



Année universitaire : 2018 - 2019

Spécialité :

Spécialisation (et option éventuelle) :

Mémoire de fin d'études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Analyse coût-bénéfice de la réduction des flux de phosphore dans un bassin versant : Cas de l'Yvel-Hyvet et du Lac Au Duc

Par Maixent HOUENOU HOUNSINO

Illustration éventuelle

| | | | |
|---|--|----------------------|--|
| Soutenu à Rennes | | Le 13/09/2019 | |
| Devant le jury composé de : | | | |
| Président : DUPRAZ PIERRE | | DUPAS Rémi | |
| Maître de stage : LE GOFFE Philippe | | LATOUCHE Patrick | |
| Enseignant référent : ROPARS-COLLET Carole | | | |
| Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST | | | |
| Ce document est soumis aux conditions d'utilisation | | | |
| «Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» | | | |
| disponible en ligne http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr | | | |



Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du **maître de stage** ⁽²⁾ :
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur⁽³⁾ Nom Prénom -----

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-NC-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'**auteur** :

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'**enseignant** :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements

Dans un premier temps je tiens à remercier mon maître de stage Philippe LEGOFFE et mon enseignante référent Carole ROPARS-COLLET pour tout le temps qu'ils m'ont accordé tout au long de mon stage. A travers nos différents échanges, ils ont su me guider et m'apporter les ressources qui m'ont permis de réaliser ce travail.

Je remercie également Antoine CASQUIN tout particulièrement pour avoir pris le temps de m'initier à la cartographie et Rémi DUPAS pour s'être toujours rendu disponible tout au long du stage. Je n'aurais pas pu réaliser ce travail sans leurs concours.

Merci à Josselin CANLET qui m'a permis de prendre le train en marche et s'est toujours rendu disponible quand j'en avais besoin.

Merci à Monsieur Gérard GRUAU pour ses encouragements.

Pour terminer je remercie tous les membres de l'équipe mobilisée dans le cadre du projet CPES pour l'étude sur le cas du Lac Au Duc pour m'avoir accompagné durant ce stage de fin d'étude.

Liste des abréviations utiles :

AFFSA : Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments

ARS : Agence Régionale de Santé

CAP : Consentement A Payer

CAR : Consentement A Recevoir

CPES : Channel Payments for Ecosystem services

DIREN : Direction Régionale de l'Environnement

FEDER : Fonds Européen de Développement régional

P : Phosphore

PSE : Paiements pour Services Environnementaux

RPG : Registre Parcellaire Graphique

RRP : Référentiel Régional Pédologique

SAU : Surface Agricole Utile

SIAEP : Syndicat Intercommunal d'Alimentation en Eau Potable

SMGBO : Syndicat Mixte du Grand Bassin de l'Oust

Table des figures

| | |
|---|------------------------------------|
| Figure 1 : Fonctionnement du semis direct sous couvert/ Chambre d'Agriculture du Finistère/2019... | 18 |
| Figure 2 : Exemple de choix proposé aux agriculteurs enquêtés/Ropars Carole/2019 | 20 |
| Figure 3 : Enquête agriculteurs caractéristiques de l'échantillon/ Ropars Carole / 2019 | 21 |
| Figure 4 : Interface du modèle APLE/ Houenou M./2019 | 27 |
| Figure 5 : Sorties du modèle APLE/ Houenou M./ 2019 | 28 |
| Figure 6 : Outil de simulation des combinaisons de mesures agricoles/ Houenou M./2019..... | 30 |
| Figure 7 : Classification des profils de parcelles par ordre d'efficacité/ Houenou M./2019 | 31 |
| Figure 8 : Classification des profils de parcelles agricoles par ordre de coût-efficacité avec 100m de Haies/ha / Houenou M./ 2019..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 9 : Classification des profils de parcelles agricoles par ordre de coût-efficacité avec 20m de Haies/ha / Houenou M./ 2019..... | 33 |
| Figure 10 : Echelle d'agrégation du consentement à payer des usagers du Lac Au Duc/ Houenou M./ 2019..... | 34 |
| Figure 11 Sortie Modèle Logit 1 / Houenou M./ 2019..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 12 Sortie Modèle logit 2 / Houenou M. / 2019 | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 13 : comparaison de mesures pour une division par 2 du P à l'exutoire du bassin versant / Houenou M./2019..... | 40 |
| Figure 14 : comparaison de mesures pour une division par 3 du P à l'exutoire du bassin versant / Houenou M./2019..... | 41 |
| Figure 15 : mesures extrêmes pour une division par 5 du P à l'exutoire (gauche) ; mise en place de paiement uniforme/ Houenou M./2019 | 42 |
| Figure 16 comparaison du coût des mesures optimales au bénéfice des usagers..... | 43 |

Table des tableaux :

| | |
|---|----|
| Tableau 1 Paramètres du modèle de coût (sans prise en compte de maïs)/ Ropars Carole/2019..... | 23 |
| Tableau 2 Paramètres du modèle de coût (prise en compte du maïs) /Ropars Carole/ 2019..... | 24 |
| Tableau 3 Synthèse des paramètres d'agrégation du CAP / Houenou M. / 2019 | 37 |
| Tableau 4 :Statuts trophiques/écologiques décrits pour les plans d'eau peu profonds. 1 : Nemery 2018 ; 2: Moss et al. 2003, 3 : Søndergaard et al. 2005./ Consortium scientifique du site pilote/2018 | 38 |
| Tableau 5 : Objectifs retenus pour les simulations / Houenou M./ 2019 | 39 |
| Tableau 6 : comparaison de mesure pour une division par 2 à l'exutoire du bassin versant/ Houenou M./ 2019 | 40 |
| Tableau 7 : comparaison de mesure pour une division par 3 à l'exutoire du bassin versant/ Houenou M./ 2019 | 41 |
| Tableau 8 : fiche signalétique mesure pour une division par 5 du P à l'exutoire du bassin versant et mise en place de paiement uniformes / Houenou M./ 2019 | 42 |
| Tableau 9 comparaison des bénéfices des usagers aux coûts de nos mesures/ Houenou M./ 2019 | 43 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction | 8 |
| 1.1 Cadre de l'étude..... | 8 |
| 1.2 Problématique et annonce du plan..... | 8 |
| 2 L'eutrophisation : mécanisme de transfert de phosphore..... | 10 |
| 3 Contexte et enjeux | 10 |
| 3.1 Présentation de l'Yvel-Hyvet | 10 |
| 3.2 Présentation du Lac Au Duc..... | 11 |
| 3.2.1 Caractéristiques | 11 |
| 3.2.2 Encadrement sanitaire | 11 |
| 3.2.3 Historique des mesures pour la conservation du bassin de l'Yvel-Hyvet | 12 |
| 4 Les Paiements pour Services Environnementaux (PSE) | 13 |
| 5 Analyse coût-bénéfice | 16 |
| 6 Méthodologie..... | 17 |
| 6.1 Présentation des enquêtes et principaux résultats de l'analyse économétrique | 19 |
| 6.2 Evaluation de l'offre..... | 25 |
| 6.2.1 Analyse de l'efficacité..... | 25 |
| 6.2.2 Hypothèses sur l'efficacité des Haies antiérosives..... | 29 |
| 6.2.3 Outil de simulation des combinaisons de mesures | 29 |
| 6.3 Evaluation de la demande..... | 33 |
| 6.3.1 Estimation du nombre de visite | 34 |
| 6.3.2 Agrégation du consentement à payer (CAP) des usagers..... | 37 |
| 6.4 Liaison entre Offre et demande | 38 |
| 7 Présentation des résultats..... | 39 |
| 7.1 Présentation des scénarios | 39 |
| 7.2 Bénéfice des usagers et comparaisons (coût – bénéfice)..... | 43 |
| 8 Discussion | 44 |
| 9 Conclusions | 46 |
| Références bibliographiques | 47 |

