

Interreg 
EUROPEAN UNION

France (Channel
Manche) England

Channel Payments for Ecosystem Services

European Regional Development Fund



Rapport d'Implantation des PSE

Site pilote du Lac au Duc et du bassin- versant de l'Yvel-Hyvet, Ploërmel, France

Date : 7 janvier 2021

Rédacteurs : Consortium scientifique du site pilote « Lac au Duc » (Centre National de la Recherche Scientifique, Institut National de la Recherche Agronomique, Agrocampus Ouest, Université de Rennes 1, Sara Hernandez Consulting – Coordination : Syndicat Mixte du Grand Bassin de l'Oust).

Sommaire

Avant-propos : impact de la crise sanitaire sur l'étude pilote lac au Duc.....	3
1-Rappel du problème et des différentes phases de l'étude.....	5
1.a-Motivations pour la mise en place d'un mécanisme PSE sur le territoire du lac au Duc.....	5
1.b-Phasage de l'étude pilote.....	8
2-Objectif de réduction des émissions de phosphore et moyens d'action.....	10
2.a-Quantification des émissions et des sources de P dans le bassin versant.....	10
2.b-Analyse de la dynamique saisonnière du phytoplancton et des nutriments dans le lac.....	13
2.c-Evaluation du rôle des facteurs climatiques et nutritionnels sur la dynamique des cyanobactéries.....	15
2.d-Calibration de l'objectif de réduction des émissions aux usages.....	18
2.e-Moyens techniques mobilisables pour réduire les émissions en provenance du bassin versant.....	21
2.f-Moyens mobilisables pour réduire l'intensité des efflorescences de cyanobactéries à court terme (actions curatives).....	23
3-Dimensionnement de l'offre agricole de PSE	27
3.a-Quantification du consentement à recevoir (CAP) des agriculteurs à l'exploitation.....	27
3.b-Evaluation du besoin total en financement.....	30
3.c-Evaluation du coût de ne rien faire et de la valeur économique du lac.....	32
3.d-Mobilisation et conditions d'engagement des agriculteurs.....	35
4-Confrontation à la demande et aux critères d'engagement des entreprises.....	38
4.a-Stratégie déployée pour susciter et analyser la demande.....	38
4.b-Analyse des critères d'engagement des entreprises.....	40
4.3- Evaluation de la capacité de l'offre agricole PSE "lac au Duc" à être valorisable sous un angle "stockage de carbone".....	41
5-Négociation et mise en place des contrats	42
5.a-Stratégie déployée.....	42
5.b-Contenu et calendrier des actions en cours.....	44
5.c-Les points en suspens et les risques.....	46
Références citées.....	47

IMPACT DE LA CRISE SANITAIRE SUR L'ETUDE PILOTE

La crise sanitaire liée à la pandémie COVID-19 a fortement impacté l'étude pilote lac au Duc depuis son déclenchement en France début mars 2020, et continue encore à l'heure de la rédaction de ce rapport (octobre 2020) d'en perturber le bon déroulement. Les principaux impacts ont porté, et portent encore sur :

- 1) Les personnels affectés à l'étude. La post-doctorante employée à l'Université Rennes 1 (Morgane Le Moal) a dû se déclarer en Autorisation Spéciale d'Absence (ASA) pour garder son enfant à la maison pendant toute la période du confinement. Les administrations du CNRS et de l'Université de Rennes 1 ont travaillé de leur côté au ralenti pendant cette même période, retardant le traitement des pièces administratives comme les demandes de paiements auprès du programme INTERREG. Pendant le confinement, les laboratoires de l'Université n'étaient pas non plus accessibles. Ainsi, le technicien chimiste de l'Université Rennes1 n'a pas été en mesure de pendant cette période d'effectuer les analyses de suivi de la qualité des eaux du lac au Duc. Le confinement a aussi pénalisé le travail d'une étudiante de Master 2 (Rino lida) en charge d'évaluer la capacité à valoriser financièrement les attributs "haies anti-érosives" et "couverts végétaux permanents" du point de vue de leur capacité à stocker du carbone dans le sol de manière additionnelle, et à constituer ainsi les éléments de création d'un marché local de la compensation carbone volontaire. Il s'agissait, via ce travail, d'élargir l'offre de PSE conçue initialement pour améliorer la qualité de l'eau à la problématique du climat, cette diversification des cibles visant à accroître l'attractivité du mécanisme PSE "lac au Duc" du point de vue des entreprises privées. La période de confinement a rendu cet exercice très difficile et l'a restreint à une analyse de la bibliographie et à quelques entretiens à distance avec des acteurs du milieu de l'entreprise. Des exercices pourtant fondamentaux comme la mise en relation sous la forme d'ateliers d'agriculteurs vendeurs de PSE et d'entreprises potentiellement acheteuses pour une co-construction de contrats incluant une offre PSE "qualité de l'eau" et "climat/carbone" et répondant du point de vue de leur contenu et de leurs montants aux attentes à la fois des vendeurs et des acheteurs ont ainsi dû être ajournés sine die du fait de la crise du COVID-19.
- 2) Le travail avec les parties prenantes, agriculteurs et entreprises, pour mettre sur les rails le processus de négociation et de mise en place concrète des contrats PSE. L'impact sur cette partie de l'étude pilote est considérable. De fait, les contacts avec les agriculteurs et les entreprises sont à l'arrêt depuis début mars avec des perspectives de reprise non encore stabilisées. Concernant les agriculteurs, les deux mois de confinements ont stoppé net le travail de dimensionnement des contrats PSE amorcés durant l'hiver 2019-2020. Ce travail n'a pas pu reprendre une fois le confinement terminé, la période de sortie du confinement (mai) correspondant en effet pour les agriculteurs à la reprise des travaux extérieurs de semis (maïs, notamment) et de récoltes, les agriculteurs n'avaient plus de temps à consacrer aux échanges avec les scientifiques et le SMGBO. Une reprise de la concertation n'est aujourd'hui (octobre 2020) envisageable que vers la fin novembre 2020, une fois les travaux d'ensilage de maïs et de semis des cultures d'hiver terminés. Un retard au moins équivalent a été pris avec les entreprises contactées pour financer les PSE. Beaucoup d'entreprises ont vu leur activité arrêtée ou désorganisée pendant le temps du confinement. Beaucoup d'entre-elles sont par

ailleurs aujourd'hui plus soucieuses d'assurer leur survie économique que de participer au financement de PSE. Nous pensions que les contacts avec les entreprises pourraient reprendre à l'automne 2020. Le démarrage depuis septembre 2020 d'une deuxième vague très virulente de contamination au COVID-19 rend cette perspective très incertaine.

- 3) La production de livrables. Le retard dans la collaboration avec les agriculteurs et les entreprises aura forcément une incidence sur la livraison en temps opportun des livrables de l'étude pilote du Lac au Duc. En particulier, nous espérons signer les premiers contrats PSE d'ici fin 2020. Il est évident que cet objectif ne sera pas atteint, sans compter l'objectif d'évaluation de l'efficacité environnementale des paiements qui ne pourra qu'être lui-aussi reporté. A l'heure où nous écrivons ce rapport, la livraison de ces deux principaux livrables n'est envisageable, au mieux, que dans la deuxième partie de l'année 2021, raison pour laquelle nous nous sommes associés avec les autres partenaires du projet CPES pour demander une extension du projet au-delà de sa fin prévue actuelle (30 avril 2021).
- 4) La communication. La communication avec les vendeurs (agriculteurs) et les acheteurs de PSE (entreprises privées) a été totalement interrompue pour les raisons détaillées aux points 2) et 3). Nous sommes actuellement en train de réactiver la communication, sachant que les vendeurs (agriculteurs) ne seront pas réceptifs avant novembre 2020 pour les raisons de travaux extérieurs mentionnées plus haut.



Nota : ce symbole plus loin dans le rapport est là pour indiquer les parties du travail fortement impactées (ralenties) du fait de la crise sanitaire.

1-RAPPEL DU PROBLEME ET DES DIFFERENTES PHASES DE L'ETUDE

1.a-Motivations pour la mise en place d'un mécanisme PSE sur le territoire du lac au Duc

Comme de nombreuses retenues d'eau bretonnes, le lac au Duc est soumis au phénomène d'eutrophisation qui, dans le cas présent, se traduit par le développement de blooms massifs de cyanobactéries durant les périodes estivales (Figure 1). Les cyanobactéries peuvent nuire à l'environnement et à la santé humaine en raison de leur capacité à produire des métabolites toxiques et en raison de leur potentiel allergène (Wiegand & Pflugmacher 2005, Dittman et al. 2013, Lang-Yona et al. 2018). Par ailleurs, lorsque leur concentration devient importante, la baignade, les activités nautiques, et la pêche peuvent être interdites. La production d'eau potable peut également être rendue difficile, plus coûteuse, voire stoppée.

Les efflorescences de cyanobactéries sont déclenchées en premier lieu par des apports excessifs en nutriments. Dans les écosystèmes aquatiques d'eau douce, l'excès de phosphore (P) est généralement vu comme le facteur responsable du phénomène.

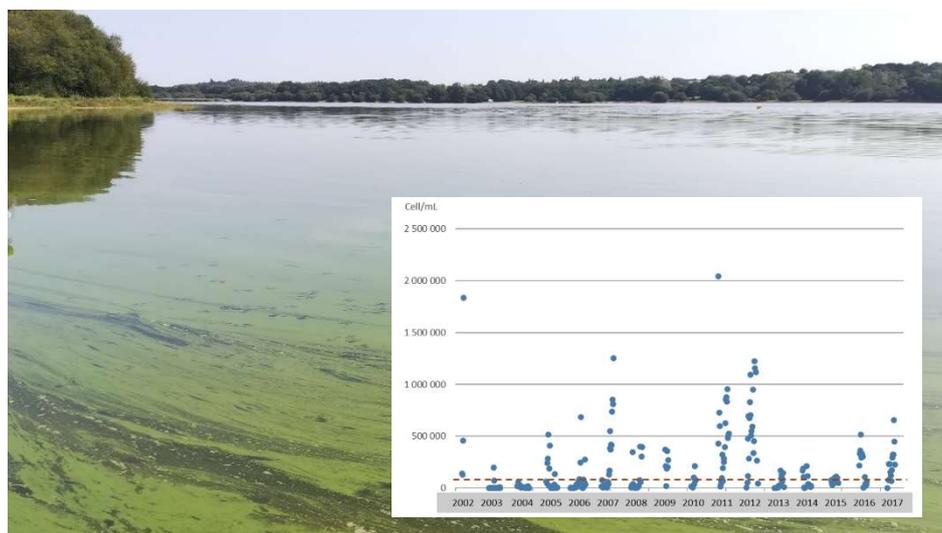


Figure 1 - Vue du lac au Duc depuis le Club nautique de Ploërmel Brocéliande, août 2018. Source : SMGBO. Le graphique inséré dans l'image, établi par M. Le Moal, montre les concentrations en cyanobactéries (en nombre de cellules par ml) mesurées depuis 2002. Pratiquement chaque été, un pic de concentration est observé avec des concentrations supérieures au seuil sanitaire de 100 000 cellules/ml indiqué par la ligne rouge pointillée

Le Lac au Duc s'étend sur les communes de Loyat, Taupon et Ploërmel, dans le Morbihan (sud-ouest de la Bretagne), et est alimenté par le bassin versant (BV) de l'Yvel-Hivet, à cheval sur les départements du Morbihan, des Côtes d'Armor et de l'Ille-et-Vilaine. Le volume d'eau stockée est d'environ 3 000 000 m³. Une fiche d'identité du lac et de son BV est présentée ci-après dans la Figure 2.

Bassin Versant de l'Yvel-Hyvet

Communes concernées : 22

Départements concernés : Morbihan, Côtes d'Armor, Ille-et-Vilaine

Source : Saint-Vran

Population: 21 300 habitants

Surface totale: 37 328 ha

Surface agricole utile (SAU) : 26 183 ha

Nombre d'exploitations agricoles en 2014 : 382

Linéaire de cours d'eau : 380 km

Lac au Duc

Superficie : 250 ha

Volume : 3,5 millions de m³

Affluents : l'Yvel ; les ruisseaux du Moulin du Miny, des Vieux Prés, de Saint-Jean.

Usages : captage d'eau potable, loisirs récréatifs et tourisme (pêche, activités nautiques, etc.)

Propriétaires : Eau du Morbihan, Ploërmel Communauté

Communes : Loyat, Taupont et Ploërmel

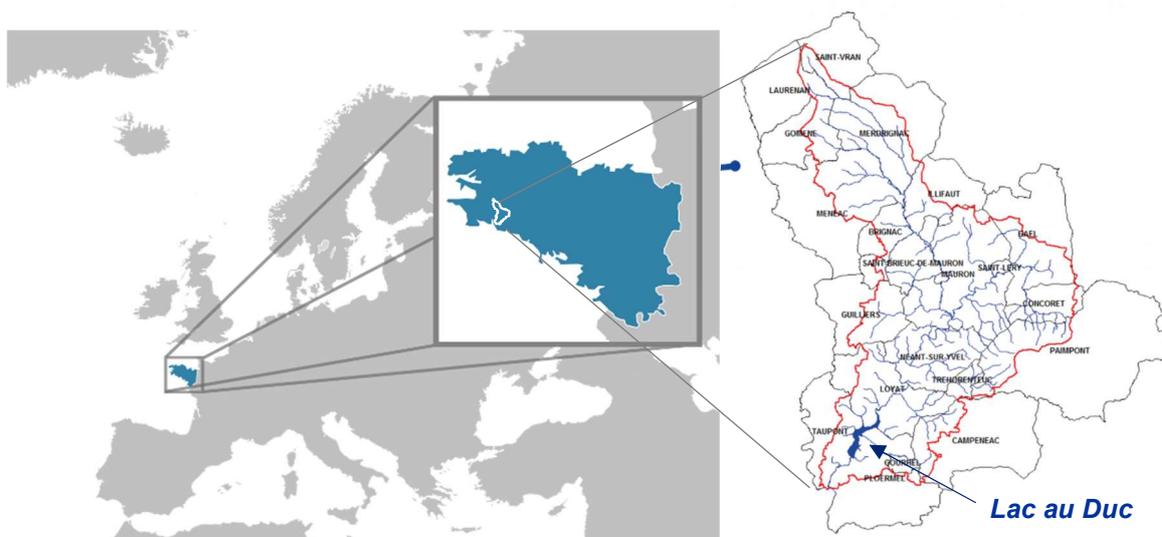


Figure 2 - Localisation et principales caractéristiques du Lac au Duc et de son du bassin-versant (bassin-versant de l'Yvel-Hyvet).

La rivière Yvel-Hyvet est identifiée pour ses fortes concentrations en P depuis la mise en place de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau en 2000. Le lac au Duc, de son côté, masse d'eau fortement modifiée, est déclassés jusqu'en 2021, du fait de ses problèmes d'eutrophisation et de ses blooms de cyanobactéries. En conséquence, la totalité du BV de l'Yvel-Hyvet qui alimente le lac est classé en zone 3B-1 par le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et des mesures spécifiques portant sur la fertilisation en P y sont définies.

Deux sources principales peuvent contribuer à enrichir le lac au Duc en P : 1) les activités agricoles (sources diffuses du P) ; 2) les rejets des stations d'épuration et des installations d'assainissement autonome implantés sur le BV (sources ponctuelles du P).

Huit stations d'épurations ont leurs rejets sur le BV de l'Yvel Hyvet. Les communes de Mauron et Merdrignac sont dotées d'une station d'épuration avec boues activées, auxquelles sont raccordées toutes les industries présentes sur ces communes. La station d'épuration de Concoret fonctionne avec un lit bactérien et celle de Tréhorentec, nouvellement créée, est de type filtres roseaux. Les communes de Guiliers, Néant sur Yvel, Saint Brieuc de Mauron et Saint-Léry ont un système de lagunage naturel. La commune de Brignac n'a aucun équipement d'épuration collectif. En 2010,

une étude estimait que 45 % des assainissements autonomes sur le BV de l'Yvel-Hyvet présentaient un risque accru de fuite de P ; seulement 20 % présentaient un bon fonctionnement, les 35 % restant étant à surveiller.

L'agriculture, de son côté, est dynamique sur le BV de l'Yvel-Hivet, représentant le principal secteur économique. La Surface Agricole Utile (SAU) est stable depuis 2012 représentant environ 63% de la surface totale du BV. En 2018, on dénombrait 448 exploitations agricoles sur le BV, pour une superficie moyenne par exploitation d'environ de 78 hectares. La production laitière est dominante au nord et au sud du BV, même si elle est en forte baisse ces dernières années. Cette baisse se traduit par une augmentation des surfaces cultivées, au détriment des prairies. Les élevages hors sol - porcs et volailles - se déploient quant à eux majoritairement à l'ouest et au centre du BV.

Les agriculteurs du BV de l'Yvel-Hivet sont impliqués de longue date dans des actions de réduction des pollutions diffuses, notamment en P. Ces actions impliquent : 1) un équilibre de la fertilisation en P (au moins 80% des exploitants étaient à l'équilibre en 2018, d'après enquête) ; 2) une souscription à des Mesures Agroenvironnementales et Climatiques (MAEC) pour un montant total de 520 603 € (en 2011, 98 exploitations étaient engagées dans une MAEC dont 52 en Mesure Agroenvironnementale Rotationnelle - MAER2, 2 645 ha - et 15 en Système Fourrager à faible niveau d'Intrants - SFEI, 306 ha -) ; 3) une pratique de plus en plus importante du non-labour (23 % de la SAU concernée) ; 4) l'implantation systématique de couverts végétaux en hiver (le BV de l'Yvel-Hyvet est classé en Zone d'Action Complémentaire (ZAC) depuis 2001 ; cela signifie que, d'une façon réglementaire, toute parcelle du bassin doit être semée soit en culture d'hiver, soit en Culture Intermédiaire Piège à Nitrates (CIPAN) en attendant la culture de printemps suivante; 5) une implantation systématique de bandes enherbées en bordure des cours d'eau ; depuis 2005, dans le cadre de l'éco conditionnalité, les agriculteurs du BV de l'Yvel-Hivet sont tenus d'implanter 3 % de leur surface déclarée en céréales, oléoprotéagineux ou gel, en bandes enherbées, de 5 mètres de largeur minimale, le long des cours d'eau présents sur leur exploitation; et enfin 6) l'implantation ou la ré-implantation de haies bocagères, notamment dans le cadre du programme Breizh Bocage (520 603 € accordés au titre de ce programme sur la période 2007-2020).

