenue en entrée de lac. 16 classes de parcelles arables ont été définies, sur la base des rotations de cultures (alternance blé-maïs et blé seul), de l'épaisseur des sols (épais et peu épais) et du risque d'érosion (4 classes de risque), auxquelles s'est ajoutée une classe prairie, caractérisée par un flux constant de P, et une classe autre déclinée également en 8 types suivant la profondeur du sol et le risque érosion. Les simulations ont été conduites sur une période de 50 ans. Dans chaque cas, le résultat correspond à la moyenne des 30 dernières années, après stabilisation des émissions.

De ces résultats, un premier classement des parcelles a pu être fait du point de vue de l'implantation d'un couvert végétal permanent limitant l'érosion par ordre décroissant d'efficacité de l'implantation sur la réduction du flux érosif à la parcelle (Fig. 12).



**Figure 12.** Classement des parcelles arables du bassin-versant du lac au Duc par ordre décroissant d'efficacité de réduction du flux de P suite à l'implantation d'un couvert végétal permanent (résultats issus du modèle APLE).

Ces résultats ont ensuite été transformés en rapport coût/efficacité en classant les parcelles non plus uniquement sur la base de l'efficacité de réduction du flux du fait de l'implantation d'un couvert végétal permanent, mais aussi sur la base du coût de cette implantation. Très logiquement, ce classement coût/efficacité a conduit à déclasser les parcelles mixtes très érosives mais contenant du maïs (effet surcoût de l'implantation d'un couvert végétal permanent sous maïs) au profit de parcelles de même érodabilité, mais cultivées uniquement en blé (Fig. 13).



**Figure 13.** Classement des parcelles arables du bassin-versant du lac au Duc par rapport cout/efficacité croissant. Les parcelles les plus coût efficace à gauche sont des parcelles à risque érosion fort cultivées en blé.

Partant de ces classements, des scénarios coûts/efficacité de réduction du flux de P en entrée de lac ont pu être construit en agrégeant à l'échelle du bassin versant les simulations de réduction de flux à la parcelle par implantation d'un couvert végétal permanent et en combinant ces simulations avec différents taux d'implantation de haie. Trois facteurs de réduction du flux en entrée de lac ont été visés : 2, 3 et 5.

Les résultats des simulations effectuées (tableau 5) montrent que réduire le flux de P entrant dans le Lac au Duc d'un facteur 2 ou 3 peut se faire soit en ciblant les parcelles les plus coût/efficaces du point de vue de l'implantation d'un couvert végétal permanent et en maximisant le linéaire de haie sur ces parcelles (100 m/ha), soit en étant moins contraignant sur le linéaire de haie et en enrôlant plus de parcelles, dont des parcelles moins coût/efficaces du point de vue du couvert végétal permanent. Dans les deux cas on voit que le non ciblage conduit à un surcoût, surcoût particulièrement manifeste dans le cas d'une réduction d'un facteur 2 (facteur 1.66).

Concernant la réduction du flux entrant d'un facteur 5, celle-ci n'est atteignable que si l'ensemble des parcelles est enrôlé, avec une maximisation sur chaque parcelle de la contrainte m linéaire de haie (100 m/ha).

Concernant les coûts globaux, on voit que ceux-ci se situent sur une base comprise entre 6 et 14 millions d’euros par an dépendant de l’objectif de réduction fixé et du ciblage ou du non ciblage des parcelles les plus coût/efficaces du point de vue de l’implantation d’un couvert végétal permanent.

Facteur de réduction	% de parcelles arables avec couvert permanent	m/ha linéaire de haie	Coût/an en euros
<b>2 (ciblage)</b>	50	100	6 170 000
<b>2 (non ciblage)</b>	74	20	10 400 000
<b>3 (ciblage)</b>	79	100	10 330 000
<b>3 (non ciblage)</b>	100	37	11 900 000
<b>5 (non ciblage)</b>	97	100	14 150 000

**Tableau 5.** Calcul des coûts induits par la diminution des flux en entrée de lac d’un facteur 2, 3 et 5 suivant que les mesures sont ciblées ou non sur les parcelles les plus coût/efficace du point de vue de l’implantation de couverts végétaux permanents et de haies anti-érosives.