Introduction

1.1 Cadre de l'étude

Cette étude intervient au sein du projet de coopération Channel Payments for Ecosystem Services (CPES) mené dans le cadre du programme Interreg France (Manche) Angleterre et cofinancé par le Fond Européen de Développement Régional à hauteur de 2.8 millions d'euros sur la période allant de 2017 à 2021. Le programme Interreg France (Manche) Angleterre est un programme de coopération territoriale européenne lancé en 2016. Ce programme finance via le Fond européen de développement régional (FEDER) des projets de développement économique dans les régions du Nord de la France allant du Finistère au Pas-de-Calais et le Sud de l'Angleterre, qui s'étend du Norfolk aux Cornouailles (GENTILS 2017, p. 1; 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 2019)

Le projet CPES vise l'amélioration de la qualité de l'eau par la mise en place de paiement pour services écosystémiques dans 6 bassins versants pilotes en France et en Angleterre dont celui de l'Yvel-Hyvet qui fera l'objet de notre analyse. En effet depuis les années 1970 on assiste à l'apparition de cyanobactéries à la surface du Lac Au Duc un plan d'eau artificiel situé en aval du bassin versant. Ce phénomène d'eutrophisation s'explique par un apport important de phosphore (P) dans le lac. Cet apport provient essentiellement des parcelles agricoles situées en amont du bassin. En effet les études menées dans le bassin versant font état d'un apport en phosphore excédentaire par rapport aux besoins des cultures (MOISAN et al. 2010, p. 87). Cet excès de phosphore (P) est stocké dans le sol et lorsqu'il y a phénomène d'érosion (causé notamment par les pluies) est transféré via le réseau hydrographique pour aller s'accumuler dans le lac situé en aval du bassin (MOISAN et al. 2010, p. 33).

Pour lutter contre ce phénomène il est prévu dans le cadre du projet CPES la mise en place de contrats de Paiement pour Service Environnementaux (PSE) qui seront proposés aux agriculteurs du bassin versant. A travers ces contrats seront mis en place les mesures suivantes :

- La mise en place de couverts végétaux
- La mise en place de haies antiérosives
- L'interdiction d'apport fertilisant minéraux (phosphore)

Ces mesures permettront notamment de réduire le transfert des particules de phosphore depuis les parcelles agricoles situées en amont jusqu'au Lac Au Duc situé en aval du bassin.

1.2 Problématique et annonce du plan

Cette étude intervient également en soutien à l'équipe de scientifique chargée de mener une étude socio-économique préalable à la mise en place des PSE au niveau des agriculteurs à l'échelle du bassin versant et des usagers du Lac Au Duc.

La finalité générale de l'étude est de vérifier s'il y a un gain au ciblage des parcelles les plus coût-efficace pour la mise en place des PSE et qu'il est nécessaire de prendre en compte le surcoût propre à certains systèmes de production dans le choix du montant des PSE

Le thème de l'étude est : « Analyse coût-bénéfice de la réduction des flux de phosphore dans un bassin versant : Cas de l'Yvel-Hyvet et du Lac Au Duc ». Il s'appuie sur plusieurs questionnements :

Où sont localisées les parcelles les plus contributrices aux transferts de phosphore à l'échelle du bassin versant ? (Identification des sources de phosphore aux niveaux desquelles des mesures d'atténuation seraient les plus coût-efficaces)

Existe-t-il un réel avantage au ciblage des parcelles les plus coût-efficaces ? Est-il indispensable de prendre en compte le surcoût des mesures propre à certains types de production ?

Selon les niveaux de réduction de la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant les bénéfices permettent-ils de couvrir les coûts respectifs de mise en place des mesures ?

Objectifs du stage : Face à cette problématique les objectifs du stage sont les suivants :

- Utilisation d'un Modèle de simulation (APLE) pour évaluer l'efficacité de la mise en place de mesures agricoles (couvert et suppression des apports en minéraux phosphatés) et formulation d'hypothèses sur l'efficacité des haies antiérosives sur des parcelles agricoles du bassin versant
- Utilisation d'un modèle de simulation pour identifier des combinaisons de mesures agricoles permettant d'atteindre des niveaux donnés de réduction de la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant de l'Yvel-Hyvet
- Exploitation des résultats d'estimation de la fonction d'offre des mesures agricoles pour l'agrégation des coûts de mesures permettant d'atteindre des niveaux donnés de réduction de la concentration de phosphore à l'échelle du bassin versant
- Exploitation des résultats d'estimation du consentement à payer des usagers du Lac en fonction des activités praticables sur le lac pour l'agrégation des bénéfices induits par le niveau d'attributs offerts par le lac
- Formulation d'hypothèses permettant d'établir un lien entre des niveaux de division de la concentration de phosphore et le type d'activités praticables sur le lac, donc du niveau d'attributs offert par le lac
- Comparaison des coûts respectifs de différentes combinaisons de mesures agricoles permettant des niveaux donnés de réduction de la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant
- Pour chacun des niveaux de divisions retenus comparaison du coût de la combinaison de mesures la plus coût-efficace aux bénéfices induits par le niveau correspondant d'attributs offerts par le lac.
- Discussion sur les implications de cette étude dans la conception des PSE

Pour atteindre ces objectifs nous allons commencer par présenter le phénomène dont il est question. Nous présenterons par la suite le contexte de l'étude afin d'expliquer les enjeux liés au phénomène de l'eutrophisation sur le lac. Nous donnerons des définitions de quelques concepts clés nécessaires à la compréhension des termes employés dans le cadre de notre étude. Par la suite nous présenterons la méthodologie adoptée pour répondre à la problématique. Pour

finir nous présenterons les principaux résultats obtenus et discuterons leur implication dans la conception des PSE.

2 L'eutrophisation : mécanisme de transfert de phosphore

Le phosphore (P) est le principal facteur limitant des cyanobactéries. Cela en fait le paramètre sur lequel il faut ici agir pour lutter contre le phénomène de l'eutrophisation. Si le phénomène d'eutrophisation se manifeste à une échelle locale les mécanismes qui en sont à l'origine s'observent sur de larges échelles spatio-temporelles, d'où la complexité du phénomène. (AUSTRUY 2012, p. 18). En France on estime qu'environ la moitié du flux annuel de phosphore (P) dans les cours d'eau provient de sources diffuses agricoles, en Bretagne on estime cette contribution à 70% environ (Consortium scientifique du site pilote "Lac au Duc" 2018a, p. 7). Le problème avec les pollutions diffuses est qu'il n'est pas aisé d'établir un lien entre les multiples sources d'émissions et le milieu récepteur qui en subit les effets, il est d'autant plus difficile de mesurer les niveaux de contributions respectifs des différentes sources d'où la difficulté de mettre en place des mesures de lutte efficaces.

Nous allons maintenant présenter le cas d'étude afin d'avoir une meilleure connaissance du milieu concerné ainsi qu'une meilleure compréhension des enjeux.

3 Contexte et enjeux

Nous allons maintenant présenter les principales caractéristiques du bassin versant de l'Yvel-Hyvet et du Lac au Duc, étendue d'eau artificielle située en aval. Ceci permettra d'avoir une meilleure connaissance du territoire et donc une meilleure compréhension des enjeux liés au problème de l'eutrophisation dans ce milieu.