L'ensemble de ces mesures a contribué à réduire le flux de P diffus d'origine agricole entrant dans le lac au Duc, comme partout ailleurs en Bretagne où les flux de P diffus agricoles ont été réduits en moyenne d'un facteur 2 en 25 ans (Legeay et al. 2015). Il reste néanmoins que malgré ces efforts, le lac au Duc continue d'être régulièrement confronté à des blooms de cyanobactéries avec de nombreux dommages sur :

Le tourisme et les loisirs - Le lac au Duc est un centre de loisirs important de la région. On y pratique notamment la pêche (carpe, sandre, brochet, etc.), la voile, le ski nautique, le pédalo, le canoë-kayak, le stand-up paddle et on y trouve une plage qui attire au moins 800 personnes au cours de la saison estivale pour la pratique de la baignade. Plusieurs sentiers de randonnée pédestre sont aménagés sur les berges, dont celui baptisé "Tour du lac au Duc", d'une longueur de 15 km, et plusieurs sentiers de randonnée cycliste. Un golf se situe à l'extrémité sud du Lac et profite de l'environnement naturel. Le lac au Duc est également un lieu de chasse au gibier d'eau. Un camping, deux hôtels et plusieurs lieux de restauration se tiennent sur les berges du lac et s'appuient sur le caractère naturel du site. Concernant spécifiquement la baignade, celle-ci a été fermée quelques jours, voire une semaine durant la période de baignade autorisée en 2013, 2014 et 2015, ce qui reste relativement acceptable pour les usagers. En 2016 la baignade a été fermée pendant 3 semaines, et 6 semaines en 2017. Ces fermetures ont fortement impacté la

fréquentation du site, en lien avec la perte de l'offre de loisirs, et ont causé des pertes économiques pour les autres activités (nautiques notamment) et structures avoisinant le lac. De plus, la presse locale parle très souvent de ces problèmes d'eutrophisation et des impacts sur la baignade, contribuant à une publicité négative de la zone.

La production d'eau potable - L'usine de production d'eau potable située à l'aval du lac au Duc alimente 30 000 h pour un volume produit moyen annuel d'eau potable de 2 500 000 m³. Cette usine, construite en 1972 a fait l'objet de travaux d'adaptation pour répondre aux nouvelles exigences sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine et l'augmentation de la capacité nominale de traitement de 400 à 600 m³/h. Lors des développements de cyanobactéries, ces dernières sont difficilement retenues par floculation lors de leur arrivée dans l'usine de traitement (variation selon les espèces et leur abondance). Elles s'accumulent alors dans les filtres et les colmatent. L'été, l'usine du Lac au Duc pallie à cela (et au débit réservé) en pompant de l'eau au captage de l'Herbinaye situé sur l'Oust. Au coût cette dérivation, s'ajoute un risque de rupture si l'eau alimentant le captage de l'Herbinaye n'est pas disponible ou de qualité suffisante.

La biodiversité - Le lac au Duc et son environnement immédiat constitue un espace naturel remarquable, dont le bon fonctionnement est menacé par la dégradation persistante de la qualité de l'eau du Lac. En particulier, le site comprend une Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF). Des associations environnementales travaillent et font des inventaires des différentes espèces de faune et de flore au bord du lac. En 2012, sept espèces de flore ont été identifiées sur le lac comme espèces protégées, dont 6 en protection nationale. Parmi ces espèces, nous pouvons citer la présence du Coléanthe délicat (*Coleanthus subtilis*) qui est uniquement présent dans moins d'une vingtaine d'étangs armoricains. Par ailleurs, les proliférations de cyanobactéries altèrent la dynamique des autres populations de phytoplancton et le développement des macrophytes de par leur capacité à consommer efficacement la lumière et les nutriments, ou par l'effet des toxines qu'elles émettent dans le milieu (voir par exemple Wiegand et Pflugmacher, 2005). Le zooplancton est également affecté du fait de la faible valeur nutritive des cyanobactéries, ce qui conduit à perturber l'ensemble des chaînes trophiques et, au final, le bon fonctionnement de tout l'écosystème aquatique (voir par exemple Huisman et al., 2018).

1.b- Phasage de l'étude pilote

Face à la persistance de la dégradation de la qualité des eaux du lac au Duc et à l'insuffisance des actions agricoles entreprises jusqu'ici à réduire les flux de P entrant dans le lac à des niveaux suffisants pour en restaurer/garantir les différents usages (voir plus loin), le SMGBO et ses partenaires ont considéré opportun de rejoindre le projet INTERREG CPES sous l'argument que les outils financiers innovants que sont les Paiements pour Services Environnementaux (PSE) pouvaient constituer un levier permettant de franchir le saut quantitatif nécessaire à l'atteinte de ces niveaux. Dès l'origine du projet, il a été décidé que l'étude pilote "lac au Duc" ciblerait des financeurs privés, avec l'idée double 1) de pouvoir disposer de fonds importants, non soumis aux limites de volume et/ou aux demandes préalables de notification à Bruxelles auxquelles sont soumis les fonds publics, et donc d'être attractif vis-à-vis des agriculteurs, et 2) de répondre à la demande exprimée par ces derniers d'avoir en face deux plutôt des financeurs privés, et non des financeurs publics en qui ils disent ne plus avoir confiance.

L'étude pilote Lac au Duc se déploie suivant quatre étapes successives, en plus de l'étape préalable de définition de l'état des lieux environnemental du lac et de l'identification de l'ensemble des acteurs concernés par cet état et par les différents usages du lac (voir aussi Figure 3) :

Etape 1 : Définition de l'objectif qualité d'eau et identification des moyens pour l'atteindre.

Cette étape comporte une phase d'estimation du flux de P entrant actuellement dans le lac au Duc et de quantification de la part respective des sources de P diffus agricole et de P ponctuel domestique au sein de ce flux. Elle comprend également une phase de définition de l'objectif que l'on souhaite atteindre du point de vue de la réduction du flux de P entrant dans le lac, et de calibration de cet objectif avec les différents usages du lac que l'on souhaite préserver/restaurer. Même si les sources diffuses de P agricole pouvaient paraître les plus importantes sur le papier compte tenu du contexte très agricole du BV du lac au Duc, la phase de quantification des parts respectives des flux diffus agricoles et ponctuels domestiques de P constitue un préalable indispensable au choix de mesures à mettre en place pour diminuer les flux de P entrant dans le lac et atteindre l'objectif visé de restauration de sa qualité de l'eau et de restauration/pérennisation des usages qu'il fournit. Cette étape 1 comporte également un travail de localisation des principales sources de P diffus agricole dans le BV et d'identification des attributs techniques dont les agriculteurs pourraient se saisir pour réduire ce flux et dont la mise en œuvre pourrait constituer leur offre de PSE. Le travail de localisation des sources a pour but de savoir si le déploiement de ces attributs pourrait être ciblé en priorité sur certains secteurs du BV, dans un souci de diminution des coûts tout en étant le plus efficace possible du point de vue de l'atteinte de l'objectif de réduire très significativement le flux de P entrant dans le lac. Elle comporte enfin une étape de collecte et d'interprétation des 15 années de suivies des blooms de cyanobactéries affectant le lac. Les données sur la dynamique des algues sont croisées avec celles sur la dynamique de la disponibilité en nutriments et des conditions climatiques (température, ensoleillement, vent, précipitations). Cette analyse des données historiques est complétée par l'acquisition de données nouvelles sur la dynamique des cyanobactéries et du zooplancton en trois points du lac, en liens avec la dynamique des nutriments (P et azote = N).

Etape 2 : Evaluation des besoins en financement (consentement à recevoir ou CAR) des agriculteurs, incluant une comparaison de ce CAR avec la valeur économique d'un lac en bon état écologique.

Il s'agit ici d'évaluer des besoins en financement des agriculteurs en fonction des objectifs à atteindre et du ciblage ou non des actions sur les parcelles les plus coût-efficaces. Il s'agit autrement dit de calibrer le CAR des agriculteurs en fonction de l'objectif qualité de l'eau visé pour le lac. Il s'agit aussi de comparer ce CAR à la valeur économique d'un lac en bon état écologique pour en évaluer la recevabilité économique. Il s'agit aussi de comparer ce CAR aux coûts engendrés par les actions curatives mises en place au niveau du lac pour réduire l'intensité des blooms de cyanobactéries et permettre ainsi le maintien des usages touristiques (dont la baignade) ainsi que la production d'eau potable. Il s'agit plus globalement dans cette étape de définir les caractéristiques économiques des PSE à mettre en place pour restaurer et pérenniser le bon état écologique du lac au Duc, en comparant le coût global des actions rémunérées à l'ensemble des coûts engendrés par l'inaction.

Etape 3 : Evaluation des conditions d'engagement des entreprises et de leur consentement à payer (CAP).

Il s'agit dans cette étape d'identifier les entreprises susceptibles de participer au financement de l'offre de PSE construite par les agriculteurs du BV du lac au Duc. Il s'agit aussi d'évaluer leur consentement à payer (CAP), et les éventuelles adaptations à apporter à l'offre agricole en cas de CAP inférieur au CAR.

Etape 4 : Construction et signature de contrats à l'échelle d'un territoire expérimental. Il s'agit dans cette dernière étape de construire et de mettre en place une première série de contrats PSE à l'échelle d'un territoire expérimental, après une étape de négociation visant à faire converger le CAR des agriculteurs et le CAP des entreprises. Il s'agit aussi de définir un cadre juridique convenant aux deux parties et permettant un déploiement sécurisé des contrats. Il s'agit enfin de définir les processus de labellisation et les indicateurs de suivis à mettre en place pour garantir l'efficacité environnementale des PSE mis en place

2-OBJECTIFS DE REDUCTION DES EMISSIONS DE PHOSPHORE ET MOYENS D'ACTION

2.a-Quantification des émissions et des sources de P dans le bassin versant

La quantification du flux de P entrant dans le lac au Duc a été réalisée en collectant et en analysant les analyses de concentration en P effectuées par le 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/an. L'analyse de ces données montre une variabilité inter-annuelle importante du flux de P entrant dans le lac à l'échelle (Figure 4), variabilité liée aux variations interannuelles du débit de l'eau et des précipitations. Les valeurs du flux, exprimées en Kg de P par hectares (ha) et par an, varient entre 0.1 (2017) et 1.1 (2014), avec une **valeur moyenne du flux** sur la période s'établissant à **0.23 KgP/ha/an**. On notera que ce flux situe l'Yvel-Hivet dans la catégorie des rivières exportant le moins de P à l'échelle de la Bretagne, même si ce flux reste très au-dessus du seuil d'eutrophisation des masses d'eau lenticques comme le lac au Duc.

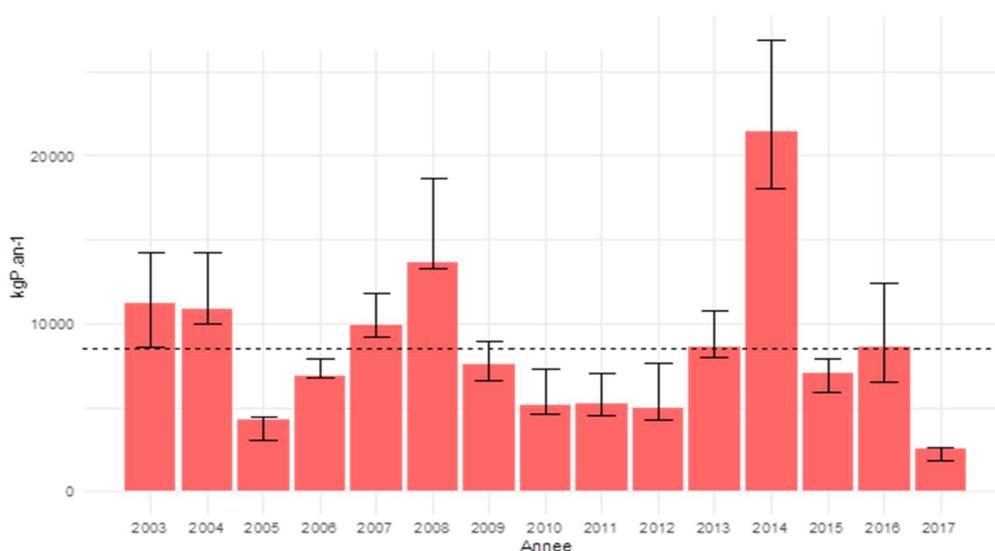


Figure 4 - Flux annuel de P calculés en entrée du Lac au Duc sur la période 2003 – 2017. Le flux annuel moyen sur la période est de 8506 Kg.P.an⁻¹.

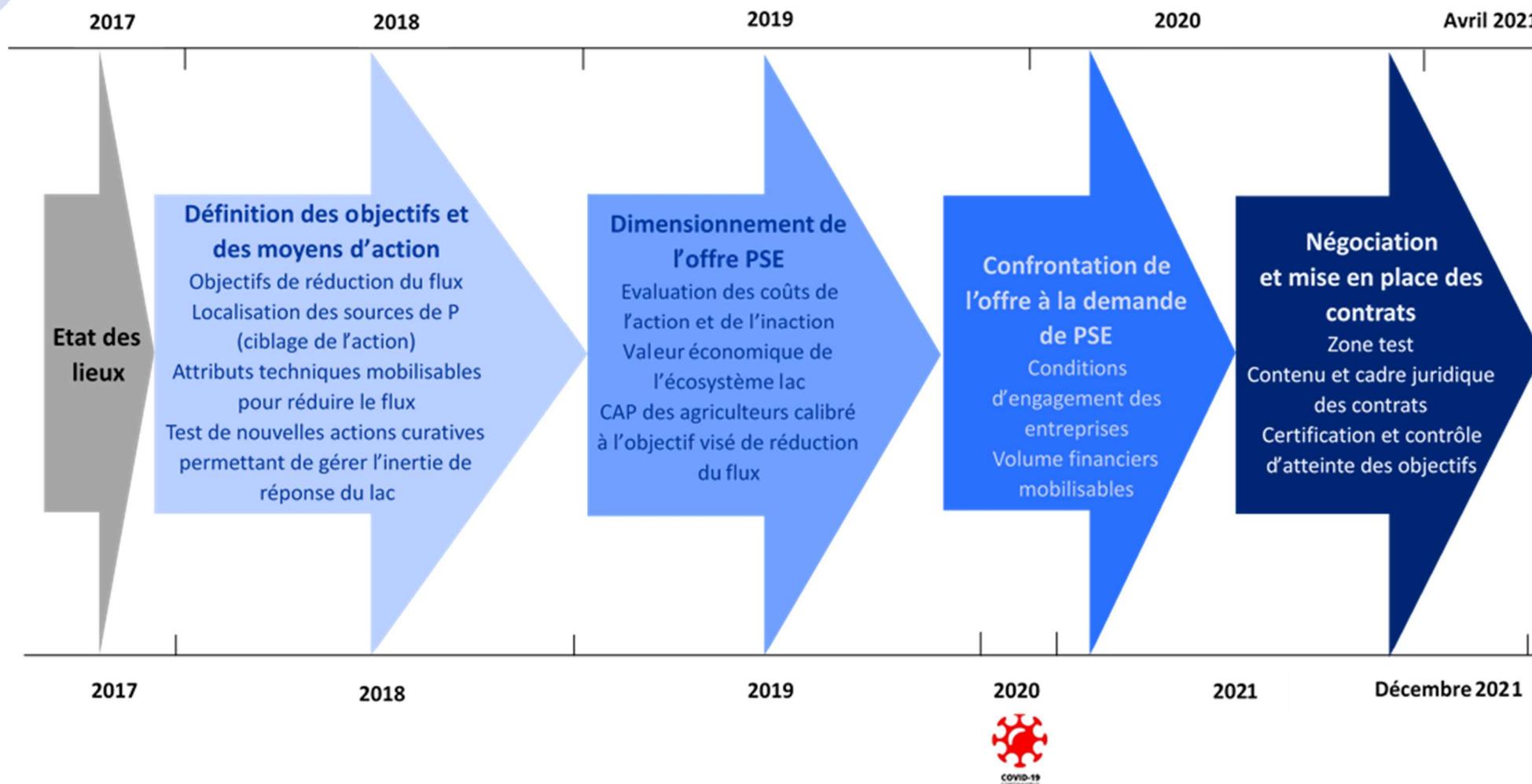


Figure 3 : Les différentes étapes suivies pour la mise en place de PSE dans le cadre de l'étude de cas Lac au Duc. Le calendrier situé en haut de la figure correspond au planning initial de l'étude. Le calendrier situé en bas de la figure correspond au nouveau calendrier tenant compte du retard pris dans le déroulement de l'étude du fait de la crise sanitaire du COVID-19 et de la nécessité d'adapter l'offre de services environnementaux à la demande des entreprises.