On notera que des scénarios ont également été construits pour tester le type de parcelles qui serait enrôlé, et la réduction du flux que cet enrôlement génèrerait, si des paiements uniformes proches du CAR moyen (c’est-à-dire ne prenant pas en compte les surcoûts liés à la présence de maïs) étaient proposés. Les résultats montrent très clairement que l’absence d’enrôlement des parcelles en maïs est très pénalisante du point de vue de la réduction du flux, même si les coûts apparaissent moins élevés. Ainsi un paiement uniforme proche de la moyenne du CAR a la capacité d’enrôler l’ensemble des parcelles en blé du bassin, dont certaines très coût/efficaces, pour un coût global relativement modeste (2.4 millions d’euros), mais la réduction du flux est faible, n’atteignant même pas un facteur 2. Diminuer le flux d’un facteur 2 ou au-delà, impose d’enrôler des parcelles en maïs ce qui augmente forcément les coûts.

En conclusion de ces évaluations, il est important de pointer quelques limites des modélisations effectuées. Une première limite qu’il convient de mentionner est que la répartition des parcelles en un nombre fini de types oblige de mobiliser toutes les parcelles d’un même type dans la modélisation. Cela confère une certaine rigidité aux résultats obtenus. Une deuxième contrainte est que le classement coût/efficacité des parcelles est basé sur les assolements actuels, et la contrainte que ces assolements amènent sur les surcoûts liés à la culture du maïs. Dans l’hypothèse de l’implantation de PSE sur des durées 6-9 ans, rien ne dit que les assolements observés aujourd’hui, parcelle par parcelle, resteront stables.

Une troisième et dernière limite est liée au fait que le choix a été fait de figer les systèmes de production dans ce qu’ils sont aujourd’hui. En procédant à ce choix, on empêche des remaniements importants qui pourrait s’avérer plus efficace et moins coûteux du point de vue de la réduction des flux, comme par exemple l’arrêt de l’élevage ou le fait de privilégier certains ateliers animaux aux détriments d’autres, ou encore l’arrêt des cultures et le passage à l’herbe, voire au bio. Or, on sait qu’en économie, les contraintes sont

nécessairement coûteuses. Ceci étant, l'option de ne pas remettre profondément en cause les systèmes de production a été choisie parce que i) cette option est la plus réaliste à court terme (un remaniement important demande du temps), et ii) on peut difficilement imaginer que les agriculteurs enquêtés, pour lesquels chiffrer les évolutions proposées demande déjà un effort considérable, soient en mesure de chiffrer ce que coûterait un remaniement important de leur système de production, si tant est qu'ils soient disposés à rentrer dans l'exercice ce qui n'est pas du tout certain.

**Ce qu'il faut retenir :** Les montants à engager pour réduire les flux de P agricole en entrée du Lac au Duc varient suivant les exigences de réduction du flux visées et suivant que l'on cible ou non les parcelles les plus à risque du point de vue de l'érosion, et donc les plus coûteuses du point de vue des attributs de réduction du flux préconisés. Trois points principaux sont à retenir :

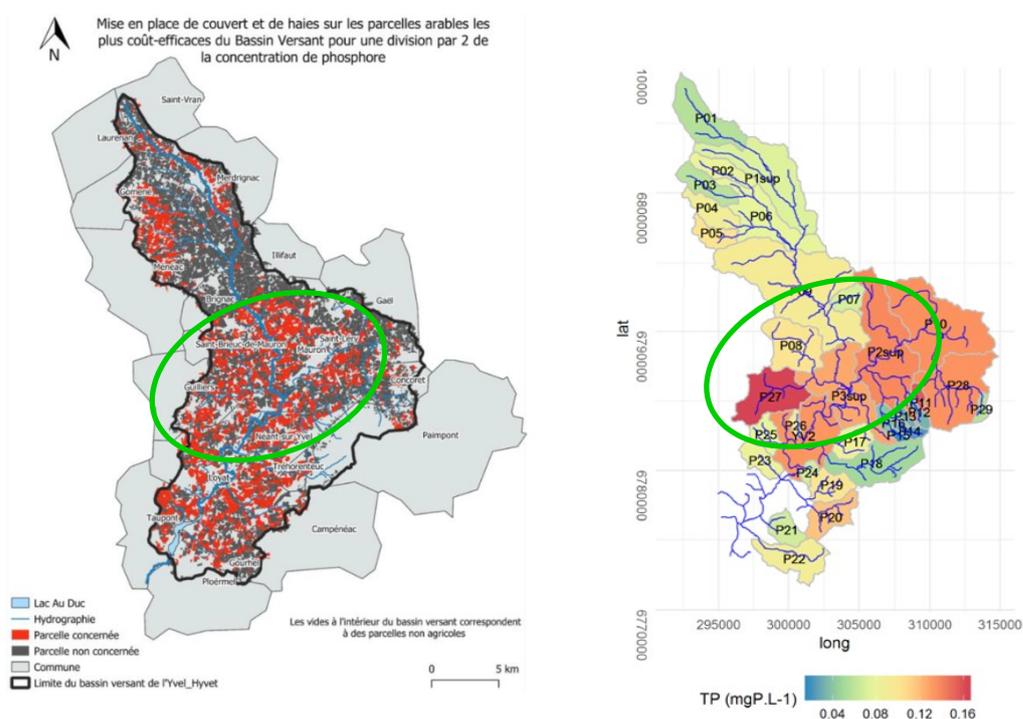
- une réduction d'un facteur 2 du flux peut conduire à des montants sensiblement différents suivant que l'on cible ou non les parcelles, les plus à risque ; le ciblage dans ce cas permet de réduire le coût de 10,4 millions € /an à 6.2 millions d'€/an.
- plus l'effort de réduction visé du flux de P agricole en entrée de lac est important, plus la différence entre ciblage et non-ciblage diminue ;
- visée une réduction du flux de P agricole en entrée de lac d'un facteur 4-5 demande d'embarquer l'ensemble des parcelles du bassin dans les PSE pour un coût estimé de 14 millions € par an.