3.1 Présentation de l'Yvel-Hyvet

Le bassin versant de l'Yvel-Hyvet est situé en France dans la région de la Bretagne et s'étend sur une superficie de 37 465 ha, à cheval sur les départements des Côtes d'Armor (représentant 17% de sa surface), d'Ille et Vilaine (représentant 12% de sa surface) et du Morbihan (représentant 71% de sa surface). Au total 22 communes ont au moins une partie de leur territoire sur le bassin versant. La population totale du bassin versant est estimée à environ 21300 habitants (MOISAN et al. 2010, p. 7). La densité du bassin est d'environ 74 habitants/km². Le réseau hydrographique du bassin versant s'étend sur 325 km de cours d'eau. La SAU du bassin versant est de 24 070 ha, soit 73.34% de la superficie totale du bassin versant ce qui en fait un bassin essentiellement agricole. On y dénombre 448 exploitations agricoles. (MOISAN et al. 2010, p. 45).

3.2 Présentation du Lac Au Duc

3.2.1 Caractéristiques

Le Lac Au Duc est un lac artificiel de 3,5 millions de m³ situé en aval du bassin versant de l'Yvel-Hyvet. Localisé dans le département du Morbihan le lac se situe à cheval entre les communes de Loyat, Taupont et Ploërmel. Fermé par un verrou rocheux le lac occupe une dépression naturelle dans la vallée de l'Yvel. Il mesure 4,8 km de longueur, a une largeur maximale de 600m, une profondeur moyenne de 2,6 m et se prolonge par une zone humide de 800m. Il couvre une superficie de 250 ha. Le Lac Au Duc est alimenté principalement par la rivière de l'Yvel et par quelques ruisseaux. L'Yvel rejoint ensuite la rivière du Ninian, un affluent de la rivière de l'Oust(Syndicat Mixte du Grand Bassin de l'Oust 2011).

La préservation du Lac du Duc représente un enjeu important du fait des différents usages du plan d'eau. En effet la retenue d'eau est utilisée comme source d'approvisionnement par le SIAEP Ploërmel pour la production d'eau potable. Aussi de nombreuses activités récréatives se sont développées autour du lac : Il s'agit notamment de la baignade, des activités nautiques et de la pêche.

3.2.2 Encadrement sanitaire

La gestion du risque sanitaire dans l'eau de baignade se base sur deux seuils d'alerte exprimés en concentration de toxines et en nombre de cellules de cyanobactéries par millilitre selon un rythme au moins bimensuel jusqu'au retour à la normale (Ministère Chargé des Affaires Sociales et de la Santé 2012).

L'ARS procède à un contrôle de routine consistant en un comptage cellulaire des cyanobactéries selon une fréquence bimensuelle. Lorsque le comptage montre un dépassement du seuil de 20 000 cellules/millilitre (niveau d'alerte1) la fréquence de prélèvement devient hebdomadaire. Lorsque le comptage signale un dépassement du seuil de 100 000 cellules/millilitre, l'ARS passe en plus du comptage hebdomadaire à la mesure de la concentration de trois types de microcystine (toxine produite par les cyanobactéries) dans l'eau (Ministère Chargé des Affaires Sociales et de la Santé 2012). Selon les seuils ou niveaux d'alertes atteints les recommandations sont les suivantes :

- Plus de 100 000 cellules/ml, à plus ou moins 20% (Niveau d'alerte 2) : limitation de la baignade et de la consommation du poisson issu du plan d'eau
- Plus de 100 000 cellules/ml et une concentration de microcystine > 25µg/l, à plus ou moins 5% (Niveau d'alerte 2) : interdiction de la baignade, de la consommation du poisson et des activités nautiques
- Si présence d'écumes ou de mousses (Niveau d'alerte 3) interdiction de toutes les activités sur et aux alentours du lac

Dans un rapport publié en 2006, l'AFSSA (aujourd'hui appelée l'ANSES) recommande que la baignade soit interdite en cas de dépassement du seuil de 100 000 cellules/ml , à plus ou moins 20% et d'interdire les activités nautiques et la baignade lorsque la concentration de microcystine dépasse le seuil de 13 µg/l, à plus ou moins 5% (LEVI et al. 2006, p. 181).

En ce qui concerne les normes sanitaires encadrant le prélèvement pour la production d'eau potable la seule toxine pour laquelle un seuil a été fixé est la microcystine-LR. La limite est fixée à 1µg/l, au-delà de cette limite le plan d'eau ne peut plus servir à la production d'eau potable. En cas d'exposition chronique ce seuil est abaissé à 0.1 µg/l(LEVI et al. 2006, p. 181).

3.2.3 Historique des mesures pour la conservation du bassin de l'Yvel-Hyvet

Le Lac au Duc présente des problèmes d'eutrophisation depuis plus de 40 ans. En effet selon les témoignages les premières apparitions d'écumes vertes à la surface des eaux du Lac Au Duc remontent aux années 1970. De premières actions sont engagées dans les années 90 pour préserver le plan mais elles sont orientées en faveur de la lutte contre les nitrates. En 1993, le premier programme Bretagne Eau Pure (BEP) se met en place sur le cours d'eau de l'Yvel, afin de réduire les apports de nitrates. Entre 1996 et 1998 on assiste à la création de plusieurs associations de protection de l'environnement qui seront fédérées par l'association du Grand Bassin de l'Oust. On ne commencera à s'intéresser au problème des cyanobactéries qu'à partir de 2001. En 2002 un premier comité de suivi de la qualité de l'eau en particulier sur les Cyanobactéries sera mis en place. Les programmes BEP seront effectifs jusqu'en 2006. Par la suite en 2009 le SDAGE. Loire-Bretagne va identifier le Lac Au Duc comme un plan d'eau exposé au risque d'eutrophisation. En 2011 le SMGBO devient syndicat mixte faisant adhérer l'ensemble des communes des bassins versants de l'Arz, de l'Aff Est, de l'Aff Ouest, du Claie, du Ninian Leverin, de l'Oust Aval, de l'Oust Moyen et de l'Yvel-Hyvet. Entre 2008 et 2012 sera mis en place le Grand Projet 5 (GP5). Un nouveau contrat territorial sera élaboré pour la période allant de 2014 à 2018.

1,3 millions d'euros ont été attribués aux agriculteurs au titre des MAEC et 520 603 € au titre du programme Breizh Bocage sur la période 2007-2020. (Syndicat Mixte du Grand Bassin de l'Oust 2011; AUSTRUY 2012, p. 2; Consortium scientifique du site pilote "Lac au Duc" 2018a, p. 5).

En 2017 le projet CPES qui encadre cette étude est mis en place. Rappelons que, toujours dans le cadre du projet CPES un bassin étanche a été mis en place et que l'eau de baignade retenue au sein du bassin a été traitée au peroxyde d'hydrogène (H₂O₂). Le coût de cette première expérimentation a été de 68 800€ (épandages de peroxyde d'hydrogène et évaluation de son impact sur les cyanobactéries et les autres organismes (zooplancton)). De nombreux ajustements sont nécessaires pour adapter le traitement aux spécificités locales du Lac au Duc et permettre une ouverture de la baignade sur une période plus longue(Consortium scientifique du site pilote "Lac au Duc" 2018a, p. 18).