Aucune tendance ni à la hausse, ni à la baisse n'est détectée du point de vue de ce flux sur la période considérée (Figure 4). Ceci veut dire que le flux moyen annuel de P de 0.23 KgP_{total}/ha/an calculé entre 2003 et 2017 peut être vu comme 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 pondérée du débit** en entrée de lac de **0.100 mg/l**. Cette valeur peut être prise comme la concentration guide correspondant à l'état "0" du lac avant tout nouveau plan d'action visant à réduire les apports de P en provenance du BV. On notera que l'absence de tendances à la baisse des flux et des concentrations de P est très différente de la situation du nitrate dont les concentrations en entrée de lac ont diminué d'un facteur 2 entre 2007 (40 mg/l de NO₃ en moyenne) et 2017 (20 mg/l en moyenne). On notera que le P entrant dans le lac est constitué à >80% de P_{particulaire}.

Deux campagnes de mesure ont été réalisées dans le cadre du projet CPES 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 (P_{total} et P_{PO4}) émis par ces stations. Les chiffres obtenus ont été comparés aux données d'autocontrôle fournies par les exploitants de ces stations au SMGBO, l'ensemble servant à quantifier la part des flux ponctuels domestiques et diffus agricoles dans l'ensemble du flux de P rentrant dans le lac au Duc. Le flux de P d'origine domestique/industrielle est estimé par cette méthode à **0.018 KgP/ha/an**, soit environ 10% du flux total rentrant dans le lac au Duc, **renvoyant ainsi la très grande majorité de ce flux (90%) aux émissions diffuses d'origine agricole**. On notera que 80% du flux ponctuel domestique/industrielle est constitué de la forme dissoute P_{PO4}. On notera aussi que ce chiffre de 90% du flux total de P d'origine diffuse agricole cache des disparités saisonnières. En été, le flux ponctuel domestique/industriel prend largement le pas, du fait de la déconnexion hydrologique des sources agricoles des cours d'eau. L'incidence reste néanmoins limitée, le flux total de P entrant dans le lac étant à ce moment de l'année très faible (Figure 5).

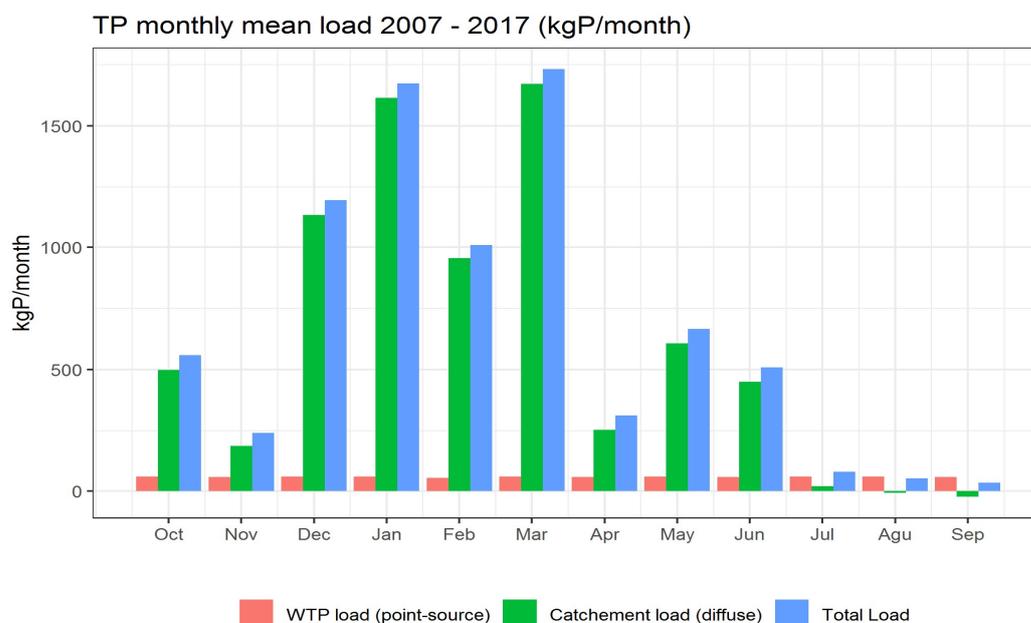


Figure 5 : Variations sur une base mensuelle des quantités de P d'origine diffuse agricole (catchment load (diffuse)) et ponctuelle, domestique et/ou industrielle (WTP), rentrant dans le Lac au Duc, par rapport aux flux totaux mensuels (total load).

Dans l'optique d'évaluer si une sectorisation des émissions de P agricole existe au sein du BV du lac au Duc avec pour corollaire la possibilité de cibler l'implantation de PSE aux zones les plus émettrices, 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 entre mars 2018 à juillet 2019. Trente et une campagnes d'échantillonnage ont été réalisées au total dans le cadre du projet CPES permettant de dessiner une cartographie relativement fine de la variabilité spatiale des émissions de P agricole diffus dans le BV. Les résultats montrent des flux sensiblement plus élevés (d'un facteur 1.5 en moyenne) dans les parties centrales et sud du BV, par rapport à la partie nord, légèrement moins émettrice de P (Figure 6). Cette répartition est cohérente avec l'existence de sols plus épais (et donc peut-être plus infiltrants) dans la partie nord par rapport à la partie centrale et sud du bassin (secteurs de Loyat, Guilliers, Néant sur Yvel, Mauron) dans lesquels les sols sont moins profonds et donc probablement plus propices au transfert de P par ruissellement. Ces résultats tendent à suggérer qu'un ciblage des PSE visant à réduire les émissions diffuses de P agricole dans la partie sud-centre du bassin versant pourrait avoir un effet maximal sur la réduction des flux de P en entrée de lac.

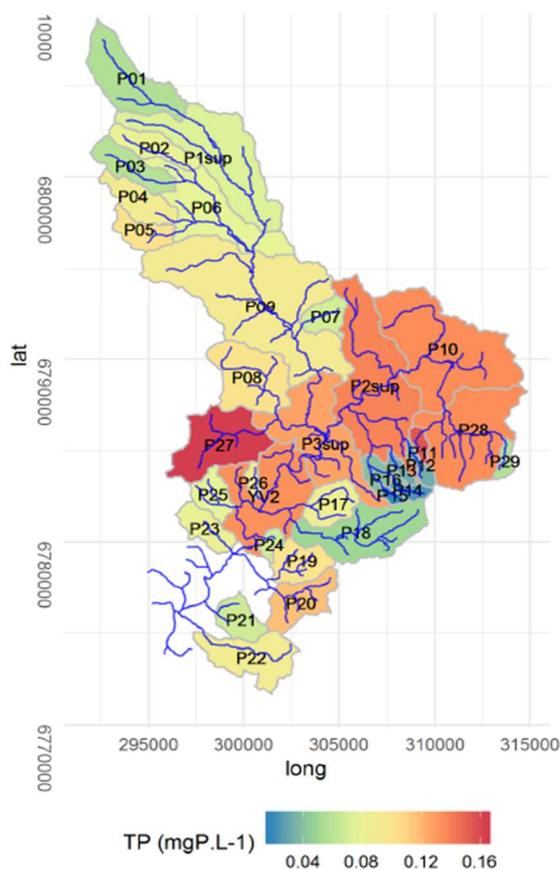


Figure 6. Carte de répartition des concentrations pondérées du débit en P dans les têtes de bassins constitutives du bassin versant du lac au Duc, montrant des concentrations plus élevées dans les parties centrales et sud du bassin versant, par rapport à la partie nord.

2.b-Analyse de la dynamique saisonnière du phytoplancton et des nutriments dans le lac

Les dynamiques du plancton et des nutriments (P et N) ont été analysées sur un cycle saisonnier complet (2018-2019) en entrée, au milieu et à l'aval du lac. Les trois stations ont révélé des niveaux et des dynamiques des concentrations en nutriments très similaires (Figure 7A), l'azote total,

l'azote dissous total et les nitrates-nitrites montrant des concentrations maximales en hiver, les concentrations en P_{total} , P_{total} dissous et en orthophosphates étant à l'inverse maximales en été. La concentration d'azote total variait de 0,8 mg N- $\text{NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ en été à 10,3 mg N- $\text{NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ en hiver. Les concentrations de phosphore total étaient proches ou inférieures à la limite de quantification (0,019 mg PL^{-1}) de janvier à mai, mais atteignaient 0,3 mg PL^{-1} à la fin de l'été 2018. Cette opposition des dynamiques saisonnières peut être reliée à des processus de dénitrification intenses en été combinés à la libération de P par les sédiments (Søndergaard et al. 2002, Dolman et al. 2016). De juin à décembre, le phosphore total était principalement composé de phosphore particulaire. Ces concentrations élevées de P classent le Lac au Duc dans la catégorie des plans d'eau de mauvaise qualité dits hypereutrophes (voir tableau 1). Ces concentrations élevées coïncidant avec la période de réduction ou d'arrêt des apports de la rivière vers le lac, elles trouvent probablement leur origine dans les sédiments qui servent de réservoir intermédiaire de stockage du phosphore apporté par la rivière.

Cette figure est identique à une figure contenu dans un article soumis pour publication dans une revue scientifique internationale.

Elle ne peut donc pas être reproduite ici pour l'instant.

Figure 7. A) Concentrations en nutriments en entrée, au milieu et en dans la partie aval du lac pendant le cycle saisonnier 2018-2019. TN: azote total; TDN: azote total dissous; TP: phosphore total; TDP: phosphore total dissous. Zone grisée: limite de quantification. B) Dynamique du phytoplancton pendant la même période et aux mêmes endroits du lac.

La dynamique du phytoplancton est aussi apparue très similaire à l'entrée, au milieu et dans la partie aval du lac pendant la même période (figure 7B). Il n'y a pas eu de cyanobactéries en hiver et au printemps, alors que les cyanobactéries ont dominé la communauté phytoplanctonique à

hauteur de 70-100 %, d'abord de juin à décembre 2018 puis de juin à août 2019. Un élément intéressant du cycle saisonnier est la forte variabilité interannuelle observée entre les étés 2018 et 2019 : alors que les efflorescences de cyanobactéries ont atteint 1,5 million de cellules mL⁻¹ en 2018, elles étaient d'un facteur 10 plus faibles en 2019.

La communauté phytoplanctonique eucaryote (autres genres et espèces constituant le phytoplancton en plus des cyanobactéries) variait de 200 cellules mL⁻¹ en hiver à 72 000 cellules mL⁻¹ au début de l'été (juillet 2018). Les chlorophytes dominaient cette communauté à hauteur de 60-92 % presque toute l'année, sauf au printemps (mars-mai) où les diatomées représentaient 30-60 %. Contrastant avec un schéma commun montrant des densités plus élevées en été qu'en hiver, les trois stations suivies se sont montrées différentes du point de vue de l'abondance de la communauté zooplanctonique, avec des abondances 5 fois inférieures à celles observées au milieu et dans la partie aval du lac. La composition du zooplancton est dans le Lac au Duc comme est classique des plans d'eau eutrophes, avec une dominance des petits taxons au détriment des plus grands, comme par exemple les Daphnées (Neuvalainen et Luoto 2017).

2.c-Evaluation du rôle des facteurs climatiques et nutritionnels sur la dynamique des cyanobactéries

L'analyse des 13 années (2007-2019) sur la dynamique des cyanobactéries au sein du Lac au Duc a mis en évidence une forte variation inter-annuelle non seulement de la densité, mais aussi de la nature des souches dominantes (Fig. 8). Alors que jusqu'en 2013, la communauté cyanobactérienne était dominée par *Plankthothrix agardhii* (groupe fonctionnel S1), les espèces du genre *Microcystis* (principalement le groupe fonctionnel M : *M. aeruginosa*), se sont mises à dominer à partir de 2013, malgré de faibles densités en 2013, 2015 et début 2019, avec certaines années une codominance observée de *Dolichospermum* en 2017, 2018 et 2019. Les toxines microcystine et saxitoxine n'ont été mesurées et à chaque fois en faible concentration (< 2 µg L⁻¹) que dans la deuxième partie de la série chronologique, à partir 2013. Cette apparition a coïncidé, à chaque fois, avec la présence de *Microcystis* sp. et de *Dolichospermum* sp. Ce changement de dominance des cyanobactéries en 2013 peut être clairement attribué à un changement dans les conditions climatiques et hydrologiques : avant 2013, à l'exception de 2009, les étés étaient caractérisés par des vents forts et fréquents, alors que depuis 2013, les étés sont globalement plus chauds, plus ensoleillés et plus secs (Figure 4A, B, C, tableau 2).

De fait, *P. agardhii* est connu pour se développer pendant les étés venteux, ce taxon du genre *Plankthothrix* étant tolérante à la faible luminosité moyenne caractéristique des eaux mixtes turbides (Van Liere et Mur 1980, Reynolds 2006). En effet, grâce à leurs pigments accessoires spécifiques, les phycobilines du genre *Plankthothrix* sont des capteurs de lumière efficaces (Kurmayer et al. 2016). Cette prédominance *P. agardhii* avant 2013 n'est pas spécifique au Lac au Duc. La même prédominance est observée pour tous les plans d'eau de Bretagne (Pitois et al. 2014).

Bien que *Plankthothrix* soit connu pour former des efflorescences toxiques dans les écosystèmes d'eau douce tempérés (Sivonen et Jones 1999, Paerl et Huisman 2009), aucune microcystine n'a été détectée lors des efflorescences de *P. agardhii* dans le Lac au Duc. Il a été démontré que les populations de *P. agardhii* en efflorescence naturelle peuvent être composées de génotypes producteurs et non producteurs de microcystine, et que la proportion de chacun peut varier considérablement au sein d'une efflorescence (Kurmayer et al., 2004 ; Briand et al. 2008a).

Cette figure est identique à une figure contenu dans un article soumis pour publication dans une revue scientifique internationale.
Elle ne peut donc pas être reproduite ici pour l'instant.

Figure 8. Abondance des groupes fonctionnels de cyanobactéries (en biovolume) et concentrations en toxines dans la partie aval du Lac au Duc entre 2007 et 2019. Les groupes fonctionnels sont ceux développés par Reynolds (2002) et Padisak (2006).

Depuis l'été 2013, les dominances ou co-dominances de *Microcystis* sp. et *Dolichospermum* sp. sont liées à des conditions de vent globalement plus calmes qui peuvent conduire à des périodes de stratification plus longues de la colonne d'eau, même dans un lac peu profond comme le Lac au Duc. En particulier, la présence de *Microcystis* sp. apparaît être fortement corrélée à l'intensité lumineuse et à la température (Figure 9). Ces deux genres tirent profit de la stabilité de la colonne d'eau en usant de leur flottabilité pour concentrer leur population dans la zone éclairée proche de la surface des lacs stables (Huisman et al. 2004, Li et al. 2016). La co-dominance de *Dolichospermum* sp. peut s'expliquer par le fait que ce genre est capable de fixer et de transformer le dinitrogène (N_2) de l'atmosphère en une forme biodisponible de l'azote, ce qui confère à cette cyanobactérie un avantage écologique dans les environnements aquatiques dépourvus d'azote (Reynolds et al. 2006) comme cela a été le cas pour le Lac au Duc en 2018 (Figure 7A).

Il est cependant de plus en plus démontré que la fixation de N_2 n'est pas suffisante pour compenser de manière significative la carence en N du milieu aquatique (voir par exemple Scott & Grantz, 2013, Kolzau et al. 2016, Shatwell et Köhler 2019), soulignant que la réduction des efflorescences de cyanobactéries dans un lac comme le Lac au Duc passe bien et avant toute chose par une réduction des apports de N et de P en provenance du bassin versant.

Cette figure est identique à une figure contenu dans un article soumis pour publication dans une revue scientifique internationale.
Elle ne peut donc pas être reproduite ici pour l'instant.

Figure 9. Analyse Canonique en Correspondance (CCA) montrant comment les paramètres environnementaux sélectionnent les groupes de cyanobactéries présents en été dans le Lac au Duc. Les données compilées sont celles des efflorescences allant de 2007 à 2019. ResTim: temps de séjour de l'eau. Wind : intensité du vent. Light : intensité de la lumière. NO3 : teneur en nitrate. Les groupes fonctionnels utilisés sont ceux développés par Reynolds (2002) et Padisak (2006): M: dominé par *Microcystis sp*; H1 : dominé par *Dolichospermum sp* ; S1: dominé par *Planktothrix agardhii*; H1aph: dominé par *Aphanizomenon sp* ; K: dominé par *Aphanothece* et *Aphanocypsa*.

Ce qu'il faut retenir

Sur le fond

La collecte et le traitement des résultats des suivis qualité d'eau effectués depuis 2007 sur le BV du lac au Duc permettent d'estimer le flux annuel de P rentrant dans le lac à **0.23 KgP/ha** soit environ **9 tonnes de P par an**. Ce flux correspond à une concentration moyenne annuelle pondérée du débit de la lame d'eau entrante dans le lac de **0.100 mg/l de P**. Cette concentration représente l'état "0" du lac à partir duquel définir un objectif de réduction du flux et construire un mécanisme de PSE pour atteindre cet objectif.

Les suivis effectués dans le cadre du projet CPES à l'exutoire des stations d'épuration rejetant du P dans le BV combinés aux données d'autocontrôle fournies par les exploitants de ces stations montrent que la part des **émissions diffuses agricoles de P** représentent environ **90% du total des émissions de P rentrant de lac**, confirmant l'hypothèse que les efforts de réduction doivent porter en priorité sur la part de ces émissions.