## Question N°8

Une analyse coût/efficacité de la réduction des flux fait-elle apparaître un intérêt de cibler les PSE sur certaines parties du bassin versant? Ce ciblage correspond-il aux zones d'émission maximale de phosphore établies à partir des suivis faits aux exutoires des sous-bassins versants?

*Rappel de la méthodologie déployée.* La méthodologie déployée ici est la même que celle déployée pour répondre à la question 7 sauf que la question ici n'est plus de savoir si le ciblage réduit uniquement les coûts, mais si ce même ciblage conduit à cibler certaines parties du bassin versant au sein desquelles l'implantation de PSE pourrait être plus particulièrement coût/efficace du point de la réduction des flux de P en entrée de lac.

Ici, nous reprenons les résultats du scénario d'estimation des coûts de réduction du flux de P entrant dans le lac d'un facteur 2, réalisé en ciblant les parcelles les plus coût/efficaces. Ce scénario fait clairement apparaître une distribution non quelconque des parcelles sur lesquelles il serait intéressant de cibler des PSE, celle-ci montrant une surreprésentation des parcelles en question dans la partie centre/sud du bassin versant (Fig. 14). Cette localisation n'est pas quelconque puisqu'elle correspond aussi à la partie du bassin versant la plus émettrice de P (Fig. 14). On voit ainsi un lien se tisser entre le travail fait sur l'évaluation économique des coûts et le travail réalisé sur la spatialisation des flux. Ce lien n'est pas inattendu dans la mesure où le travail basé sur l'évaluation des coûts priorise les parcelles les plus sujettes à érosion et dans la mesure où l'on s'attend à ce que les zones du bassin où l'érosion est la plus forte soient aussi les zones les plus exportatrices de P.



**Figure 14.** Figure montrant la superposition entre zones d'émissions maximales de P diffus agricole dans le bassin-versant du Lac au Duc et zones de concentration des parcelles plus coût/efficaces du point de vue de la réduction des flux.

Le ciblage sectoriel qui apparait ici est d'une portée limitée dans la mesure où il ne permet de réduire le flux de P entrant dans le Lac au Duc que d'un facteur 2, la réduction d'un facteur 3 à 5, division nécessaire pour garantir tous les usages du lac, demandant à ce que la totalité des parcelles du bassin versant soit intégrée au processus de réduction des flux. Cependant, ce résultat peut permettre de définir des secteurs du bassin versant dans lesquels expérimenter en priorité l'implantation de PSE, sachant que les PSE implantés dans ces secteurs auront un maximum d'effet sur la réduction du flux en entrée de lac.