L'objectif de ce projet est de comprendre l'ensemble des mécanismes à l'origine du transfert de phosphore (P) à l'échelle du bassin versant et d'encourager les pratiques favorables sur l'utilisation des sols grâce à la mise en place de contrats de paiement pour services environnementaux (PSE) économiquement durables à l'échelle du bassin hydrographique. En quoi consiste les PSE et quelles sont les modalités de mise en place de ces outils ? C'est la question à laquelle nous allons maintenant tenter de répondre

4 Les Paiements pour Services Environnementaux (PSE)

Apparu dans les années 90 le concept des Paiements pour Services Environnementaux (PSE) s'est beaucoup développé un peu partout dans le monde (WUNDER et al. 2018, p. 4). On parle de PSE lorsqu'un agent économique qui modifie ses pratiques pour produire ou maintenir des externalités positives est rémunéré par d'autres agents économiques via un mécanisme contractuel reposant sur un accord volontaire mutuel (DUVAL et al. 2016a, p. 80; Börner et al. 2017, p. 1; WUNDER et al. 2018, p. 6; PAJOT and KLERCH 2019, p. 5). La popularité dont jouit cet instrument a été favorisée par la reconnaissance de la notion de service écosystémique et par la volonté de mettre en place des mécanismes de marché permettant d'organiser la fourniture de services environnementaux en tenant compte d'enjeux environnementaux, économiques, sociétaux et qui soient plus efficaces que les politiques publiques (DUVAL et al. 2016a, p. 80; WUNDER et al. 2018, p. 145). Il faut faire la nuance entre les services écosystémiques et les services environnementaux. Un service écosystémique est un bénéfice que les humains retirent des écosystèmes tandis qu'un service environnemental désigne un service rendu par un homme à au moins un autre homme et qui se traduit par l'amélioration ou le maintien de l'état d'un ou de plusieurs écosystèmes (Corvalán et al. 2005, p. 9; DUVAL et al. 2016a, p. 111; PAJOT and KLERCH 2019, p. 5). Dans le cas d'un PSE ce qui sera rémunéré c'est le service environnemental et l'objectif de cette rémunération sera de maintenir ou d'améliorer la fourniture d'un service écosystémique. On distingue notamment 4 types de PSE répartis en deux groupes :

Le premier groupe porte sur les PSE financés volontairement :

- PSE consistant en un accord bilatéral entre usagers des services écosystémiques et fournisseurs de service environnemental (cas de la source de Vittel)
- PSE financé par des paiements d'un groupe d'opérateurs (ONG) qui ne sont pas nécessairement bénéficiaires du service écosystémique impliqué

Le deuxième groupe porte sur les PSE financés involontairement :

- PSE de type bilatéral où les usagers du service écosystémique sont taxés
- PSE financés par un groupe n'étant pas directement usager du service(MAE) (DUVAL et al. 2016a, p. 85; Salzman et al. 2018, p. 1; PAJOT and KLERCH 2019, p. 7)

L'objectif premier des PSE est donc l'efficacité environnementale même si certains vantent leur capacité à lutter contre la pauvreté(Bremer et al. 2014, p. 1; WUNDER et al. 2018, p. 5). Nous allons maintenant essayer de comprendre le fonctionnement d'un PSE à travers ses caractéristiques :

Le caractère volontaire : C'est ce qui distingue les PSE des autres instruments d'intervention tel que la réglementation(DUVAL et al. 2016a, p. 89). Cela suppose que les parties s'entendent sur les modalités de mise en œuvre du PSE (obligations, rémunérations). Normalement conclus entre opérateurs privés il peut arriver que des PSE soient financés par des acteurs publics (MAE). Dans ce cas le financement se fait à partir d'un fond public et constitue une aide de l'état au regard du droit européen(DUVAL et al. 2016a, p. 86).

L'additionnalité : C'est le facteur à travers lequel sera évaluée l'efficacité d'un PSE. L'additionnalité peut être définie comme l'impact d'un changement de pratique dans le cadre d'un PSE. Cet impact s'évalue en comparant le scénario dans lequel le PSE est mis en place à un scénario sans PSE qui servira de référence. Il n'y aura production de service qu'à partir du moment où on note une amélioration par rapport au scénario de référence (DUVAL et al. 2016a, p. 89; WUNDER et al. 2018, p. 5; PAJOT and KLERCH 2019, p. 6). L'efficacité d'un PSE dépend en grande partie de la façon dont il est administré. En effet il ressort de différentes études qu'il y a une asymétrie d'information entre les acheteurs et les fournisseurs du service environnemental. Les acheteurs ne disposent pas d'informations sur les coûts d'opportunités (coût de la meilleure alternative) et sur les coûts de transactions (lourdeurs administratives, manque de connaissances, coûts d'investissements fixes et variables inhérents à l'engagement) des fournisseurs du service. Les fournisseurs de leur côté n'ont aucun intérêt à leur divulguer ces informations de peur de voir diminuer leur surplus. La mise en place d'un paiement uniforme dans la plupart des cas ne s'avère attractive que pour les opérateurs usant déjà des pratiques qu'on veut mettre en place à travers le PSE où dont les pratiques s'en rapprochent fortement. C'est ce qu'on appelle la sélection adverse, dans ce cas les primes sont discriminantes vis-à-vis des fournisseurs pour qui le changement de pratique est le plus coûteux. Il y a risque d'effet d'aubaine, c'est-à-dire que seuls les fournisseurs ayant peu d'impacts sur le service écosystémique, pour qui le coût de changement de pratique est le plus faible sont engagés dans le programme. Il n'y a pratiquement pas d'additionnalité, l'efficacité du PSE est donc négligeable. Pour éviter ce risque il est recommandé de mettre en place des paiement ciblés et différenciés afin de les ajuster le plus finement possible aux efforts des participants (Ducos et al. 2009, p. 3; Espinosa-Goded et al. 2013, p. 6; DUVAL et al. 2016a, p. 100; Börner et al. 2017, p. 5; PAJOT and KLERCH 2019, p. 24). Cela implique de pouvoir évaluer la variabilité des participants (utilisation de techniques d'enchères dans la sélection afin de révéler les coûts réels des fournisseurs et d'identifier des critères qui pourraient servir de proxy pour le déploiement à une plus large échelle). Certains auteurs recommandent de cibler les espaces où les services environnementaux sont les plus denses et également les fournisseurs auprès desquels les coûts de changement de pratique sont les moins élevés. En ce qui concerne notre étude la sélection des fournisseurs est faite sur la base d'un indicateur intégrant des informations sur le coût et l'efficacité d'une combinaison de mesures. Ce critère synthétique nous permettra d'approcher une combinaison coût efficace de mesures pour la conception de nos PSE

La conditionnalité : Il s'agit du respect des engagements pris par un fournisseur (obligations qui font l'objet du contrat). Comme nous l'avons vu, la rémunération est conditionnée par la fourniture d'un service environnemental. Cela suppose que la rémunération ne soit faite qu'une fois que le service est fourni, qu'il a été contrôlé et validé de préférence par un organisme tiers (PAJOT and KLERCH 2019, p. 6). Dans la pratique l'engagement peut nécessiter des investissements de la part des fournisseurs. Il n'est pas évident que des agriculteurs disposent fonds nécessaires à ces investissements. Octroyer un paiement après la fourniture du service contribuerait à réduire fortement le taux de participation des fournisseurs potentiels. Il ressort de la littérature qu'un mécanisme de contrôle est nécessaire pour que l'incitation à un changement de pratique fonctionne (Börner et al. 2017, p. 4; WUNDER et al. 2018, p. 3). Dans le cas où les engagements ne sont pas respectés il est recommandé que des sanctions soient appliquées cependant cela suscite des questions d'acceptabilité. La mise en application de la conditionnalité à travers des mécanismes de suivis et de sanctions (technologie de suivi, contrôle de terrain) est très coûteuse mais ce coût est largement compensé par le gain

d'efficacité du programme (WUNDER et al. 2018, p. 149). On distingue les PSE avec obligation de moyen (ce qu'on retrouve dans la plus part des cas) et de PSE avec obligation de résultat (Le contrôle des résultats peut être direct ou indirect) avec un risque variable selon la méthode choisie.(PAJOT and KLERCH 2019, p. 22) . Plus le lien entre le changement de pratique et le service environnemental est flou plus il est bénéfique d'opter pour une obligation de résultat. En effet cette méthode offre la possibilité au fournisseur de décider par quel moyen il veut assurer la fourniture du service. Cette méthode permet d'exploiter les connaissances locales et les capacités d'innovation des fournisseurs, elle implique cependant une prise de risque plus grande de la part du fournisseur.(DUVAL et al. 2016b, p. 8) En effet l'atteinte des résultats attendus dépend en partie de facteurs exogènes non maîtrisables par le fournisseur. Par conséquent son consentement à recevoir (CAR) sera plus grand puisqu'il intègrera une prime de risque plus importante.