Les suivis effectués de leur côté à l'exutoire des 25 sous-BV amonts définis et monitorés dans le cadre du projet CPES montrent que **les émissions agricoles de P sont sensiblement plus importantes dans les parties centrales et sud du BV**, militant pour un **ciblage des PSE** en priorité dans ces parties du BV

Concernant la dynamique des nutriments dans le lac, les suivis réalisés dans le cadre du projet CPES montrent que les concentrations en azote total, azote dissous total et nitrates-nitrites sont maximales en hiver, celles en phosphore total, phosphore dissous total et phosphates étant à l'inverse maximales en été, très probablement à cause de la libération d'une partie du stock de P du sédiment. La **dynamique du phytoplancton** a été très homogène au sein du lac pendant le cycle saisonnier 2018-2019, avec une efflorescence de cyanobactéries atteignant un maximum de **1,5 million de cellules mL⁻¹ en 2018**. L'efflorescence 2019 a été d'un facteur 10 moins intense démontrant l'énorme variabilité inter-annuelle de la dynamique du phytoplancton.

L'analyse des chroniques de populations de cyanobactéries disponibles depuis 2007 a mis en évidence une forte variation non seulement de la densité, mais aussi de la composition et de la dominance des souches de cyanobactéries. Tandis que *Planktothrix* sp. a dominé les efflorescences jusqu'en 2013, coïncidant avec des étés frais et venteux, le passage à des étés plus chauds et plus secs, couplé à une diminution de la charge azotée a conduit à une dominance de *Microcystis* sp. et *Dolichospermum* sp.

Ces différents travaux sur la dynamique des nutriments et des populations de cyanobactéries, et la compréhension des facteurs à l'origine des variations observés dans la densité et la composition des efflorescences de cyanobactéries ont mobilisé le travail à temps plein d'une post-doctorante (Morgane Le Moal). Une publication est en cours de finalisation pour une soumission dans une revue internationale avant la fin de l'année.

Du point de vue des outils/méthodologies à mobiliser pour déployer un mécanisme de PSE ciblant la réduction des émissions de P

Deux types d'outils/méthodologies ont été construits/validés :

- 1-Une méthodologie pour localiser les émissions diffuses de P agricole dans les BVs et cibler en priorité ou implanter des PSE pour obtenir la meilleure efficacité environnementale.
- 2-Une méthodologie pour décomposer la part des émissions diffuses agricoles et ponctuelles domestiques/industrielles dans le flux total de P.

On notera que cette partie du travail, notamment le monitoring des 25 sous-BV amonts a nécessité 18 mois de travail et mobilisé un post-doctorant à plein temps (Sen Gu) et une partie du temps de travail d'un doctorant (Antoine Casquin) rétribués par le projet CPES. Les résultats ont été valorisés au travers d'une publication parue dans la revue Science of the Total Environment (Casquin et al., 2020) ; une autre publication a été soumise à la revue Water Resources Research (Gu et al., soumis). Une troisième publication (Casquin et al., in prep.) est en cours de finalisation pour une soumission dans une revue internationale, avant la fin de l'année.

2.d-Calibration de l'objectif de réduction des émissions aux usages

L'objectif de restauration/pérennisation des usages du lac au Duc passe par la mise en relation de l'état trophique du lac avec le flux de P entrant, ou la concentration moyenne de P en entrée de lac. Etablir ce lien est une étape cruciale dans la construction de PSE censés améliorer l'état écologique du lac. On notera que cette mise en lien est très différentes d'études PSE où la cible est directement d'abaisser une teneur en dessous d'un seuil réglementaire. Ici la cible est plus complexe puisque visant l'état écologique du lac et les services que le lac fournit, dépendant de son état écologique.

Tous les auteurs ne sont pas d'accord concernant les teneurs en P à retenir pour qualifier les niveaux trophiques et l'état écologique des retenues peu profondes du type du lac au Duc (Tableau 1). Nous avons choisi ici de retenir les seuils les plus permissifs (teneurs en P les plus élevées ;

Søndergaard et al. 2005), dans une perspective de limiter au maximum l'effort à opérer de diminution du flux de P en entrée du lac.

Paramètre	Etude	Ultraoligotrophe Très bon	Oligotrophe Bon	Mésotrophe Moyen	Eutrophe Médiocre	Hyper eutrophe Mauvais
P total (µg/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 (µg/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 établi entre concentration en P, niveau trophique/état écologique du Lac au Duc et services/usages fournis par ce lac (Tableau 2). 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 µg/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, tant du point de vue du risque sanitaire qu'une mauvaise qualité d'eau génère que du point de vue de l'exigence forte de réduction des concentrations de P qu'il impose 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 le lac au Duc subit des pics de concentrations en cyanobactéries pouvant atteindre 2 millions de cellules par ml (voir Figure 1). On notera que la garantie des usages listés dans le tableau 2 si elle suppose de réduire les flux de P entrant dans le lac, suppose aussi une diminution de la charge interne du lac en P contenue dans les sédiments. Cette réduction de la charge interne prendra nécessairement du temps, d'où l'intérêt de mettre en place des actions curatives permettant l'accès aux usages en attendant que le lac s'auto-épure en P en lien avec la baisse des flux de P entrant.

Teneur en P total (µg/l)	Etat écologique	Usages garantis
[C]<25	Très bon	Baignade, Pêche, Activités nautiques
25<[C]<50	bon	Pêche, Activités nautiques
50<[C]<100	Moyen	Activités nautiques
100<[C]	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 fournit par ce Lac

Partant de cette mise en relation des services rendus par le lac avec des seuils de concentration en P à ne pas dépasser en entrée de lac, on voit que la concentration moyenne annuelle actuelle de 100 mg/l mesurée en entrée du lac au Duc classe ce lac dans la catégorie "état médiocre/mauvais" et demande une réduction de cette concentration d'un facteur d'au moins 4 pour le faire basculer dans la catégorie "état très bon" garantissant la délivrance de tous les usages qu'il peut fournir, y compris de l'usage le plus contraignant qu'est la baignade.

Ce qu'il faut retenir

Sur le fond

La littérature scientifique situe l'exigence de qualité d'eau en entrée du lac au Duc à une concentration moyenne en P < 0.025 mg/l si l'on veut que ce lac puisse délivrer tous les usages auxquels il est destiné, y compris l'usage le plus contraignant d'un point de vue qualité d'eau qu'est la baignade.

Compte tenu de la concentration moyenne actuelle en entrée de lac de 0.100 mg/l, l'objectif que l'on doit assigner à un mécanisme PSE est donc de diminuer le flux entrant de P dans le lac au Duc d'un facteur 4, au moins.

Du point de vue des outils/méthodologies à mobiliser pour déployer un mécanisme PSE ciblant la réduction des émissions de P

Deux types d'outils/méthodologies ont été construits/validés :

- 1- Des références bibliographiques pour relier "teneurs en P" et "état trophique" dans le contexte de retenues peu profondes ;
- 2- Une grille "expert" pour fixer un objectif de réduction du flux/concentration de P en fonction du, ou des usages des retenues peu profondes que l'on souhaite restaurer/pérenniser.

Cette partie du travail a été réalisé par une post-doctorante (Morgane Le Moal) rétribuée par le projet CPES.

2.e-Moyens techniques mobilisables pour réduire les émissions en provenance du bassin-versant

La teneur en P du sol et le ruissellement à la surface du sol sont, à dire d'experts et d'après la littérature scientifique, les deux principaux facteurs/mécanismes contrôlant l'intensité des émissions diffuses de P agricole dans les BVs (Sharpley et al., 2014 ; Kleinman, 2015 ; Daryanto et al., 2017). Partant de là, trois leviers d'action principaux apparaissent être de nature à atteindre l'objectif de réduction des émissions de P en entrée du lac au Duc. Ces leviers ou attributs techniques incluent 1) l'arrêt de la fertilisation minérale phosphatée ; il s'agit ici de réduire la taille du réservoir de P agricole à sa source, c'est-à-dire au niveau du sol ; 2) la mise en place de couverts végétaux permanents ; il s'agit ici de réduire l'énergie de la pluie arrivant au sol tout en améliorant la stabilité structurale du sol, deux facteurs que l'on sait réduire la capacité des événements pluvieux à déclencher des phénomènes de ruissellement propices au transfert de P agricole des sols vers le réseau hydrographique ; et 3) l'implantation de haies anti-érosives, perpendiculairement à la pente en limite de parcelle ; il s'agit ici de procéder à une interception du flux érosif avant qu'il n'atteigne le cours d'eau, dans l'hypothèse ou celui-ci serait quand même généré malgré la mise en place de couverts végétaux permanents.

Concernant la situation actuelle du BV du lac au Duc 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 minéral P. On notera enfin, que le semis sous-couvert assurant une couverture permanente du sol est pratiqué sur certaines parcelles du BV, 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 BV suivant les années.

Inclure ces trois attributs techniques dans un mécanisme PSE visant à restaurer le bon état écologique du lac au Duc suppose de quantifier à priori la capacité de chaque attribut à contribuer à atteindre l'objectif de réduction du flux de P fixé en entrée de lac, c'est-à-dire une division par un facteur au moins 4 du flux actuel. Cette évaluation 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 Phosphorus Loss Estimator) de l'US Department of Agriculture (<https://data.nal.usda.gov/dataset/aple-annual-phosphorus-loss-estimator-tool>; Vadas et al, 2009). 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), 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 sur le flux érosif de P 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. Par construction, 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.

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 BV 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 anti-érosives. 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.

Plusieurs scénarios de réduction du flux ont été testés. Pour ce faire une typologie des parcelles du BV du lac au Duc a été réalisée en prenant comme variables de cette typologie la profondeur du sol, l'occupation du sol, les rotations, le risque érosion, etc...A partir de cette typologie, des gradations dans l'implantation des mesures anti-érosives ont été réalisées, conduisant à des variations dans le facteur de réduction du flux de P en entrée de lac. Au final, les variables de sortie de la simulation sont les pourcentages de parcelles de chaque type sur lesquels planter un couvert végétal permanent et un linéaire de haies anti-érosives, ainsi que la localisation de ces parcelles dans le BV, ces pourcentages et cette localisation variant en fonction de l'objectif de

réduction du flux visé (voir Figure 10).

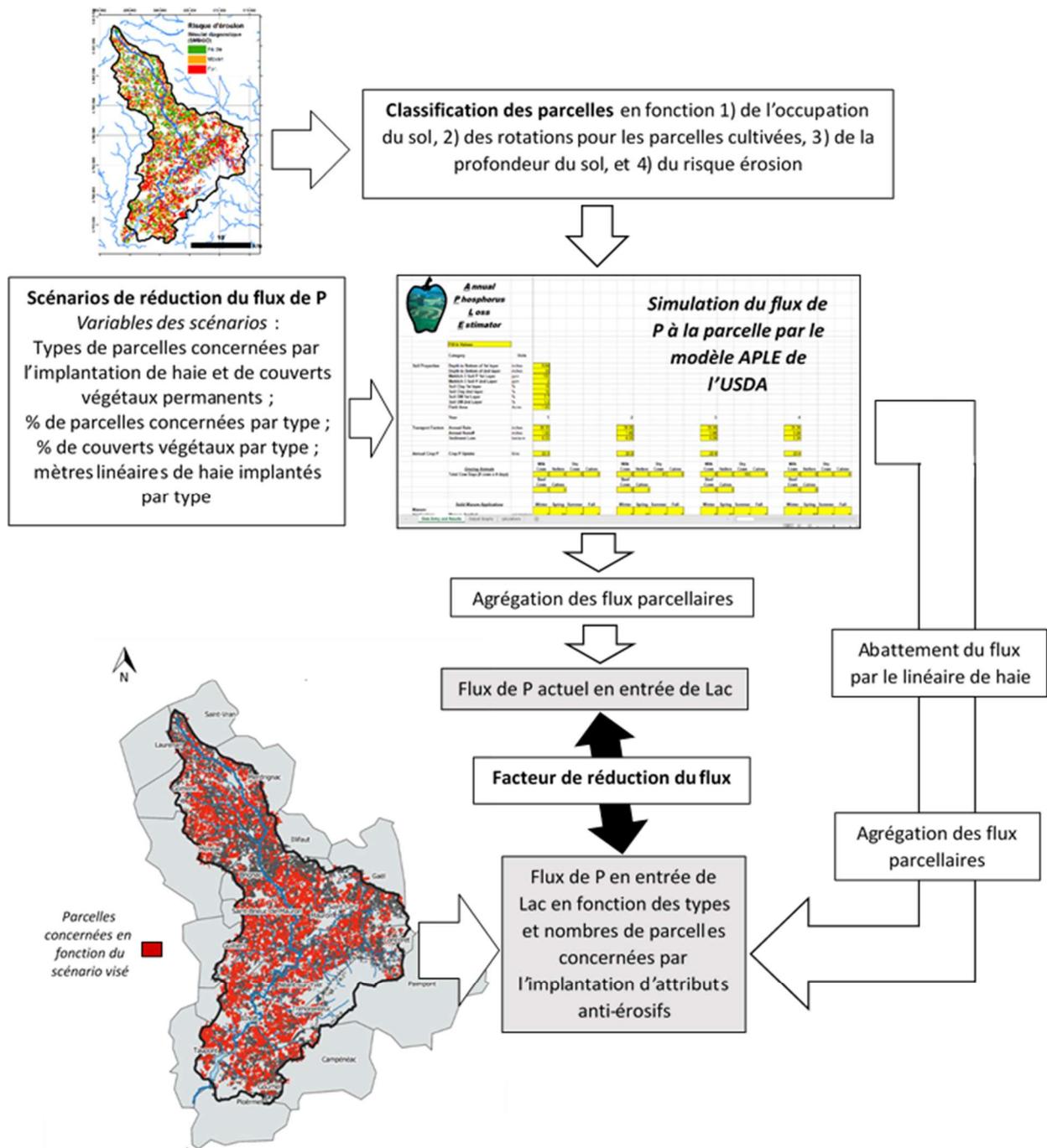


Figure 10 - Organigramme logique utilisé pour simuler l'effet des attributs "couverts végétaux permanents" et "haies anti-érosives" sur la réduction du flux de P en entrée du lac du Duc.

2.f-Moyens mobilisables pour réduire l'intensité des efflorescences de cyanobactéries à court terme (actions curatives)

Les approches de lutte contre l'eutrophisation des lacs et réservoirs de barrage peuvent être divisées en deux grandes catégories : celles agissant à long terme sur les causes (les apports de nutriments en provenance du bassin-versant) ; et celles agissant à court terme (curatives) sur les conséquences les plus dommageables pour les usages, dans le cas présent les efflorescences de cyanobactéries. Celles-ci ne peuvent constituer des solutions pérennes, mais des solutions temporaires, développées au cas par cas, dans le but de restaurer ou restaurer certains usages (potabilisation de l'eau, maintien des activités récréatives...). Les techniques utilisées incluent ses leviers physiques, chimiques ou biologiques (Pearl et al. 2016 ; Pinay et al. 2017) avec dans tous les cas le même objectif : réduire directement les biomasses algales soit par l'emploi d'algicides soit en modifiant des facteurs qui favorisent leur développement : disponibilité en nutriments, stratification de l'eau, structure du réseau trophique.

Les leviers physiques reposent sur la diminution du temps de résidence de l'eau, la déstratification de la colonne d'eau, ou le curage des sédiments stockant le phosphore.. Dans le cas du Lac au Duc, il n'existe pas de réservoir amont suffisamment grand pour influencer sur le temps de résidence de l'eau pendant les efflorescences de cyanobactéries. Favoriser le renouvellement artificiel de l'eau pourrait en revanche être envisagé à une plus petite échelle, comme par exemple celle de la zone de baignade. Concernant la déstratification, un système d'injection d'air a été installé dans la partie aval du Lac en 1994, à proximité du point de captage de la station de production d'eau potable. Cette aération a permis de limiter le relargage des composés réduits nuisibles pour la production d'eau potable (NH_4 , Fe, Mn, NO_2 , Saunier-Techna 2002) en oxygénant l'interface eau-sédiment. Cette aération partielle n'a cependant pas eu d'impact sur le développement des cyanobactéries sur l'ensemble du plan d'eau (Luc Brient com. pers.). Concernant le curage du lac et l'élimination du stock de P contenu dans les sédiments, une étude en a estimé le coût à 20 millions d'euros (Austruy 2012). Cette opération n'a jamais été réalisé, ce coût étant jugé trop important.

Une méthode chimique basée sur l'apport de carbonate de calcium a été mise en œuvre entre 2013 - 2015 dans la zone de baignade ou à proximité, avec l'objectif de précipiter le P sous la forme de phosphate de calcium insoluble. Bien que les années 2013-2015 correspondent à une diminution de l'intensité des efflorescences de cyanobactéries par rapport à des années comme 2011 et 2012, les densités sont néanmoins restées supérieures au seuil sanitaire au-delà duquel la baignade est interdite en France (100 000 cellules/ml).

L'utilisation d'algicides est une autre possibilité, ces produits détruisant directement les cyanobactéries. Des épandages de sulfate de cuivre ont été réalisés de 1996 à 2005 (Austruy 2012 ; L. Brient, Y. Seyrig comm. pers.) avec des effets probants si l'on en juge par les densités faibles observées ces années -là (Figure 1). L'usage de sulfate de cuivre est cependant interdit de nos jours, empêchant d'avoir recours à cette méthode.

L'usage du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) apparaît une alternative plus acceptable (Matthijs et al. 2016) du fait de sa dégradation rapide en eau et en oxygène. A l'inverse du cuivre qui s'accumule dans le sédiment, le peroxyde d'hydrogène ne laisse pas de trace chimique dans l'environnement. Par ailleurs, à faible dose, il semble sélectif contre les cyanobactéries, entraînant peu d'effet sévères connus sur les algues eucaryotes, et sur la faune et la flore aquatique. Son effet sur les micro-organismes présents naturellement dans l'eau et les sédiments avec leur rôle dans le

recyclage des nutriments est cependant encore inconnu. **Dans le cadre du projet CPES, l'emploi de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) a été expérimenté en laboratoire puis en milieu naturel dans une zone délimitée du Lac au Duc correspondant à la zone de baignade.**, comme solution curative possible en attendant l'auto-épuration du lac suite à l'arrêt des apports en provenance du bassin-versant (voir plus loin, ci-dessous).