Par ailleurs, la concentration dans ces secteurs de parcelles très érosives et très coût/efficaces du point de vue de l'implantation de couverts végétaux permanents et de haies anti-érosives, peut rendre ces secteurs particulièrement propices à une évaluation ex-post des effets des mesures correctives préconisées, les effets sur la réduction du flux de P étant attendus être maximum du fait de la forte concentration dans ces secteurs de parcelles à risque « érosion » fort. En d'autres termes, l'implantation de PSE dans des sous-bassins du bassin versant du Lac au Duc concentrant des parcelles à risque « érosion » fort, même si elle n'aboutit en entrée de lac qu'à une division du flux d'un facteur 2 devrait conduire à une diminution beaucoup plus importante du flux de P à l'exutoire des sous-bassins versants en question, et donc à priori plus facilement détectable sur le court terme.

Nous rappellerons ici que les contrats PSE sont en théorie des contrats conditionnés à l'atteinte d'un objectif, et qu'il convient d'être en capacité de démontrer l'atteinte de cet objectif, dans l'optique de démontrer l'efficacité environnementale des PSE mis en place. Planter des PSE dans des sous-bassins versants cumulant une forte proportion de parcelles à risque « érosion » fort constitue aussi un moyen de vérifier l'efficacité environnementale de PSE bâtis sur les deux mesures préconisées ici, et aussi de calibrer, en conditions réelles, la conditionnalité de ces PSE à l'atteinte d'un objectif précis de réduction du flux de P.

**Ce qu'il faut retenir :** Un ciblage des parcelles les plus coût-efficaces tend à localiser l'effort d'implantation des PSE dans la partie centrale et sud du bassin, mais ce ciblage ne peut, au mieux, conduire à une réduction du flux de P agricole en entrée de lac que d'un facteur 2.

Ce ciblage correspond aux secteurs les plus émissifs de P agricole tels que déterminés par les analyses des concentrations en P effectuées dans le réseau hydrographiques, démontrant la cohérence des deux approches.

Il est néanmoins rappeler qu'une réduction du flux en entrée de Lac d'un facteur >3 nécessite forcément de mobiliser également des parcelles à risques faibles, moins coût-efficaces. Dans ce cas, l'aire d'implantation des PSE s'accroît et finit par englober la totalité du bassin versant.

## Question N°9

**A combien chiffre-t-on les dommages engendrés par le mauvais état écologique du Lac au Duc? Quelle est au final la balance entre offre et demande de services environnementaux pour le bassin versant du Lac au Duc?**

*Rappel de la méthodologie déployée.* La méthodologie déployée ici a consisté d'une part à estimer les dommages (et les surcoûts) qu'engendrent les blooms de cyanobactéries sur les différents usages du lac (baignade, pêche, activités nautiques) et les activités économiques qui en découlent (hôtellerie, camping, restauration, etc.). D'autre part à estimer les coûts des différentes mesures curatives déployées sur le lac lui-même pour tenter de limiter les efflorescences algales soit en utilisant des biocides ( $\text{CuSO}_4$  ;  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) soit en empêchant la disponibilité du P présent dans la colonne d'eau ( $\text{CaCO}_3$ ). A également été estimé le coût qu'aurait un dragage des sédiments, étant considéré que les sédiments peuvent constituer une source relais de P pour les cyanobactéries. Enfin, les dommages ont été évalué en tentant d'approcher la perte de bien-être à laquelle conduisent les interdictions d'usages dont est victime le Lac au Duc, avec trois usages ciblés : la baignade, la pêche et les activités nautiques. Cette perte de bien-être a été estimée sur la base d'enquêtes au cours desquelles des lacs fictifs permettant la pratique de telle et telle activité ont été proposés à des usagers du Lac au Duc (285 individus enquêtés), la distance entre le lac fictif proposé et le domicile des usagers étant utilisée pour estimer monétairement la perte de bien-être (sur la base du coût de l'essence nécessaire pour effectuer le trajet). L'agrégation des résultats à l'échelle des 180 000 personnes résidant dans le périmètre d'attraction du lac a permis d'atteindre une estimation quantitative du coût du mauvais état écologique vu du point de vue de ses usagers potentiels, ce coût pouvant être transformé en montant financier que ces mêmes usagers pourraient être à même de mobiliser pour contribuer à restaurer un bon état écologique du lac (évaluation du consentement à payer - ou CAP - des habitants ou de la demande potentielle de services environnementaux existant au sein de la zone d'influence du lac).