Le lien entre le PSE et le service écosystémique : Il s'agit ici de pouvoir identifier dans le cadre d'un PSE le (s) service (s) concerné (s) et de pouvoir évaluer l'effet du changement ou du maintien d'une pratique sur ce (s) service (s). Les mesures de contrôle peuvent être faites de façon directe via des indicateurs. Cette approche est difficile à mettre en place en raison de la complexité des écosystèmes. Une seconde approche consiste en une approche indirecte à travers la mesure d'indicateurs intermédiaire (proxies) qui permettent d'approcher la valeur des indicateurs que l'on veut mesurer. Dans la mise en place d'un PSE la disponibilité d'indicateurs de mesures représente une condition sin qua non. Plus les indicateurs de mesures choisis sont accessibles plus les coûts de transaction inhérents à la mise en place du PSE sont réduits plus la mesure du service environnemental est approximative voire incertaine. A contrario plus ces indicateurs sont complexes plus la mesure du service environnemental est précise et plus les coûts de transactions sont importants (DUVAL et al. 2016a, p. 83; Börner et al. 2017, p. 6; Salzman et al. 2018, p. 5; WUNDER et al. 2018, p. 5; PAJOT and KLERCH 2019, p. 7). La construction d'indicateurs de mesure dans le cadre des PSE intègrent souvent plusieurs informations et leurs constructions nécessite des compétences pluridisciplinaires. On verra que dans le cadre de notre étude que la construction des indicateurs qui servent de mesures a notamment requis la mobilisation de compétences en économie, en agronomie et en écologie.

Le caractère incitatif du paiement : Représente le principal atout des PSE, les instruments publics alternatifs étant fortement limités sur cet aspect(DUVAL et al. 2016a, p. 12). En effet On retrouve dans le fonctionnement des écosystèmes des effets de seuils et de discontinuité, il faut donc qu'il y ait engagement d'un minimum d'espace pour que l'impact du PSE soit effectif (effet de masse) (DUVAL et al. 2016a, p. 8) . Le caractère attractif d'un PSE représente donc un enjeu important dans le sens où il sera déterminant dans la capacité d'un PSE à impacter de façon effective ou non sur un service écosystémique. En dehors des coûts de transactions, un autre aspect important impactant l'attractivité d'un PSE concerne les aspects d'équité sociale et de bien être humain (Börner et al. 2017, p. 149, p. 4). Comme nous avons pu le voir les PSE sont souvent présentés comme des instruments de lutte contre la pauvreté. Ceci impacte sur la perception et surtout sur les attentes que l'opinion publique a vis-à-vis des PSE. La perception que les participants potentiels ont d'un PSE va jouer sur leur acceptabilité. L'équité peut être perçue sous un aspect horizontal impliquant des paiements uniformes pour tous les participants.

L'équité peut également être perçue sous un aspect vertical avec un paiement adapté en fonction de critères de discrimination. On a vu qu'avec un paiement différencié selon le coût du changement de pratique on atteint une additionnalité maximale, mais dans le cas où la réduction de la pauvreté fait partie des objectifs visés par les concepteurs d'un PSE le paiement pourrait être différencié selon le niveau de pauvreté des participants. On aurait des participants qui ne sont pas coût-efficaces mais qui se retrouvent avec des niveaux de paiements relativement élevés, ce qui serait contre-productif. Il faudra donc faire des compromis dans la conception des PSE, d'autant plus lorsqu'ils sont orientés vers des enjeux contradictoires (DUVAL et al. 2016a, p. 84). En effet un PSE équitable aux yeux des participants potentiels aura une légitimité qui suscitera une adhésion massive et sera déterminante dans la pérennisation des changements induits (DUVAL et al. 2016a, p. 84; Börner et al. 2017, p. 6; WUNDER et al. 2018, p. 6). Ceci explique pourquoi dans beaucoup de cas les concepteurs des PSE préfèrent opter pour des paiements uniformes perçus comme équitables aux yeux du grand nombre.

5 Analyse coût-bénéfice

Dans le cadre de la conception d'un programme de PSE l'objectif de cette étude est de tester différents scénarios en identifiant à chaque fois les parcelles du bassin versant de l'Yvel-Hyvet qui sont concernées, c'est-à-dire celles qui devront être sélectionnées pour la mise en place des mesures. Les critères de sélection seront basés sur des notions de coût efficacité. Il semble alors important de nuancer les notions de coût-efficacité et de coût-bénéfice.

L'analyse coûts-efficacité et l'analyse coût-bénéfice sont des outils d'évaluation de projets qui comparent la valeur des ressources investies (monétaires ou dont la valeur monétaire peut être facilement estimée) à celles des résultats obtenus (monétaires ou non). Il existe pourtant une nuance entre ces deux méthodes :

L'analyse coûts-bénéfices : Aussi appelée coûts-avantages consiste à comparer pour chaque alternative le coût total attendu au bénéfice total attendu en appliquant aux valeurs monétaires un taux d'actualisation pour prendre en compte l'effet du temps. La comparaison peut être faite en calculant un bénéfice net (bénéfice totaux - coûts totaux) ou un ratio (bénéfice totaux/coût totaux)

L'analyse coûts-efficacité : Cet outil intervient lorsque des résultats non monétaires doivent être comparés à des investissements monétaires. L'analyse coût-efficacité consiste à comparer des politiques entre elles en confrontant des politiques (ou alternatives) permettant d'atteindre un objectif donné, ceci dans le but d'identifier l'alternative la moins coûteuse. Ici on ne parle pas de bénéfice net ou de ratio coût-bénéfice. En effet il arrive souvent que les coûts et les résultats soient mesurés dans des unités différentes. La comparaison entre plusieurs alternatives permettant d'atteindre un même résultat se fait à partir d'un coût unitaire (Yates 2015, p. 5). Le coût unitaire représente le coût d'une unité de résultats ou d'output (Levin 1987, p. 2; Bray and Institut international de planification de l'éducation 2009, p. 30; Yates 2015, p. 3).

Dans le cadre de notre étude les mesures que nous cherchons à mettre en œuvre ont pour dessein d'impacter des mécanismes naturels. Notre analyse devrait donc prendre en compte les dimensions spatiales et temporelles de ces phénomènes (effet tampon de certains éléments du paysage). Cependant pour des besoins de simplicité nous ne prendrons pas en compte cette

dimension temporelle dans notre évaluation. Evidemment les implications de cet aspect seront discutées. Il s'agira donc de comparer différentes alternatives (scénarios) permettant d'obtenir les mêmes résultats (donc un même niveau d'efficacité) : l'outil utilisé est donc l'analyse coût-efficacité. Ce travail va nous permettre d'effectuer une analyse de l'offre de services environnementaux. Selon les objectifs qui vont être retenus nous pourrions estimer les coûts respectifs des scénarios les plus coûts-efficace. Ensuite, toujours en fonction de ces objectifs nous allons agréger la demande de services environnementaux. Il s'agira par la suite de comparer l'offre à la demande de services selon les objectifs atteints. La dimension temporelle n'étant pas prise en compte on ne parlera pas ici d'analyse coûts-bénéfice.