Concernant les méthodes biologiques, une approche de biomanipulation pourrait limiter la prédation du poisson sur le zooplancton, favorisant ainsi le rôle de ce dernier comme prédateur du phytoplancton (et donc des cyanobactéries), mais ces manipulations ont le défaut qu'il faut les répéter dans le temps. Une autre action biologique pourrait consister à favoriser la croissance des macrophytes afin de créer une compétition avec le phytoplancton pour le phosphore et/ou permettre l'exportation des nutriments hors du lac, par fauchage et exportation des macrophytes. Même si on observe depuis plusieurs années un développement de roseaux et de nénuphars jaunes dans la partie amont du Lac au Duc, cette partie du lac est de taille trop réduite (approximativement 4 000 m²) pour envisager le captage et l'élimination des quantités de P entrant dans le lac (cf paragraphe plus loin "Coûts liés à l'utilisation de la capacité naturelle d'épuration du P").

Résultats des tests faits sur l'emploi du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) comme méthode curative pour le Lac au Duc

Au cours de l'été 2018, des traitements curatifs au H₂O₂ ont été appliqués aux eaux du lac, avec une évaluation de l'effet de ce traitement sur les communautés phytoplanctoniques et zooplanctoniques évaluées à la fois en laboratoire et dans une zone délimitée du lac de 3000 m² située dans la partie "zone de baignade".

Les tests réalisés au laboratoire en incubant des eaux du lac ont montré que sans H₂O₂, la biomasse des cyanobactéries augmentait de manière continue au cours des 10 jours d'incubation réalisés (Figure 11). Si l'on traite la même eau au H₂O₂ une forte augmentation de la phycocyanine est observée au jour 1, indiquant une destruction des cellules cyanobactériennes (Figure 11). Les comptages cellulaires confirment la croissance des cyanobactéries sans H₂O₂, et leur chute si H₂O₂ est ajouté. Le traitement est efficace dès 2,5 mg/L de H₂O₂, permettant une réduction des concentrations de cyanobactéries sous le seuil de 100 000 cellules/ml pendant une durée d'au moins 9 jours (Figures 11 et 12) en conditions laboratoire. De plus, la communauté des microalgues eucaryotes ne paraît pas affectée par les traitements au H₂O₂. A l'inverse de la communauté zooplanctonique qui, elle, est affectée (Figure 12, avec une diminution d'un facteur trois des abondances entre aquariums traités et non-traités).

Parallèlement aux expériences en laboratoire, une expérimentation a été réalisée directement dans le lac au cours de l'été 2018. Dans cette expérience, une zone a été délimitée par l'installation d'une enceinte plastique étanche dans la zone de baignade. 4 traitements successifs au peroxyde d'hydrogène ont été appliqués dans cette zone, la zone située en dehors de l'enceinte servant de contrôle sans traitement. Les épandages réalisés dans l'enceinte indiquent que **le traitement au peroxyde d'hydrogène réduit significativement les populations de cyanobactéries** (division par des facteurs compris entre 3 et 8), confirmant le potentiel de la méthode.

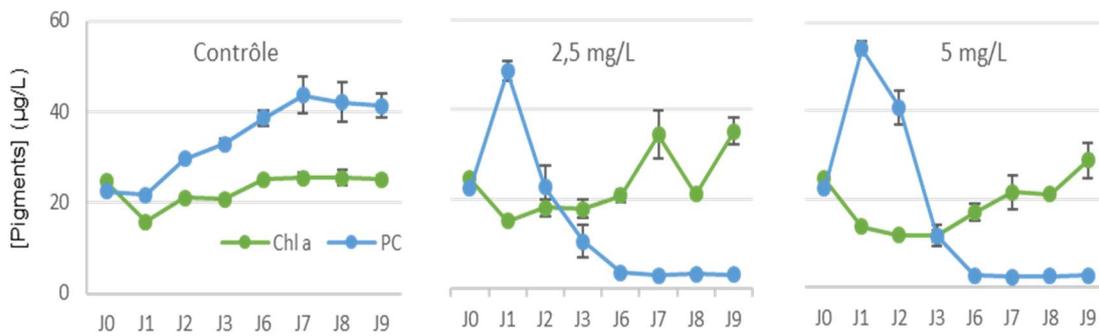


Figure 11. Résultats des test effectués au laboratoire sur des eaux du Lac au Duc prélevées le 11 juin 2018 et incubée pendant 9 jours à différentes concentrations de H₂O₂. En vert la concentration en chlorophylle a, qui permet d'estimer la biomasse du phytoplancton total ; en bleu la concentration en phycocyanine, un pigment caractéristique des cyanobactéries, qui permet d'estimer leur biomasse.

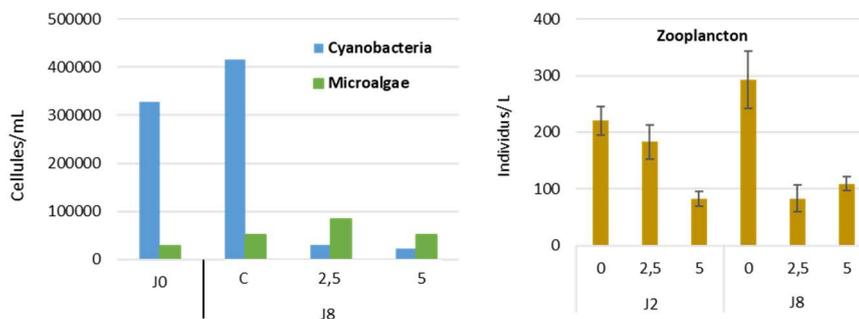


Figure 12. Abondance du phytoplancton (cyanobactéries et micro algues, à gauche) et du zooplancton (à droite) au début (J0) et à la fin (J8) de l'expérience, dans les aquariums sans traitement (C) et avec traitement (2,5 et 5 mg/L de H₂O₂).

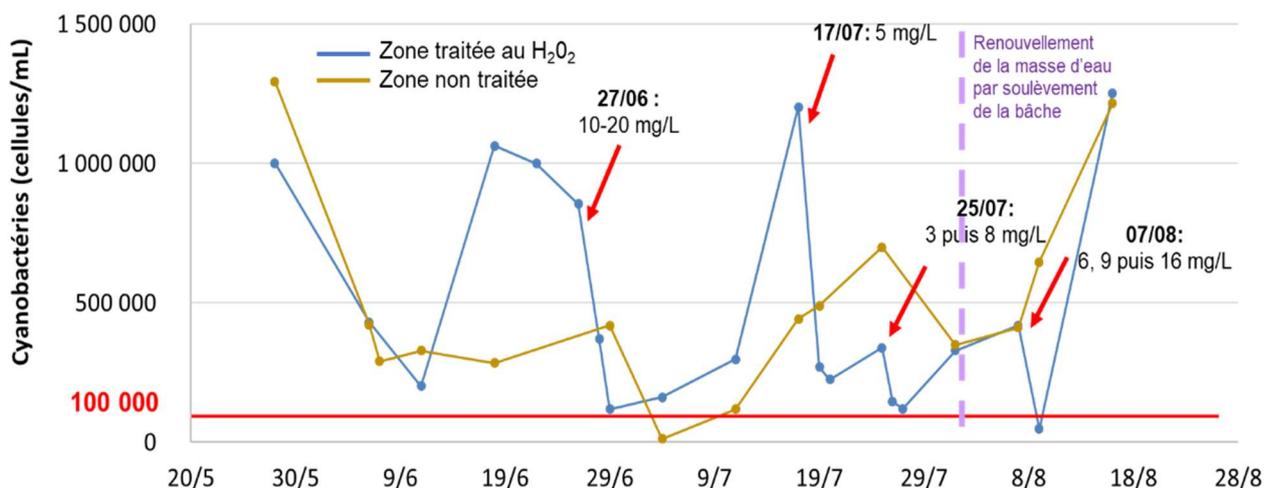


Figure 13. Abondance des cyanobactéries dans la zone du lac traitée au H₂O₂ et dans la zone du lac témoin, non traitée.

Cependant, à l'exception du 4^{ème} traitement, ces abattements ne sont pas suffisants pour descendre durablement sous le seuil des 100 000 cellules/ml, malgré les fortes concentrations et/ou les pulvérisations successives réalisées lors d'une même journée. Probablement **le peroxyde a été trop rapidement consommé**, disparaissant en 6 heures, alors que dans les expériences réalisées sur d'autres plans d'eau par la société prestataire fournissant le H₂O₂ (Arcadis) et l'université de Rennes 1, il disparaissait seulement au bout de 48 heures (Brient L. et Arcadis, com. pers., Matthijs et al. 2012). Cette disparition très rapide dans le cas du Lac au Duc pourrait être lié à la présence d'une **forte charge en matière organique** soluble et particulaire (autre que les cyanobactéries) dans la colonne d'eau, liée probablement à une remise en suspension du sédiment dans la zone de baignade, celle-ci étant peu profonde. Une autre possibilité pour expliquer cette disparition rapide de H₂O₂ est un défaut d'étanchéité de l'enceinte utilisée pour isoler la zone de traitement du reste du lac non traité. **Le traitement à malgré tout permis l'ouverture de la baignade pendant 18 jours.**

Les actions curatives ont pour objet le traitement des effets (efflorescences des cyanobactéries) mais pas celui de leur cause (apport de P en provenance du bassin-versant). Leur déploiement est cependant nécessaire jusqu'à ce que l'excès de P apporté au lac ou contenu dans les sédiments stockés dans celui-ci soit éliminé avec des coûts dont il faut tenir compte (cf Tableau 6. Synthèse des coûts engendrés par la mauvaise qualité des eaux du Lac au Duc)

Ce qu'il faut retenir

Concernant les mesures envisageables pour réduire les apports de P agricole

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 :

- 1- L'arrêt de la fertilisation minérale phosphatée (objectif : diminuer la taille du stock de P du sol) ;
- 2- La mise en place de couverts végétaux permanents (objectif : limiter l'érosion des sols lors des épisodes de pluie) ;
- 3- L'implantation de haies anti-érosives, perpendiculairement à la pente en limite de parcelle (objectif : capter le flux érosif 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).

Du point de vue des outils/méthodologies à mobiliser pour déployer un mécanisme PSE ciblant la réduction des émissions de P

Un type principal d'outil/méthodologie ont été construit/validé :

Il s'agit d'une méthodologie permettant de simuler l'impact de l'implantation de couverts végétaux permanents et de haies anti-érosives sur la réduction du flux de P dans les bassins-versants. Cette méthodologie combine des approches SIG permettant de classer les parcelles en grands types d'un point de vue du risque émission, à de la simulation du flux de P à la parcelle utilisant le modèle APLE de l'USDA. Il s'agit d'une approche "expert" qui n'a pas vocation à simuler le flux réel de P mais la diminution du flux en fonction du taux d'implantation à la parcelle des attributs censés réduire ce flux, et de la localisation dans le BV des parcelles sur lesquelles sont faites les implantations.

Cette partie du travail a été réalisé par un étudiant de Master 2 (Maixent Houenou - Hounsinou) assisté par un doctorant (Antoine Casquin) rétribué par le projet CPES.

Concernant la nécessité de déployer des actions curatives en attendant l'effet des actions préventives

La mise en place d'actions visant à réduire les apports de P agricole en provenant du bassin-versant verra ses effets retardés du point de vue de la qualité des eaux du Lac au Duc du fait de la présence d'un stock interne de sédiments riches en P. Il convient donc d'être prêt à déployer des solutions curatives en cas de survenance d'efflorescences importantes de cyanobactéries. Différentes techniques ont déjà été testées à cette fin dans le Lac au Duc : injection d'air à l'interface eau-sédiment pour limiter les transferts verticaux de P; apport de carbonate de calcium pour immobiliser le P; épandage de sulfate de cuivre pour éliminer directement les cyanobactéries. Dans le cadre du projet CPES, l'emploi de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) a été expérimenté à la fois en laboratoire et directement in-situ dans la zone de baignade du lac. Bien que la phase de test en laboratoire ait donné de bons résultats à de faibles concentrations d'H₂O₂, l'application directement aux eaux du lac a donné des résultats contrastés ne permettant la baignade que pendant 18 jours, ce qui est insuffisant pour permettre un déroulement normal de la saison touristique.

Cette partie du travail a été réalisé par une post-doctorante (Morgane Le Moal) rétribuée par le projet CPES et par un étudiant de Master 2 (Emilian Mineaud).

3- DIMENSIONNEMENT DE L'OFFRE AGRICOLE PSE

3.a-Consentement à recevoir (CAP) des agriculteurs à l'exploitation

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 BV 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.

Pour déterminer ces prix, la méthode utilisée a été la méthode des expériences de choix, c'est à dire mettant en œuvre des expériences dans lesquelles plusieurs scénarios de PSE sont proposés à des agriculteurs lors d'enquêtes en face à face, 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 du BV du lac au Duc enquêtés (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 contraignant du prix demandé dans le cas de l'attribut « couvert végétal permanent », avec des paiements à l'hectare 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. Au final, le besoin en financement est évalué à 300 à 600 €/ha dépendant du degré d'implantation des attributs "couvert végétal permanent" et "haies anti-érosives", et de la présence ou non de parcelles en maïs sur l'exploitation

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.*

On notera que les coûts estimés ici 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 bénéfiques. 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 bénéfiques 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 BV du lac au Duc. Ce choix de faire participer les agriculteurs eux-mêmes à l'établissement du prix de l'offre PSE a l'inconvénient plus que probable de tirer les prix vers le haut. Il a par contre l'avantage de générer des prix à priori attractifs pour les agriculteurs. On rappellera à ce niveau qu'un des principes à la base du mécanisme de PSE est justement que ce mécanisme offre prix plus attractifs que les systèmes communément en place de type MAEC, avec l'idée que si les prix sont attractifs le résultat environnemental du mécanisme n'en sera que meilleur (voir Wunder et al., 2018 ; Martin-Ortega et Wayland, 2018). Le fait que les PSE fictifs proposés aux agriculteurs enquêtés n'aient pas généré d'attitudes de rejet ou d'adoption massive de la part des agriculteurs enquêtés indique, par ailleurs, que les fourchettes de prix obtenus correspondent probablement à une certaine réalité de coûts.

Ce tableau contient des données confidentielles empêchant qu'il ne soit reproduit à ce stade de l'étude.

***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 BV 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

Sur le fond

Quatre points principaux sont à retenir :

- 1- L'arrêt de la fertilisation du sol en engrais minéraux phosphatés ne conduit à aucun coût ;
- 2- 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 ;
- 3- 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 ;
- 4- 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 planter, et de la présence ou de l'absence de maïs dans l'assolement.

Du point de vue des outils/méthodologies à mobiliser pour déployer un mécanisme PSE ciblant la réduction des émissions de P

Un type principal d'outil/méthodologie a été utilisé :

Il s'agit d'une méthodologie d'économie expérimentale basée sur des expériences de choix dans lesquelles des contrats PSE fictifs, aux contenus variables en engagement d'implantation d'attributs, en prix et en durée, sont proposés aux agriculteurs du BV lors d'enquêtes en face en face. L'exploitation statistique des résultats et leur confrontation aux informations collectées sur la sociologie des répondants, les types d'exploitation, les systèmes de cultures, etc...permet d'établir les fourchettes de prix ayant la capacité de susciter un engagement massif des agriculteurs du BV au mécanisme de PSE mis en place pour restaurer le bon état écologique du lac au Duc. Un intérêt de la méthode déployée ici est qu'elle tient compte de la diversité des systèmes de culture présents sur le BV. Un autre intérêt est qu'elle conduit à des prix qui devraient susciter un engagement fort des agriculteurs.

Cette partie du travail a été réalisée par un ingénieur d'étude (Josselin Canlet) rétribué par le projet CPES, assisté d'un étudiant de Master 2 (Maixent Houdenou - Housinou).

3.b-Evaluation du besoin total en financement

Il s'agit ici de quitter l'échelle de l'exploitation pour aller à celle du BV. L'objectif ici est d'évaluer les besoins totaux en financement côté agriculteurs (cumul des CARs individuels), en fonction de l'objectif de réduction du flux visé et de la capacité, où non, à cibler les financements vers les parcelles les plus coût-efficaces, c.a.d. présentant le rapport [niveau d'abattement du flux de P]/[CAR de l'agriculteur] le plus élevé. Ces évaluations ont été réalisées en reprenant les typologies de parcelles établies pour évaluer l'impact des différents attributs techniques retenus dans l'étude pour réduire le flux diffus agricole de P en entrée de lac ("arrêt de la fertilisation minérale en P" ; "implantation d'un couvert végétal permanent", "implantation de haies anti-érosives" ; voir Figure 7), et en agrégeant les coûts parcellaires à l'échelle du BV.