Les résultats obtenus à ce jour ne sont pas complets, les informations relatives aux pertes économiques directes étant en particulier difficiles à obtenir (tableau 6). Concernant ces dernières, il est probable qu'elles soient limitées. C'est le cas par exemple du club nautique qui a diversifié ses activités pour pallier aux interdictions de baignade. Idem pour les activités hôtellerie, restauration et camping sur lesquelles les dommages écologiques subits par le lac semblent avoir des impacts relativement faibles. Quels que soient les chiffres réels, il est très peu probable que le coût des dommages économiques directs approchent un tant soit peu les coûts des consentements à recevoir (CAR) des agriculteurs pour réduire les plus de P en entrée de lac.

Les coûts des actions curatives déployées pour lutter contre le développement des cyanobactéries dans le lac et permettre la permanence des activités baignade, pêche et nautiques est lui aussi très en-dessous du CAR estimé des agriculteurs. Le coût maximal est

celui induit par l'application de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en 2018, lequel a avoisiné 220 000 euros, soit 30 fois moins que le CAR nécessaire pour permettre la permanence de l'activité baignage. Sur ces bases, on peut considérer que l'offre et la demande de services environnementaux ne sont pas équilibrées, et que ni les acteurs privés tirant profit des services fournis par le Lac, ni les collectivités finançant les actions curatives déployées sur le lac ne sont en mesure de dégager les ressources financières nécessaires au déploiement des PSE requis pour diminuer les flux de P en entrée de Lac.

<b>Coût directs sur les usages du lac</b>	<b>Coût total (€)</b>	<b>Coût annuel (€)</b>
<b>Usage Eau Potable</b>		
Infrastructure (filière usine Lac au Duc)	?	?
Infrastructure (dérivation eau de l'Oust)	?	?
Surcoût/manque à gagner lié à utilisation ressource Oust	?	350 000
<b>Activités touristique</b>		
Club nautique	?	?
Camping	?	?
Restaurants	?	?
Pêche	?	?
<b>Coût indirects ressentis par les usagers du lac (perte de bien-être)</b>	<b>Coût total (€)</b>	<b>Coût annuel (€)</b>
En cas d'interdiction de toute activité (baignade, pêche, activités nautiques)		34 000 000
En cas d'interdiction de la baignade, mais maintien de la pêche et des activités nautiques		14 000 000
En cas de maintien des activités nautiques seules		29 000 000
<b>Coût indirects liés aux divers traitements curatifs opérés (ou projetés)</b>	<b>Coût total (€)</b>	<b>Coût annuel (€)</b>
<b>Rampe aération</b>		
Installation	?	?
Fonctionnement (électricité)	?	7 000
Entretien	?	?
<b>CuSO<sub>4</sub> (2003-2005)</b>		
3000 euros par épandage (2 ou 3 épandage par an?)	entre 18 000 et 27 000	entre 6 000 et 9 000
<b>CaCO<sub>3</sub> (2012-2015)</b>		
Construction et installation barrage (10 000 euros/an?)	40 000	10 000
Epandage (10 000 euros/an)	40 000	10 000
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (2018)</b>		220 000
<b>Curage sédiments (efficace pendant 30 ans. Non réalisé)</b>	20 000 000	830 000

**Tableau 6.** Synthèse des coûts engendrés par la mauvaise qualité des eaux du Lac au Duc

La situation est différente si l'on examine les résultats des enquêtes visant à quantifier monétairement les pertes de bien-être subites par les usagers du lac. Là, les montants estimés avoisinent, voire dépassent (jusqu'à un facteur 3) les coûts des PSE nécessaires à mettre en place sur le bassin versant pour réduire les flux de P en entrée de Lac à un niveau garantissant l'atteinte et la pérennisation d'une eau de lac de bonne qualité. Ainsi les résultats montrent qu'il existe une demande potentiellement suffisante pour abonder un fond permettant de financer des PSE sur le bassin versant du Lac au Duc, la question restant cependant de savoir comment capter cette manne (institution de péages directs pour accéder aux différentes activités offertes par le lac, institution d'un péage au niveau du parking, etc.) sans la tarifier.

**Ce qu'il faut retenir :** Le coût des dommages induits par le mauvais état écologiques s'élèvent à plusieurs millions €/an. Les coûts les plus élevés sont de très loin les coûts indirects liés à la perte de bien-être des usagers, lesquels peuvent aller jusqu'à >30 millions €/an en cas d'interdiction de tous les usages du lac.

Capter cette manne qui pourrait financer des PSE proposés aux agriculteurs suivant un principe usagers-payeurs reste toutefois un défi sans solution évidente aujourd'hui.