Nous allons maintenant présenter la méthodologie adoptée. Cette section du mémoire sera divisée en deux parties. Une première partie où sera présenté le travail effectué pour l'évaluation de l'offre de services environnementaux. La seconde partie portera sur le travail effectué pour l'analyse de la demande de services environnementaux. Viendront ensuite la section des résultats, celle de l'analyse puis celle de la conclusion

6 Méthodologie

Le projet CPES intervient dans 6 bassins versants pilotes en France et en Angleterre. Pour mon stage j'ai été recruté comme chargé d'étude économique au sein de l'équipe qui a été mobilisée pour intervenir sur le cas du bassin de l'Yvel-Hyvet. L'équipe est composée notamment de scientifiques issus de disciplines diverses (sciences des sols, géosciences, écologie, économie), de représentants des collectivités territoriales (SMGBO), de coordonnateurs du projet. Tout au long du stage j'ai notamment collaboré avec Rémi Dupas et Antoine Casquin, chercheurs scientifiques spécialistes en science du sol. Leur concours a porté notamment sur les aspects agronomiques de cette étude.

L'étude menée au cours de ce stage s'inscrit dans la continuité du travail réalisé par Josselin Canlet, qui a été chargé d'étude au sein du projet CPES. Il a notamment travaillé à la préparation d'enquêtes. Il a également travaillé à la collecte et à un traitement préliminaire des données issues des enquêtes. L'analyse menée dans le cadre de cette étude est principalement basée sur le traitement des données collectées. Il faut également noter que dans le cadre de cette étude nous nous basons sur les résultats de travaux d'analyses économétriques réalisés par Carole Ropars - Collet, enseignant chercheur en économie, toujours à partir des données d'enquêtes.

Cette étude est menée afin d'apporter des éléments qui permettront de construire la gouvernance des PSE. Pour ce faire deux enquêtes ont été menées auprès des usagers du lac et des agriculteurs. Au niveau des agriculteurs les enquêtés ont dû choisir entre différents contrats de PSE fictifs qui diffèrent par des attributs techniques et des attributs de prix. Les usagers enquêtés ont dû choisir entre différents lacs fictifs qui diffèrent également par des attributs techniques et des attributs de prix. L'objectif de ces enquêtes était d'acquérir des informations qui permettraient de mesurer l'offre et la demande de services environnementaux. Concernant l'offre il a été question de mesurer les coûts de réduction des flux de phosphore (P) à travers la mise en place de différentes mesures. Concernant la demande l'objectif était d'acquérir des informations qui permettraient de mesurer le consentement à payer (CAP) des usagers pour une visite sur le lac, sachant que ce consentement à payer (CAP) varie selon les attributs du lac. Lorsqu'on parle d'attributs techniques au niveau des visites de lacs fictifs il s'agit ici de services

écosystémiques que procurent le lac et dont le niveau varie en fonction de l'état de pollution de ce dernier (il s'agit principalement d'activités récréatives). Ces informations serviront notamment à démontrer la pertinence du programme, à choisir de façon judicieuse quels instruments des PSE seront mobilisés : ciblage, différenciation du paiement. Les résultats de cette étude serviront également dans les négociations de contrats et pour finir elles permettront de justifier les méthodes qui vont être retenues pour la gestion et l'administration des PSE.

Pour la conception des contrats de PSE fictifs un ensemble de mesures a été retenu. La sélection des mesures qui seront mises en place via les contrats de PSE s'est faite au travers de nombreuses discussions impliquant des chercheurs de l'INRA, des agriculteurs et techniciens des chambres d'agriculture du Finistère, du Morbihan et de l'Ille-et-Vilaine et des représentants du Syndicat Mixte de Grand Bassin de l'Oust (SMGBO). L'expertise du SMGBO et sa connaissance du milieu a d'ailleurs été fortement mise à contribution. En effet certaines des mesures retenues ont été inspirées par des études qui avaient déjà été réalisées par le SMGBO.

Nous allons maintenant présenter les mesures qui ont été retenues pour la conception des PSE fictifs.

La suppression des apports minéraux

Des analyses effectuées au niveau des sols du bassin versant montrent que la majeure partie des sols est en excédent de phosphore (P). Il s'agit de la partie aval du bassin versant ainsi qu'une petite partie de l'amont. Recourir aux engrais minéraux contenant du phosphore (P) s'avère donc inutile. Ces engrais sont utilisés notamment sous la forme de STARTER, pour permettre aux plantes de se développer plus rapidement dans les premières périodes de leurs croissances (MOISAN et al. 2010, p. 55; AUSTRUY 2012, p. 114).

La mise en place de couvert végétal permanent

Également appelée semis sous couvert permanent cette mesure permet de lutter contre l'érosion des sols. Elle consiste à semer une culture sous un couvert déjà en place.

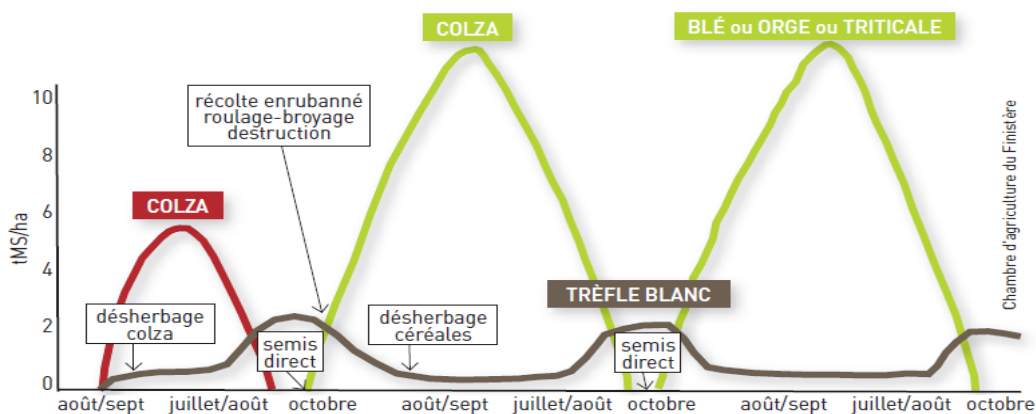


Figure 1 : Fonctionnement du semis direct sous couvert/ Chambre d'Agriculture du Finistère/2019

Bien que cette technique soit connue d'un grand nombre d'agriculteurs elle demeure très peu utilisée en effet sa mise en place requiert des compétences techniques spécifiques. Aussi elle présente des risques pour les cultures. Cette mesure peut s'avérer particulièrement néfaste pour

le rendement de certaines cultures notamment le maïs. A contrario elle s'avère plus compatible avec des cultures comme le colza ou le blé.

La mise en place de haies antiérosives

Bien positionnée sur les sols, cette mesure permet de limiter le ruissellement de l'eau ainsi que l'érosion des sols. L'orientation et la composition des haies sont déterminants dans leur capacité à réduire la quantité d'eau ruisselante (AUSTRUY 2012, p. 27). En effet pour avoir une efficacité maximale le linéaire de haies antiérosives doit être placé de façon perpendiculaire à la pente et être suffisamment large pour que le cours d'eau ne puisse pas facilement contourner le linéaire. Comme on peut l'imaginer les parcelles des exploitations agricoles étant concomitantes une mise en place efficace de cette mesure impliquera une coopération à l'échelle du territoire. La densité bocagère du bassin versant est actuellement de 69 mètres de haies /ha et seulement 30% de ce bocage ont un rôle antiérosif avéré (Gérard et al. 2011)

Nous allons maintenant présenter les résultats des travaux qui ont été menés et sur lesquels se base notre travail. Cette présentation se fera en deux parties : une première partie qui présentera brièvement les résultats d'enquêtes et une seconde partie qui présentera sans rentrer dans le détail les principaux résultats de analyses économétriques.