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 de l'attribut "couvert végétal permanent". Dans les deux cas on voit que le non ciblage aux parcelles les plus coût-efficaces conduit à un surcoût, surcoût particulièrement manifeste et important dans le cas d'une réduction du flux 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 sur chacune une maximisation de la contrainte "mètre 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 annuels dépendant de l'objectif de réduction fixé du flux, 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
2 (ciblage)	50	100	6 170 000
2 (non ciblage)	74	20	10 400 000
3 (ciblage)	79	100	10 330 000
3 (non ciblage)	100	37	11 900 000
5 (non ciblage)	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 trois limites des modélisations effectuées. Une première limite 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 de 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. Enfin une troisième et dernière limite tient 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. 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), ii) on peut difficilement imaginer que les agriculteurs enquêtés, pour lesquels chiffrer les évolutions proposées demande 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

Sur le fond

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 techniques préconisés de réduction préconisés. Trois points principaux sont à retenir :

- 1- 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.
- 2- Plus l'effort de réduction visé du flux de P agricole en entrée de lac est important, plus la différence des coûts entre ciblage et non-ciblage diminue ;
- 3- Visée une réduction du flux de P agricole en entrée de lac d'un facteur 4 et plus nécessite d'embarquer l'ensemble des parcelles du BV dans le mécanisme de PSE testé ici, pour un coût total estimé de 14 millions € par an.

Du point de vue des outils/méthodologies à mobiliser pour déployer un mécanisme PSE ciblant la réduction des émissions de P

Un type principal d'outil/méthodologie a été utilisé :

Il s'agit d'une méthodologie de modélisation permettant de chiffrer les coûts de réduction du flux de P diffus agricole à l'échelle BV, en fonction du risque d'érosion à la parcelle et du coût d'implantation d'attributs techniques visant à réduire ce risque. Un intérêt de la méthode déployée ici est qu'elle tient compte des différences de risque à la parcelle et donc du rapport [diminution du risque]/[Coût de diminution du risque] et permet donc d'analyser l'impact du ciblage des actions sur les parcelles les plus coût-efficaces sur le coût global de réduction du flux.

Cette partie du travail a été réalisée un étudiant de Master 2 (Maixent Houenou - Housinou).

3.c-Evaluation du coût de ne rien faire et de la valeur économique du lac

L'objectif est de comparer le coût du CAR cumulé des agriculteurs pour restaurer le bon état écologique du lac au Duc au coût des dommages actuellement subis par le Lac et à la valeur économique d'un lac au Duc en bonne santé écologique. Cette comparaison a pour objectif de déterminer si le CAR cumulé des agriculteurs est économiquement justifiable, ou s'il revêt un caractère disproportionné eu égard à la valeur économique d'un lac en bonne santé écologique.

Les dommages ont été évalués en sommant 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.), ainsi que les coûts des différentes mesures curatives déployées sur le lac lui-même pour tenter de limiter les efflorescences algales, ou le coût qu'aurait un dragage des sédiments, étant considéré que les sédiments peuvent constituer une source relais de P pour les cyanobactéries.

Cette première estimation a été complétée d'une approche visant à évaluer financièrement 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 réalisés 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 convertir la perte de bien-être et coût économique (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 permet d'estimer la valeur économique d'un lac au Duc en bon état écologique, cette valeur pouvant être alors comparée au CAR global demandé par les agriculteurs pour précisément atteindre ce bon état écologique.

Coût directs sur les usages du lac	Coût total (€)	Coût annuel (€)
Usage Eau Potable		
Infrastructure (filère usine Lac au Duc)	?	?
Infrastructure (dérivation eau de l'Oust)	?	?
Surcoût/manque à gagner lié à utilisation ressource Oust	?	350 000
Activités touristique		
Club nautique	?	?
Camping	?	?
Restaurants	?	?
Pêche	?	?
Coût indirects ressentis par les usagers du lac (perte de bien-être)	Coût total (€)	Coût annuel (€)
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
Coût indirects liés aux divers traitements curatifs opérés (ou projetés)	Coût total (€)	Coût annuel (€)
Rampe aération		
Installation	?	?
Fonctionnement (électricité)	?	7 000
Entretien	?	?
CuSO4 (2003-2005)		
3000 euros par épandage (2 ou 3 épandage par an?)	entre 18 000 et 27 000	entre 6 000 et 9 000
CaCO3 (2012-2015)		
Construction et installation barrage (10 000 euros/an?)	40 000	10 000
Epandage (10 000 euros/an)	40 000	10 000
H2O2 (2018)		220 000
Curage sédiments (efficace pendant 30 ans. Non réalisé)	20 000 000	830 000

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

Le travail effectué a montré une certaine difficulté à faire remonter des données chiffrées sur les pertes économiques directes engendrées par le mauvais état du lac (tableau 6). Il est probable que ces pertes soient relativement 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. Les coûts des actions curatives déployées pour lutter contre le développement des cyanobactéries dans le lac sont eux-aussi très en-dessous du CAR estimé des agriculteurs. Le coût maximal est celui induit par l'application de H₂O₂ en 2018, lequel a avoisiné 220 000 euros, soit 30 fois moins que le CAR global nécessaire à la permanence de l'activité baignage (réduction du flux diffus de P agricole d'un facteur 5). 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.

La situation est très différente si l'on examine les résultats des enquêtes visant à quantifier monétairement les pertes de bien-être subits 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 BV pour réduire le flux diffus agricole 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 l'existence d'un consentement à payer (CAP) potentiel très supérieur au CAR des agriculteurs, ce qui constitue une condition théorique sine qua non de mise en place d'un mécanisme PSE (Wunder et al., 2018). Le problème ici toutefois est que ce CAP est un CAP théorique, la manne financière qu'il représente étant une manne fictive, impossible à capter dans les faits (instituer un mécanisme de péage pour accéder aux différentes activités offertes par le lac pour la capter est par exemple inenvisageable dans la mesure où ce mécanisme nuirait inévitablement à l'attractivité du lac).

Quoiqu'il en soit, et pour conclure, on voit que la valeur économique d'un lac au Duc en bon état écologique autorisant le maximum d'usages dépasse largement le CAR global demandé par les agriculteurs, démontrant que celui-ci n'est pas économiquement disproportionné.

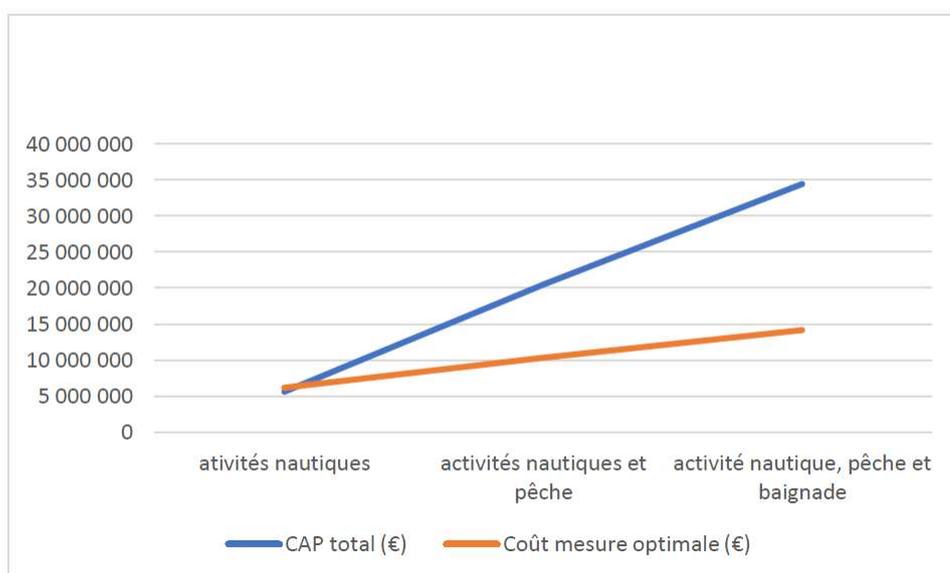


Figure 14 - Comparaison de la valeur globale du CAR demandé par les agriculteurs et du CAP des usagers du lac en fonction des types d'usage.

Ce qu'il faut retenir

Sur le fond

Le coût des dommages induits par le mauvais état écologique s'élève 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.

Du point de vue des outils/méthodologies à mobiliser pour déployer un mécanisme PSE ciblant la réduction des émissions de P

Un type principal d'outil/méthodologie a été utilisé :

Il s'agit d'une méthodologie d'enquête permettant d'évaluer le coût économique de la perte de bien-être engendrée par les dommages écologiques subit par un écosystème comme le lac au Duc, et les pertes d'usages que ces dommages entraînent. Approcher ce coût est intéressant pour comparer le CAR demandés par des acteurs dont les changements de pratiques conduiraient à restaurer ces usages au CAP des usagers, permettant ainsi de juger de la recevabilité économique du CAR demandé

Cette partie du travail a été réalisée par un ingénieur d'étude (Josselin Canlet) rétribué par le projet CPES.

3.d-Mobilisation et conditions d'engagement des agriculteurs

La question de la gestion du bon état écologique du lac au Duc et de l'accès aux différents services fournis par ce lac concerne un très grand nombre d'acteurs publics et privés (Figure 15).

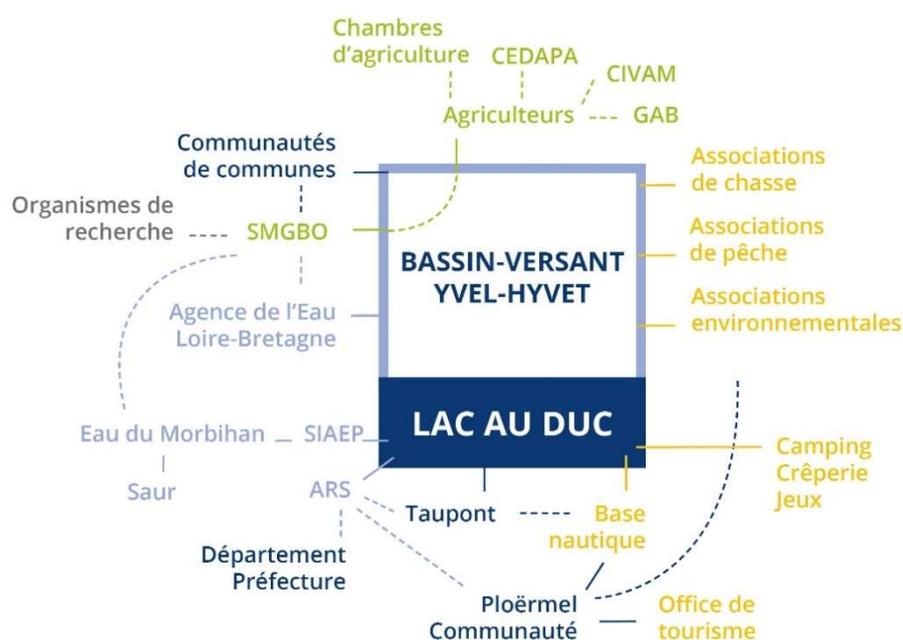


Figure 15 - Panel des acteurs publics et privés concernés par la gestion de l'état écologique du lac au Duc

Plusieurs réunions publiques ont été organisées pour aller à la rencontre de ces différents acteurs, et leur présenter les objectifs du projet INTERREG CPES, en général, et de l'étude pilote lac au Duc en particulier. Ces réunions publiques et les prises de contact qui s'en sont suivies ont permis d'accéder à certaines informations importantes pour la conduite de l'étude. Des échecs sont cependant à déplorer dans la mobilisation des acteurs, le principal concernant les acteurs de la production d'eau potable (SAUR et Eau du Morbihan) qui n'ont jamais daigné fournir les chiffres demandés sur les coûts additionnels du traitement générés par la présence de cyanobactéries, ni sur les volumes d'eau à faire venir d'une autre ressource en cas d'arrêt de la production imposée par la présence des mêmes cyanobactéries.

Concernant les enquêtes auprès des agriculteurs, celles-ci se sont heurtées à une lassitude non feinte à répondre à ce qui correspondait pour beaucoup d'entre eux à une nième enquête dont

"ils ne verraient peut-être jamais les résultats". Cette lassitude, générale dans le monde agricole breton, vient probablement en partie du fait que les programmes d'action de reconquête de la qualité de l'eau n'ont pas arrêté de se succéder en Bretagne depuis plus de 30 ans, en lien au départ avec une problématique nitrate-eutrophisation-marées vertes, suivis plus récemment par le phosphore (problématique eutrophisation-cyanobactérie) et les pesticides. En cela, la situation de l'étude de cas lac au Duc est très différente de celles des deux autres études de cas françaises où les cibles sont des masses d'eau souterraines où la question de la mauvaise qualité de l'eau est d'une déclaration plus récente et se réduit pour l'essentiel au dépassement d'une limite chimique (teneurs en nitrate et pesticides).

Cette lassitude des agriculteurs bretons, en général, et de ceux du BV de l'Yvel-Hivet, en particulier, procède également d'une peur très souvent exprimée par ces agriculteurs qu'une participation à des travaux présentés au départ comme des travaux expérimentaux de recherche se transforme au final par de nouvelles normes et réglementations. Ces craintes expliquent en partie pourquoi seulement 52 agriculteurs sur un total de 450 sollicités ont bien voulu participer aux enquêtes.

Concernant l'engagement des agriculteurs du BV du lac au Duc à rentrer dans un mécanisme de PSE quatre critères sont apparus comme déterminants :

- 1) Des prix attractifs ;
- 2) Une durée de contrats longue, de 5 ans au minimum ;
- 3) Une adaptation du contenu des contrats aux caractéristiques des exploitations ;
- 4) Des financeurs privés et une gestion privée des contrats.

Ce besoin de contrats de type "privé-privé" a été fortement exprimé lors des deux réunions plénières organisées avec les agriculteurs du BV de l'Yvel-Hivet en juin et décembre 2019, besoin découlant de l'avis même des agriculteurs présents d'un ras le bol général des retards pris par l'administration dans la gestion des MAEC, sans parler de la vision de plus en plus propagée au sein de la profession agricole bretonne d'une administration tatillonne et obsédée par le contrôle (Fig 16).



Figure 16 - Vues des réunions de restitution d'enquêtes et de présentation des résultats du projet INTERREG CPES organisées avec les agriculteurs du BV de l'Yvel-Hivet.

On notera que la communication constitue un élément déterminant de la mobilisation des acteurs nécessaire à la construction d'un mécanisme PSE et que tous les vecteurs possibles (communiqués de presse, stands dans des manifestations festives organisées sur le territoire d'action, organisation de réunions d'information grand public, film, etc...) doivent être mobilisés à cette fin (Figure 17).



Figure 17 - Exemple de vecteurs de communication utilisés pour mobiliser les acteurs concernés par l'étude pilote lac au Duc. A-soirée d'information organisée dans la commune de Ploërmel à l'occasion de la Green Week 2019 ; B-stand d'information sur les objectifs de l'étude pilote lors de la fête 2019 du Lac au Duc ; C- article paru dans le journal Ouest-France annonçant le lancement de l'étude ; D-lettre d'information à l'intention des agriculteurs sur les avancées de l'étude.

Ce qu'il faut retenir

Sur le fond

Trois points principaux sont à retenir :

- 1- Des acteurs publics et privés globalement intéressés par participer à l'élaboration d'un mécanisme PSE et en comprendre les tenants et aboutissants ;
- 2- Une difficulté à mobiliser les agriculteurs pour s'impliquer dans la construction d'un mécanisme de type PSE, expliquée par une lassitude engendrée par une longue série de programmes

d'action déployés en Bretagne pour lutter contre les pollutions diffuses agricoles, couplée à une peur qu'une participation débouche sur plus de réglementation et plus de contrôle ;

3- Des agriculteurs plus motivés par signer des contrats PSE "privé-privé" inscrits dans la durée, que par des contrats courts financés et gérés par la puissance publique ou ses représentants.

Du point de vue des outils/méthodologies à mobiliser pour déployer un mécanisme PSE ciblant la réduction des émissions de P

Les procédures d'enquêtes, au-delà des informations qu'elles apportent, constituent un moyen de faire connaître le projet auprès des acteurs et d'expliquer ce qu'est un mécanisme de PSE. La communication, sous toutes ses formes, revêt une grande importance pour mobiliser les différents acteurs.

4-CONFRONTATION A LA DEMANDE ET AUX CRITERES D'ENGAGEMENT DES ENTREPRISES

4.a-Stratégie déployée pour susciter et analyser la demande

L'objectif ici est très concrètement de trouver des financeurs privés susceptibles d'abonder un fond PSE "lac au Duc". La stratégie développée consiste à recenser à la fois les entreprises du territoire ayant une taille suffisante pour pouvoir être des financeurs significatifs de ce fond, et des entreprises implantées hors territoire qui pourraient être intéressées par participer à ce fond. Une liste des entreprises recensées (et contactées pour certaines) est fournie dans le tableau 7.

Nom de l'entreprise	Nom personne référente	Ville	Montants évoqués
Eau du Morbihan	Aimé Kergueris	Vannes	
VINCI	Rémi Chene	Vannes	500 k€
VINCI	R C et Loic GROMELON	Vannes	500 k€
VINCI	RC ET LG plus Jean Yves UZEL	Vannes	500 k€
LIGER	Marc LE MERCIER	Locmine	50 k€
LIGER	MLM	Locmine	50 k€
LIGER et SAUR	MLM et Emmanuel DURAND	Locmine	50 k€
AIR FRANCE	Jean Claude Corvaisier	Evriguët	500 k€
Yves ROCHER	Brice et Jacques ROCHER	La Gacilly	500 k€
MIX BUFFET	Patrick LE HIR	GUER	-
Fenêtréa	Mr LAMBALLE	Beignon	-
Kermené	Mr AUBE	Collinée	-
GROUPAMA	Mr Cocherel	Ploërmel	-
Crédit Agricole	Mme BARBIER	Vannes	-
EUREDEN	Mr LE BARS Serge	Theix	-
Bretagne PELLETS	Mr J C CORVAISISER	Mauron	-
BRAZEO	Mr Hervé GABILLET	Ploërmel	50 k€
GALEWPET	Mr Hervé GABILLET	Ploërmel	50 k€



Tableau 7. Liste d'entreprises identifiées pour leur capacité à financer le mécanisme PSE envisagé

La stratégie consiste également à analyser les conditions susceptibles de motiver les entreprises à s'engager dans le mécanisme PSE envisagé, quitte à modifier l'offre agricole pour mieux

correspondre à la demande des entreprises. Cette analyse passe par une analyse théorique des critères d'engagement des entreprises dans des projets environnementaux type PSE. Elle passe aussi par des entretiens avec des structures connaissant le monde breton de l'entreprise. Elle passe enfin, par une analyse d'études visant à mettre en place des PSE agricoles financés par des entreprises dans des contextes équivalents à celui du lac au Duc.

4.b-Analyse des critères d'engagement des entreprises

L'intérêt des entreprises pour financer des projets environnementaux via l'agriculture s'accroît à l'échelle nationale. Nous avons voulu savoir ce qu'il en était au plan régional. Deux entretiens ont été réalisés à cette fin. Le premier a eu lieu avec Roland Cariou, directeur des projets environnementaux à la Chambre Régionale de Commerce et d'Industrie de Bretagne (CCI), le second avec Clothilde d'Argentré, chef de projet environnement au sein de l'ABEA (Association Bretonne des Entreprises Agroalimentaires).

Il ressort de ces entretiens que, la motivation des entreprises dépend au premier chef de la conviction et de la sensibilité environnementale de leurs dirigeants. Cette conviction et sensibilité des dirigeants à la question environnementale devance très largement les aspects relatifs aux autres considérations (typologie/domaine d'activités, amélioration de l'image, etc.). Ce résultat confirme les résultats de l'étude VOCAL (I4CE, 2017) ou ceux obtenus antérieurement par d'autres études (Gherib et Bergu-Douce, 2008).

Une autre information issue des entretiens réalisés avec la CCI et l'ABEA est que les entreprises bretonnes sont enclines à porter une grande importance aux territoires sur lesquels elles sont implantées. Cette caractéristique est à priori favorable pour un engagement financier vis-à-vis de projets locaux type projet PSE lac au Duc. Par ailleurs, il nous a été dit que les industries agro-alimentaires bretonnes (de taille plutôt moyenne) avaient un lien fort avec les professionnels de l'agriculture, ce lien fort se déclinant souvent par des liens personnels entre les dirigeants des entreprises et ceux des organisations agricoles représentatives (cheffe de projet de l'AEBA). Ces liens pourraient constituer un plus pour l'engagement des entreprises à financer des projets agricoles d'amélioration de l'environnement implantés territorialement, cet engagement permettant de soutenir les agriculteurs locaux voire de garantir l'approvisionnement des entreprises contributrices en leurs matières premières. Dans cette optique, la nature du projet financé peut constituer un critère majeur de l'engagement des entreprises, avec une prime aux projets clairs, simples, co-construits directement avec ces dernières.

Il ressort également que la communication autour du projet doit être adaptée au monde de l'entreprise, traduisant en langage simple les buts précis des projets et explicitant les liens existant avec les impacts environnementaux de leurs activités. La méconnaissance des enjeux concrets et/ou des risques environnementaux auxquels font face les territoires peut être un frein à leur engagement. De ce point de vue, il appartient aux porteurs de projets agricoles de rendre les enjeux de ces projets compréhensibles aux entreprises, en montrant comment ces mêmes entreprises pourraient être impactées dans leur activité si rien n'est fait. Par exemple, à propos de l'enjeu "qualité de l'eau", il est possible qu'une eau de mauvaise qualité devienne une contrainte à terme pour la bonne marche des entreprises. Reste à faire connaître cette contrainte et son échéance aux entreprises.

En tant que démarche de comportement responsable dans les entreprises, la Responsabilité Sociétale et Environnementale ou RSE peut servir de levier de financement, notamment dans les grandes entreprises ou ETI (entreprises de taille intermédiaire). Cependant, approcher les



entreprises via ce canal n'est pas forcément une bonne idée sachant que beaucoup d'entreprises actives ce levier plus pour des opérations internes à l'entreprise qu'externes (par exemple, réduction de la consommation d'énergie ou de déchets ou amélioration du bien-être des salariés).

A l'heure actuelle, il n'existe pas de dispositifs propres à la CCI ou à l'ABEA incitant les entreprises à rentrer dans des démarches de développement durable. Beaucoup en sont encore au stade de la recherche de subventions permettant aux entreprises de réduire leur empreinte environnementale. La situation peut être sensiblement différente du côté des entreprises adhérentes de l'ABEA, celle-ci s'intéressant par essence au sujet d'une agriculture durable, même si cet intérêt connaît un coup d'arrêt du fait de la crise économique due à la pandémie Covid-19.

Pour conclure, les entretiens réalisés ont montré que dans la situation actuelle où une démarche collective de développement durable n'est pas mise en place au niveau régional/local, il convient de penser à des projets concrets, ancrés localement et ciblant des bouquets de services environnementaux, plutôt qu'un service en particulier, comme la qualité de l'eau. Il apparaît d'ailleurs des entretiens réalisés et des contacts pris avec les entreprises que le service "qualité de l'eau" parle peu aux entreprises, à l'inverse d'un service comme la "compensation carbone volontaire" qui bénéficie, lui, d'une aura et d'une visibilité forte au plan national et international pour les entreprises, qui voient concrètement l'objet de la transaction et peuvent le rapporter à des éléments simples et omniprésents de leur activité que sont leurs dépenses d'énergie, ou leurs émissions de gaz à effet de serre.

4-c-Evaluation de la capacité de l'offre agricole PSE "lac au Duc" à être valorisable sous un angle "stockage de carbone"

Cette évaluation découle directement des entretiens réalisés avec la CCI et l'ABEA et des échanges qui ont eu lieu avec les entreprises recensées comme financeurs potentiels d'un mécanisme PSE "lac au Duc". Ces échanges et entretiens montrent en effet un intérêt beaucoup plus marqué des entreprises pour le financement de PSE "carbone/climat" que pour celui de PSE "qualité de l'eau". Les attributs "couverts végétaux" et "haies anti-érosives" ayant la capacité de stocker du carbone dans les sols (Chenu et al., 2014 ; INRA, 2019), nous avons cherché à évaluer à quelle hauteur la valorisation "carbone" de ces attributs permettrait de couvrir le CAR de 300 à 600 €/ha demandé par les agriculteurs pour les implanter. Dans l'hypothèse où cette valorisation couvrirait le CAR demandé par les agriculteurs, nous pourrions alors rentrer dans un cercle vertueux et intéressant pour le territoire du lac au Duc dans lequel des entreprises intéressées par stocker du carbone seraient en capacité de financer un mécanisme PSE visant au départ un service "qualité de l'eau", sans que des financements supplémentaires dédiés spécifiquement à ce service ne soient à rechercher.

Trois types de prix du carbone ont été utilisés dans les simulations effectuées (Iida, 2020) : 1) le prix 2020 du marché d'échange de quota européen (92 €/tC) ; 2) le prix de la composante carbone de la Contribution Climat Energie et représentant la valeur tutélaire du carbone vue du point de vue de la fiscalité française (202 €/tC) ; 3) la valeur tutélaire 2030 du carbone utilisée pour évaluer la rentabilité des investissements publics dans le domaine des réductions des émissions de GES de la France (918 €/tC).



COVID-19
COMMUNIQUE

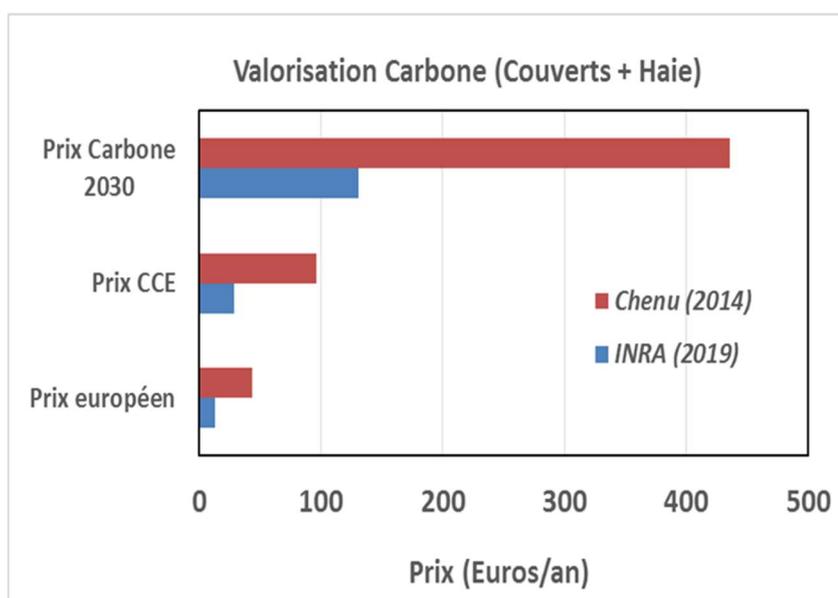


Figure 18 - Simulation de la valorisation des attributs "couverts végétaux" et "haies anti-érosive" sous l'angle de leur capacité à stocker du carbone. Le pris CCE correspond au prix carbone de la contribution climat énergie, le prix Carbone 2030 correspondant à la valeur tutélaire du carbone utilisée pour évaluer la rentabilité des investissements publics dans le domaine des réductions des émissions de GES de la France à l'échéance 2030.

Les résultats (Figure 18) montrent que la valorisation associée au stockage additionnel du carbone des attributs envisagés ne couvre qu'entre 0,2 et 37 % du CAR des agriculteurs, dépendant des différentes références utilisées (prix du carbone et quantités théoriques de carbone additionnel stockable par les attributs "couverts végétaux" et "haies anti-érosives").

Ces premiers résultats, très préliminaires car basés sur des éléments très théoriques et fortement incertains, montrent l'existence d'un hiatus important entre le prix de l'offre PSE conçue dans cette étude et calibrée dans un objectif "qualité d'eau", et le prix susceptible d'être obtenu pour cette même offre sous l'angle de sa capacité à accroître le stockage du carbone par le sol. L'objectif "qualité d'eau" étant intangible eu égard à l'état dégradé du lac au Duc, il n'est pas question de modifier techniquement l'offre PSE (maintien absolu des pourcentages de couverts végétaux et des linéaires de haies anti-érosives). Deux solutions s'offrent alors face à des entreprises désireuses a priori de ne financer que du stockage de carbone : 1) soit les agriculteurs diminuent leur CAR pour un même niveau d'implantation d'attributs ; 2) soit les entreprises acceptent dans le cadre d'un processus de négociation d'augmenter leur CAP, sous l'argument que les attributs stockant du carbone génèrent aussi un service "qualité de l'eau", et que cette double fourniture de service justifie un prix plus élevé.

Ce qu'il faut retenir

Sur le fond

Trois points principaux sont à retenir :

- 1- Il existe un panel d'entreprises locales et régionales prêtes à discuter d'une participation financière au mécanisme PSE imaginé pour améliorer la qualité de l'eau du lac au Duc ;



- 2- L'analyse des critères d'engagement des entreprises à des projets environnementaux montrent le rôle important de la sensibilité environnementale des dirigeants ; la simplicité et l'ancrage territorial des projets sont aussi mis en avant ; la co-construction des projets avec les entreprises et la communication aux entreprises des enjeux environnementaux auxquels leur activité est soumise aujourd'hui et le sera encore plus demain sont également pointés comme des éléments importants de leur engagement.
- 3- L'analyse des critères d'engagement des entreprises montrent aussi que celles-ci sont à priori plus enclines à financer des projets visant à stocker du carbone dans un objectif d'atténuation du réchauffement climatique, que des projets visant à améliorer la qualité de l'eau.
- 4- En l'état actuel des prix du carbone et du CAR demandés par les agriculteurs du BV du lac au Duc pour implanter des "haies anti-érosives" et des "couverts végétaux permanents" à un niveau de densité suffisant pour restaurer la qualité des eaux du lac, il ne paraît pas imaginable de pouvoir financer un mécanisme PSE "qualité de l'eau" comme celui envisagé pour le BV du lac au duc uniquement par le biais de ses co-bénéfices "carbone". Des financements spécifiques au service "qualité d'eau" devront être trouvés.

Du point de vue des outils/méthodologies à mobiliser pour déployer un mécanisme PSE ciblant la réduction des émissions de P

L'analyse des co-bénéfices environnementaux rendus par des dispositifs imaginés pour réduire les émissions de P comme les "haies anti-érosives" ou les "couverts végétaux permanents" rentre dans les étapes préalables au design du mécanisme PSE à mettre en place, dans la mesure où ces co-bénéfices ont le pouvoir d'attirer d'autres financeurs que ceux spécifiquement intéressés par l'objectif qualité d'eau. La démarche présentée ici consistant à effectuer une analyse bibliographique de ces co-bénéfices et à simuler les retombées financières potentielles fournies par ces co-bénéfices est une des façons possibles de procéder.



5- NEGOCIATION ET MISE EN PLACE DES CONTRATS

5.a-Stratégie déployée

Après la phase de design du mécanisme PSE et d'analyse des critères d'engagement des vendeurs et des acheteurs, il s'agit ici de négocier et de mettre en place concrètement des contrats PSE "privé-privé" sur le BV du lac au Duc. Comme indiqué plus haut, cette phase a pris plus de 6 mois de retard du fait de la crise sanitaire liée à la pandémie COVID-19. A l'heure d'écriture de ce rapport (octobre 2020), la stratégie suivante est déployée pour mettre en œuvre cette phase de signature concrète des contrats.

Définition d'un territoire expérimental au sein du BV du lac au Duc et mobilisation des agriculteurs du territoire. Compte-tenu de la superficie du BV du lac au Duc et du nombre important d'agriculteurs opérant sur ce BV (>400), il est apparu déraisonnable de travailler d'entrée de jeu à l'échelle de tout le BV. Il a été jugé plus réaliste de commencer par mettre en place une expérimentation à l'échelle d'un secteur plus restreint. Le choix a porté sur le sous-BV du Rézo, dans le secteur des communes de Saint-Brieuc de Mauron, Guilliers, et Loyat. Ce secteur, d'une superficie de 3600 ha, a été choisi en priorité car : 1) il se situe dans la partie centre-sud du bassin-versant du Lac au Duc, partie la plus émettrice de P agricole ; 2) il se situe à proximité du Lac ; 3) il concentre un nombre substantiel de parcelles ayant fait l'objet d'un diagnostic parcelles à risque pouvant servir de guide pour cibler des actions de lutte contre les émissions diffuses de phosphore ; 4) il concentre également un nombre important de parcelles ayant fait l'objet

d'implantation de MAEC, caractéristique dénotant une certaine sensibilité des agriculteurs du secteur à la question environnementale ; enfin, 5) il se caractérise par une densité bocagère assez faible, dénotant la présence de marges de manœuvre importantes du point de vue de l'implantation de talus plantés, sachant que les talus plantés constituent l'un des attributs techniques les plus efficaces pour lutter contre l'érosion des sols, et les émissions diffuses de phosphore que cette érosion entraîne.

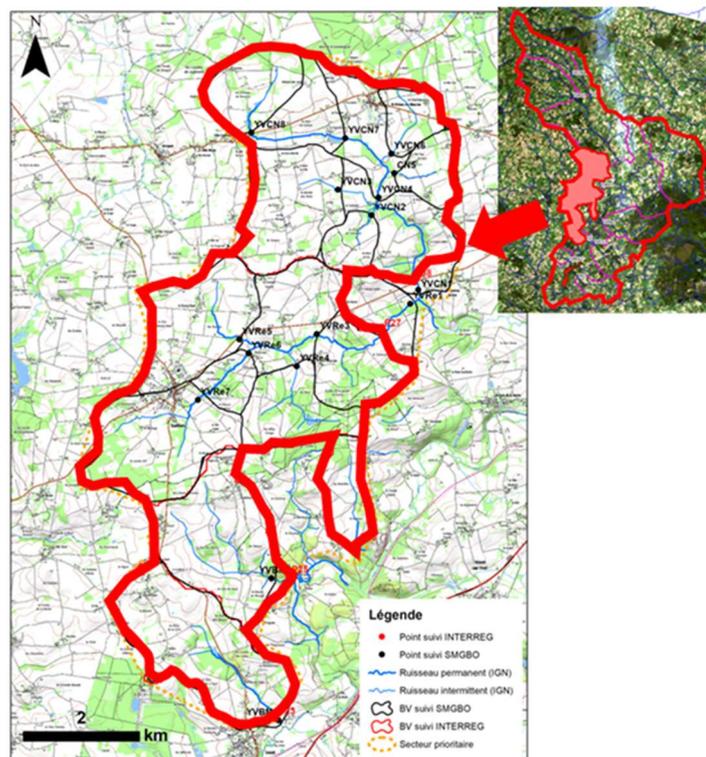


Figure 19 - Limites du sous-BV du Rézo retenu pour l'implantation des premiers contrats PSE, et position du sous-Bv au sein du BV du lac au Duc. Le lac au Duc se situe au sud-est du sous-BV.

Quinze agriculteurs de ce sous-BV ont été contactés et se sont déclarés prêts à s'engager dans un processus de négociation et de mise en place de contrats PSE. En restreignant le travail à ces 15 agriculteurs, nous espérons gagner en efficacité et être en capacité de mettre en place une stratégie de négociation et de signature de contrat éprouvée, tant sur le plan du contenu des contrats que de leur statut juridique, permettant une extension ultérieure et rapide aux autres agriculteurs du BV du lac au Duc.