6.1 Présentation des enquêtes et principaux résultats de l'analyse économétrique

Les objectifs des enquêtes menées étaient de révéler :

- Les coûts des pratiques agricoles permettant de réduire les flux de phosphore (P) (enquête auprès des agriculteurs)
- Les bénéfices des usagers du lac : baigneurs, pêcheurs, pratiquants d'activités nautiques (enquête auprès des usagers)

La méthodologie retenue ici, pour révéler les coûts des pratiques agricoles ainsi que les bénéfices des usagers du lac est la méthode des expériences de choix. Cette méthode permet d'interroger des individus sur leurs préférences entre plusieurs biens (marchands ou non). La méthode des expériences de choix consiste à proposer aux enquêtés différents scénarios présentant chacun les mêmes attributs mais à des niveaux qui varient en fonction des scénarios. Ces attributs peuvent être des lieux, des produits, des services (Hanley et al. 2006, p. 2; Ropars-Collet et al. 2018, p. 6). Les données issues des expériences de choix sont traitées à l'aide de modèles à utilité aléatoire que nous décrirons plus loin. Rappelons que l'identification des attributs pertinents pour les expériences de choix s'est faite sur la base échanges entre les parties prenantes (par exemple sélection des mesures qui seront proposée dans les PSE pour les agriculteurs).

Enquête auprès des agriculteurs : Les agriculteurs enquêtés ont dû choisir entre plusieurs scénarios présentant chacun un niveau donné d'attributs techniques et de prix. Chaque scénario représente un hypothétique contrat de PSE. Les attributs et modalités d'attributs retenus pour les expériences de choix sont les suivants :

- La mise en place d'un couvert végétal sur : 20%, 40%, 60%, 80% de la SAU
- La mise en place de haies antiérosives selon des niveaux de densité de : 40m, 70m, 100m par parcelle de SAU
- La possibilité d'utilisation de fertilisants minéraux phosphatés selon les modalités : Autorisé et Interdit
- La durée d'engagement du contrat selon les modalités : 4 ans et 8 ans
- Le montant de la rémunération : 100€, 200€, 300€, 400€ par ha de SAU











| Choix 8 | PSE 1 | PSE 2 | Pas de PSE |
|---|--|--|--|
| Couvert végétal permanent (% de la SAU) | 80 %  | 60 %  | Je préfère conserver mes pratiques actuelles |
| Densité de haies antiérosives (m/ha de SAU) | 40 m  | 100 m  | |
| Fertilisation minérale phosphatée | Interdiction  | Autorisation  | |
| Durée d'engagement du contrat | 4 ans  | 4 ans  | |
| Prix rémunérateur à l'hectare de SAU | 100 €/ha  | 400 €/ha  | |
| Je choisis | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Figure 2 : Exemple de choix proposé aux agriculteurs enquêtés/Ropars Carole/2019

Il est important de noter qu'afin de permettre aux agriculteurs de pouvoir facilement estimer le coût des mesures et le rapporter à leurs situations respectives les PSE qui leurs ont été présentés sont rémunérés via des paiements systèmes. Cela veut donc dire que les paiements portent sur toute la SAU même si la mesure n'est mise en place que sur une partie de la SAU

Les enquêtes ont été menées par 6 enquêteurs en face-à-face dans les exploitations après prise de rendez-vous au téléphone. L'enquête a été menée sur la période allant de Juillet à Décembre 2018. Des enquêtes en ligne ont également été menées sur la période allant de Novembre 2018 à Janvier 2019. Au total 52 agriculteurs ont été enquêtés dont 4 en ligne.

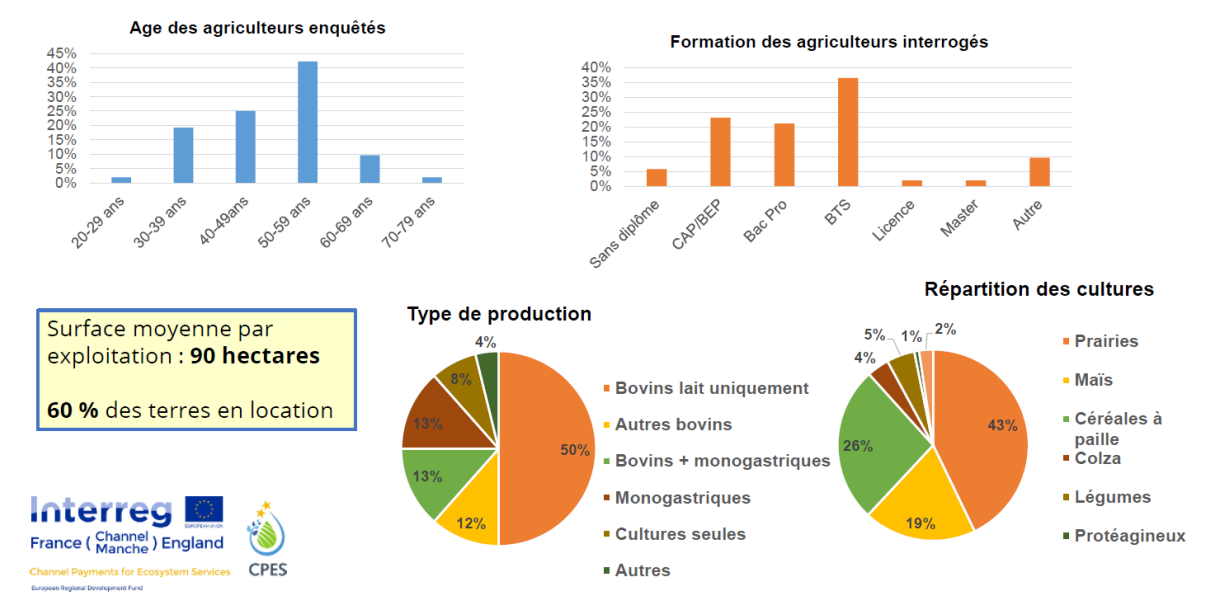


Figure 3 : Enquête agriculteurs caractéristiques de l'échantillon/ Ropars Carole / 2019

Enquête auprès des usagers : Le périmètre d'enquête a été défini sur un rayon de 30 km autour du Lac au Duc (zone d'attraction du lac). Les usagers enquêtés ont dû choisir entre plusieurs scénarios présentant chacun un niveau donné d'attributs. Chaque scénario représente un lac fictif. Les attributs et modalités d'attributs retenus pour les expériences de choix sont les suivants :

- Les activités récréatives praticables sur le lac :
 - La baignade, la consommation de poissons pêchés dans le lac et les activités nautiques sont autorisées
 - La baignade est interdite, la consommation de poissons pêchés dans le lac et les activités nautiques sont autorisées
 - La baignade et la consommation de poissons pêchés dans le lac sont interdites, les activités nautiques sont autorisées
 - La baignade, la consommation de poissons pêchés dans le lac et les activités nautiques sont interdites
- La présence d'installations touristiques autour du lac : importante, moyenne, faible
- La qualité écologique du lac : riche, moyenne, pauvre
- La présence d'un sentier aménagé : Oui, Non
- La distance entre les lacs fictifs et le domicile : entre les lacs fictifs et le domicile : 5km, 20km, 35km, 50km

L'enquête a été administrée par 15 enquêteurs sur la période allant de Septembre à Décembre 2018. Le plan d'échantillonnage s'est fait selon une stratification par genre et par âge. Au total 285 individus ont été enquêtés.