Mise en place d'une collaboration avec l'association Alli'Homme et la Chambre d'Agriculture de Bretagne. Le mécanisme PSE envisagé par le lac au Duc étant un mécanisme "privé-privé", il est nécessaire de mettre en place une structure intermédiaire de collecte des fonds auprès des entreprises, et de gestion et de distribution des fonds collectés aux agriculteurs. Cette structure doit bénéficier d'un statut juridique ad hoc, lui permettant d'assurer ce rôle. Initialement, la recherche de cette structure devait être assurée par le cabinet Sara Hernandez Consulting qui pour des raisons internes a été malheureusement contraint de recentrer son activité sur l'étude pilote du BAC du Tremblay, en Normandie. Après une phase de recherche et négociation de plus



de 6 mois conduites par les partenaires restants de l'étude de cas lac au Duc, un partenariat a pu être noué avec l'association Alli'Homme.

Alli'Homme est une association loi 1901, active depuis janvier 2018. Fondée par la Fédération Départementale des Syndicats d'Exploitants Agricoles du Finistère, cette association a pour objet de valoriser, maintenir, améliorer, les fonctionnalités environnementales des espaces ruraux et agricoles par la promotion et le développement de pratiques agricoles et forestières porteuses de services environnementaux. A termes, Alli'Homme vise à être l'opérateur de déploiement des services environnementaux fournis par l'agriculture à l'échelle des quatre départements bretons, dans le cadre de partenariats gagnant-gagnant entre agriculteurs et entreprises privées sous la forme de contrats de PSE. L'intérêt du partenariat avec Alli'Homme est triple : 1) Alli'Homme possède un savoir-faire dans le design et le statut juridique des contrats PSE entre agriculteurs et entreprises privées, attesté par la signature d'un premier contrat en 2020 dans la région de Quimper (voir Figure 20) ; 2) de par son statut d'association, Alli'Homme est en capacité de servir d'intermédiaire entre entreprises et agriculteurs et de gestionnaire et de pourvoyeur de financements privés aux agriculteurs ; 3) étant une émanation de la profession agricole, Alli'Homme a en main des leviers pour motiver les agriculteurs à souscrire des contrats PSE.

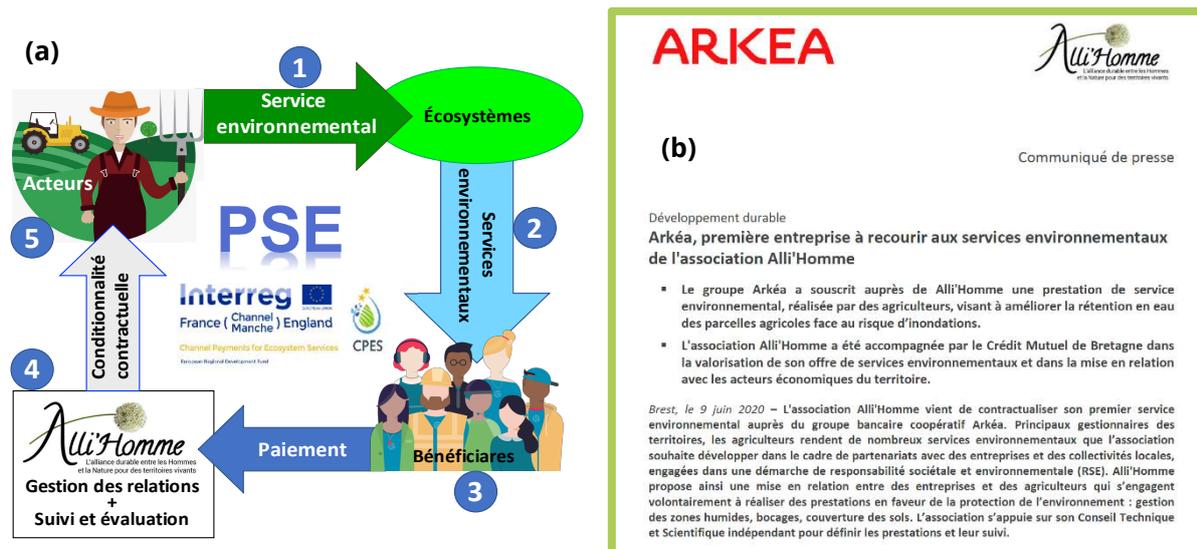


Figure 20 - (a) place de l'association Alli'Homme dans le mécanisme de PSE mis en place sur le BV du lac au Duc par le projet INTERREG CPES ; (b) communiqué de presse conjoint entre l'association Alli'Homme et la société Arkéa à l'occasion de la signature du premier contrat PSE "privé-privé" en Bretagne.

La Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB) étant partenaire de l'association Alli'Homme, notamment via le personnel qu'elle délègue auprès de cette association, le partenariat noué entre les équipes INTERREG de l'étude pilote Lac au Duc et l'association Alli'Homme implique également un partenariat avec la CRAB. Ce second partenariat est intéressant en lui-même pour trois raisons : 1) la CRAB est un des artisans du projet Carbocage qui a obtenu en octobre 2020 le "label bas carbone" mis en place par le Ministère de l'Environnement et de la Transition Ecologique pour stimuler la compensation carbone volontaire

en France ; cette labélisation pourrait aider à valoriser financièrement (sous l'angle du stockage de carbone) l'attribut "haie anti-érosive" au cœur du mécanisme PSE "lac au Duc". 2) la CRAB porte la réflexion PSE menée au niveau national par l'Association Permanente des Chambres d'Agriculture française ; 3) la CRAB dispose d'un savoir-faire technique et de références à la parcelle dans le domaine de la lutte contre l'érosion des sols et des transferts de P, savoir-faires techniques et références qui pourront être mobilisés par les agriculteurs pour construire leur offre de PSE.

On notera que ce partenariat avec l'association Alli'Homme et la CRAB a été scellé via la construction et le dépôt en commun d'un projet à l'appel à initiative "Expérimentations pour la mise en place de paiement pour services environnementaux (PSE)" lancé en janvier 2020 par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne. Ce projet, financé à hauteur de 37 000€ va permettre à l'association Alli'Homme et à la CRAB d'assurer leur participation à l'étude pilote lac au Duc jusqu'à la fin 2021.

5.b-Contenu et calendrier des actions en cours

Le travail de négociation des premiers contrats PSE en collaboration avec l'association Alli'Homme et la CRAB a commencé début octobre 2020, date de mise en place d'un groupe de travail commun.

Les objectifs de ce groupe sont :

- 1) **Construire une boîte à outil permettant aux agriculteurs de construire leur offre PSE.**
Cette boîte à outil s'appuiera sur le diagnostic parcelle à risques mis au point par la CRAB qui classe les parcelles agricoles trois catégories dépendant du risque érosion. L'utilisation de ce diagnostic familier des agriculteurs permettra de cibler les parcelles sur lesquelles ciblées les PSE. Un algorithme, simple d'utilisation, basé sur un « scoring » du risque et de l'efficacité des attributs choisis pour le réduire va être mis au point pour permettre une quantification a priori de l'efficacité "érosion" de l'offre formulée par l'agriculteur (évaluation du taux d'abattement de l'offre par rapport au flux érosif actuel). L'objectif est que cette boîte à outils soit opérationnelle d'ici à mars 2021
- 2) **Intégrer dans cette boîte à outil des éléments permettant d'évaluer les co-bénéfices "carbone" et "biodiversité"** des attributs sélectionnés par l'agriculteur, et notamment de l'attribut "haie anti-érosive". Les critères mis au point dans le cadre du projet Carbocage pour évaluer le stockage additionnel des haies en fonction de leur type et mode de gestion (<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/M%C3%A9thode%20haies%20LBC%20VF.pdf>; Fig. 15), et ceux inscrits dans le cahier des charges de gestion des haies du label haie (<https://labelhaie.fr/>) pour définir une haie en bon état écologique seront utilisés ici. L'objectif est que ces éléments complémentaires permettant d'évaluer le potentiel de co-valorisation des attributs qualité d'eau en lien avec les services "carbone" et "climat" soient également prêts et validés pour mars 2021.
- 3) **Construire une plaquette de présentation et de communication** du projet à l'attention des entreprises.
- 4) **Identifier une ou plusieurs entreprises** susceptibles de rentrer dans un processus actif de co-construction et de négociation de contrat avec un ou plusieurs du sous-BV du Rézo. L'objectif fixé ici est le 2^{ème} trimestre 2021.



5.c-Les points en suspens et les risques

Un point important reste en suspens. Il s'agit du contrôle de l'efficacité environnementale des PSE construit et proposé par les agriculteurs. La signature de PSE ne pouvant concerner pour les raisons exposées ci-dessus l'ensemble des agricultures, un monitoring du flux de P en entrée de lac n'est pas de nature à pouvoir servir de juge de paix de l'efficacité environnementale des PSE proposés. Une évaluation à la parcelle ou à l'exploitation doit être envisagée avec pour l'instant une seule option véritablement possible, basée sur une vérification des moyens mis en œuvre et de leur pérennité, la question posée ici étant celle de la personne ou de l'autorité responsable de cette vérification.



Figure 21 - Plaque de présentation du protocole Carbocage de valorisation du carbone stocké par les haies

Une autre question concerne la certification et la labellisation, deux items pouvant être déterminants pour l'engagement des entreprises. Un label spécifique est en cours d'obtention pour la haie du point de vue du stockage du carbone via le dispositif carbocage. Il n'existe par contre pas à l'heure actuel de label équivalent pour la qualité de l'eau. La question de réfléchir à la construction d'un label associant plusieurs services environnementaux et du cahier des charges à associer à ce label est clairement posée.

Concernant les risques, le risque immédiat et le plus important est celui engendré par la crise sanitaire liée à la pandémie du COVID19 qui non seulement restreint les rencontres en présentiel et les travaux en groupe (fondamentaux dans un processus de construction de PSE), mais aussi et surtout fragilise les acteurs économiques, avec le risque de cela les détourne de l'objectif poursuivi ici qui est de les faire contribuer au fond PSE "lac au Duc".

Références citées

- Briand, E., Gugger, M., Francois, J.C., Bernard, C., Humbert, J.F., Quiblier, C. Temporal variations in the dynamics of potentially microcystin-producing strains in a bloom-forming *Planktothrix agardhii* (cyanobacterium) population. *Appl. Environ. Microbiol.* 2008, 74, 3839–3848, doi:10.1128/aem.02343-07.
- Brient, L.; Lengronne, M.; Bertrand, E.; Rolland, D.; Sipel, A.; Steinmann, D.; Baudin, I.; Legeas, M.; Le Rouzic, B.; Bormans, M. A phycocyanin probe as a tool for monitoring cyanobacteria in freshwater bodies. *J. Environ. Monit.* 2008, 10, 248–255, doi:10.1039/b714238b.
- Casquin A., Dupas R., Gu S., Petitjean P., Gruau G., Durand P. Propagation and alteration of headwater hydro-chemical signals through river network in a meso-scale agricultural catchment River network alteration of C-N-P dynamics in a mesoscale agricultural catchment. *Science of the Total Environment*, 2020, 749:141551.
- Chenu C., Klumpp K., Bispo A., Angers D., Colenne C., Metay A. Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. 2014, *Innovations Agronomiques* 37 : 23-37.
- Daryanto, S., Wang, L., Jacinthe p-A. Meta-Analysis of Phosphorus Loss from No-Till Soils. *J. Environ. Quality*, 2017, 46 (5): 1028-1037.
- Gherib J.B.B., and Bergu-Douce S. L'engagement environnemental des PME : Une analyse comparative France Tunisie. Actes de la conférence de l'AIMS, 2008, Nice, France.
- Huisman, J., Codd, G.A., Paerl, H.W., Ibelings, B.W.; Verspagen, J.M.H.; Visser, P.M. Cyanobacterial blooms. *Nat. Rev. Microbiol.* 2018, 16, 471–483, doi:10.1038/s41579-018-0040-1.
- lida, R. Synthèse bibliographique : comment articuler un mécanisme de compensation carbone par l'agriculture avec les paiements pour services environnementaux imaginés pour réduire l'impact négatif des pratiques agricoles sur la qualité de l'eau. Application aux travaux en cours sur le bassin-versant du Lac au Duc. Mémoires de Master 2, 2020, Agrocampus Ouest, 46p.
- Kleinman P.J.A., Sharpley A.N., Withers P.J.A., Bergström L., Johnson L.T., Doody D.G. Implementing agricultural phosphorus science and management to combat eutrophication. *Ambio*, 2015, 44 (Suppl. 2): S297–S310.
- Legeay P-L., Gruau G., Moatar F.) Une analyse de la variabilité spatio-temporelle des flux et des sources du phosphore dans les cours d'eau Bretons. Agence de l'Eau Loire Bretagne, 2015, 104 p.
- Pellerin S., Bamière L. et al. Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, 2019, INRA (France), 114 p.
- Kolzau, S., A. M. Dolman, M. Voss, and C. Wiedner. 2018. The response of nitrogen fixing cyanobacteria to a reduction in nitrogen loading. *Int. Rev. Hydrobiol.* 103: 5–14. doi: 10.1002/iroh.201601882.
- Kurmayer, R., Christiansen, G., Fastner, J., Borner, T. Abundance of active and inactive microcystin genotypes in populations of the toxic cyanobacterium *Planktothrix* spp. *Environ. Microbiol.* 2004, 6, 831–841, doi:10.1111/j.1462-2920.2004.00626.

- Kurmayer, R., Deng, L.; Entfellner, E. Role of toxic and bioactive secondary metabolites in colonization and bloom formation by filamentous cyanobacteria *Planktothrix*. *Harmful Algae* 2016, 54, 69–86, doi:10.1016/j.hal.2016.01.004.
- Lang-Yona, N., Kunert, A. T., Vogel, L., Kampf, C. J., Bellinghausen, I., Saloga, J. & Pöschl, U. (2018). Fresh water, marine and terrestrial cyanobacteria display distinct allergen characteristics. *Science of the Total Environment*, 612, 767-774.
- Martin-Ortega J., Waylen K.A. PES What a Mess? An Analysis of the Position of Environmental Professionals in the Conceptual Debate on Payments for Ecosystem Services. *Ecological Economics*, 2018, 154: 218-237. Matthijs et al. 2016.
- Moss, B., E. Jeppesen, M. Søndergaard, T. L. Lauridsen, and Z. Liu. 2013. Nitrogen, macrophytes, shallow lakes and nutrient limitation: Resolution of a current controversy? *Hydrobiologia* 710: 3–21. doi:10.1007/s10750-012-1033-0
- Nemery, J., 2018. Phosphore et eutrophisation. *Encyclopédie de l'environnement*, Université Grenoble Alpes, 7 pages.
- Nevalainen, L., & Luoto, T. P. (2017). Relationship between cladocerans (Crustacea) functional diversity and lake trophic gradients. *Functional Ecology*, 31, 488–498. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12737>
- Paerl, H.W.; Huisman, J. Climate - Blooms like it hot. *Science* 2008, 320, 57–58, doi:10.1126/science.1155398.
- Pinay et al. 2017.
- Pitois, F.; Thoraval, I.; Baures, E.; Thomas, O. Geographical Patterns in Cyanobacteria Distribution: Climate Influence at Regional Scale. *Toxins* 2014, 6, 509–522, doi:10.3390/toxins6020509.
- Reynolds, C.S. *The ecology of phytoplankton*; Cambridge University Press, 2006; ISBN 1-139-45489-7.
- Scott, J. T., and E. M. Grantz. 2013. N₂ fixation exceeds internal nitrogen loading as a phytoplankton nutrient source in perpetually nitrogen-limited reservoirs. *Freshw. Sci.* 32: 849–861. doi:10.1899/12-190.1.
- Sharpley A.N., Bergström V, Aronsson H., Bechmann M., Bolster C.H., Börling K., Djodjic F., Jarvie H.P., Schoumans O.F., Stamm C., Tonderski K.S., Uleń B., Uusitalo R., Withers P.J.A. Future agriculture with minimized phosphorus losses to waters: Research needs and direction. *Ambio*, 2015, 44 (Suppl. 2): S163–S179.
- Shatwell, T and Köhler, J 2019. Decreased nitrogen loading controls summer cyanobacterial blooms without promoting nitrogen-fixing taxa: Long-term response of a shallow lake. *Limnology and Oceanography* 64, S166-S178.
- Shatwell, T., & Köhler, J. (2019). Decreased nitrogen loading controls summer cyanobacterial blooms without promoting nitrogen-fixing taxa: Long-term response of a shallow lake. *Limnology and Oceanography*, 64(S1), S166-S178.
- Sivonen, K.; Jones, G. Cyanobacterial toxins. *Toxic Cyanobacteria Water Guide Their Public Health Consequences Monit. Manag.* 1999, 1, 43–112.

- Sondergaard, M.; Jensen, J.P.; Jeppesen, E. Seasonal response of nutrients to reduced phosphorus loading in 12 Danish lakes. *Freshw. Biol.* 2005, 50, 1605-1615, doi:10.1111/j.1365-2427.2005.01412.
- Vadas, P-A., Joern, B.C.; Moore, P. A., Jr. Simulating Soil Phosphorus Dynamics for a Phosphorus Loss Quantification Tool. *J. Environ. Quality*, 2012, 41 (6): 1750-1757.
- Van Liere, L.; Mur, L.R. Occurrence of *Oscillatoria agardhii* and some related species, a survey. In *Hypertrophic ecosystems*; Springer, 1980; pp. 67-77.
- VOCAL. Potentiel et déterminants de la demande volontaire en crédits carbone en France. Rapport I4CE, 2017, 32p.
- Wiegand, C.; Pflugmacher, S. Ecotoxicological effects of selected cyanobacterial secondary metabolites a short review. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2005, 203, 201-218, doi:10.1016/j.taap.2004.11.002.
- Wunder S., Brouwer R. , Engel R., Ezzine-de-Blas D., Muradian R., Pascual U. and Pinto R. From principles to practice in paying for nature's services. *Nature Sustainability*, 2018, 1:145-150.