Il ressort de l'analyse préliminaire des résultats d'enquêtes que les l'âge des usagers enquêtés varie entre 16 et 88ans. Parmi les usagers enquêtés les CSP les plus répandus sont celles des retraités (25%) et des employés (25%).

Analyse économétrique : L'instrument économétrique qui permet de traiter des données issues des expériences de choix est le modèle à utilités aléatoires. En supposant un échantillon de N individus faisant face à J alternatives dans T ensembles de choix, l'utilité pour l'individu i ($i=1, \dots, N$) lorsqu'il choisit l'alternative j ($j=1, \dots, J$) dans l'ensemble de choix t ($t=1, \dots, T$) est définie par l'expression suivante :

$$U_{ijt} = V_{ijt} + \varepsilon_{ijt}$$

U_{ijt} est appelée fonction d'utilité indirecte, composée de V_{ijt} , la partie de l'utilité observable par l'analyste et ε_{ijt} la partie aléatoire de l'utilité non observable par l'analyste. Un individu i choisit l'alternative j parmi dans l'ensemble de choix t, si et seulement si celle-ci lui confère plus d'utilité que n'importe quelle autre alternative h de son espace de choix. Plusieurs spécifications du modèle sont ensuite possibles selon les hypothèses faites sur les parties aléatoires et observables du modèle. Le modèle Logit conditionnel est le modèle de base, dans lequel les variables explicatives dépendent uniquement des alternatives j. La partie observable de l'utilité indirecte est spécifiée comme une fonction linéaire des différents attributs :

$$U_{ijt} = V_{ijt} + \varepsilon_{ijt} = \beta' X_{jt} + \varepsilon_{ijt}$$

Où X_{jt} est le vecteur des variables explicatives (niveaux d'attributs de l'alternative j) et β est le vecteur de paramètres associés aux niveaux d'attributs. La partie observable de l'utilité est donc entièrement déterminée par les valeurs des paramètres β et des niveaux d'attributs, elle est donc déterministe.

La probabilité individuelle de choisir l'alternative j plutôt que n'importe quelle autre alternative h de l'espace de choix t est exprimée comme la probabilité que l'utilité indirecte U_{ijt} soit supérieure à n'importe quelle utilité U_{iht} :

$$p_{ij} = p(U_{ijt} \geq U_{iht}) \quad \forall j \neq h$$

$$p_{ijt} = p(V_{ijt} - V_{iht} \geq \varepsilon_{iht} - \varepsilon_{ijt}) \quad \forall j \neq h$$

En faisant l'hypothèse, pour la partie aléatoire, que les termes ε_{ij} sont indépendants et identiquement distribués selon une loi de valeurs extrêmes de type I, la probabilité individuelle de choisir l'alternative j dans l'ensemble de choix t s'écrit :

$$p_{ijt} = \frac{\exp(U_{ijt})}{\sum_{h=1}^J \exp(U_{iht})}$$

L'hypothèse que les aléas soient indépendants et identiquement distribués selon une loi de valeurs extrêmes de type I conduit à la propriété d'indépendance des alternatives non pertinentes (Independence from Irrelevant Alternatives ou IIA) dans le modèle conditionnel. Cette propriété signifie que le rapport des probabilités de choix de deux alternatives est indépendant de l'introduction ou de la suppression d'une alternative. Si les alternatives sont toutes très similaires ou au contraire toutes très différentes, alors cette propriété est pertinente. En revanche, si le degré de similarité entre les alternatives varie, cette propriété n'est alors pas vérifiée.

Les estimations du surplus des consommateurs relatifs à un changement de niveau d'un attribut peuvent être calculées grâce à la procédure détaillée par Adamowicz et al. (1994). La fonction d'utilité est généralement spécifiée sous une forme linéaire dans les attributs des alternatives :

$$V_{ijt} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_{1jt} + \dots + \beta_K \cdot X_{Kjt} + \beta_p \cdot X_{pjt}$$

Les β_k sont les paramètres associés à l'attribut k, et β_p celui associé à l'attribut prix. Le paramètre β_p s'interprète comme l'utilité marginale du revenu ou encore la désutilité marginale du paiement. Le paramètre de chacun des autres attributs s'interprète comme l'utilité marginale de l'attribut pour chaque individu. Ainsi, le consentement à payer (CAP) pour une modification marginale de l'attribut k s'exprime comme le rapport négatif du paramètre β_k de l'attribut k sur celui de l'attribut prix β_p :

$$CAP_k = - \frac{\beta_k}{\beta_p}$$

(Ropars-Collet et al. 2018, p. 6)

Synthèse des résultats d'analyses :

L'analyse de l'offre : Concernant l'offre il est important de souligner ici que les analyses économétriques ont révélé la présence de coûts fixes qui interviennent systématiquement à partir du moment où l'agriculteur s'engage dans la mise en place des mesures. Ces coûts fixes représentent les coût liés à l'adoption de la technologie aux coûts de transactions (Ducos et al. 2009; Espinosa-Goded et al. 2013). Il est également possible de faire varier le coût en fonction de certaines caractéristiques propres aux différents systèmes de production des agriculteurs. Compte tenu des informations dont nous disposons pour l'agrégation deux modèles ont été retenus :

Un premier modèle permet d'estimer les valeurs des paramètres de coûts de nos mesures sans qu'aucune distinction ne soit faite en fonction de caractéristiques propres aux exploitations

Tableau 1 Paramètres du modèle de coût (sans prise en compte de maïs)/ Ropars Carole/2019

| Postes de coûts | Modèle sans prise en compte de la présence de maïs |
|--|--|
| Coût fixe à l'hectare | 133 €/ha de SAU |
| Coût unitaire de la mise en place de couvert | 4,06 € / ha/par point % de SAU couverte |
| Coût unitaire de la mise en place de haies | 1,95 €/ha par mètre de haies antiérosives / ha |

Un second modèle plus fin nous permet d'estimer les paramètres de coûts de nos mesures en tenant compte de la présence ou non de culture de maïs dans la SAU. En effet lorsqu'il y a présence de maïs les coûts sont plus importants. Ceci démontre d'une aversion des producteurs de maïs vis-à-vis du couvert végétal permanent dû au fait que sous l'effet de la compétition le rendement des cultures de maïs peut être fortement diminué (THOMAS 2011, p. 8). Pour les producteurs de maïs la mise en place de couvert nécessite donc des compétences techniques spécifiques, ce qui représente un coût d'entrée ainsi qu'une perception du risque plus importante : les coûts de mise en place du couvert en présence du maïs sont donc plus élevés

Tableau 2 Paramètres du modèle de coût (prise en compte du maïs) /Ropars Carole/ 2019

| Postes de coûts | Modèle avec prise en compte de la présence de maïs | |
|--|--|--|
| | Si absence de maïs | Si présence de maïs |
| Coût fixe à l'hectare | 130 € / ha de SAU | 130 € / ha présence de SAU |
| Coût unitaire de la mise en place de couvert | 3,2 € / ha par point % de SAU couverte | (3,2 € + (0,054 € par point % de maïs) / ha) par point % de SAU couverte |
| Coût unitaire de la mise en place de haies | 1,1€/ha par mètre de haies antiérosives / ha | 1,1€/ha par mètre de haies antiérosives / ha |

Nous supposons que la suppression d'apport minéraux ne nécessite aucun investissement, il n'y a donc pas lieu de calculer un coût pour cette mesure.

Analyse de la demande : les traitements économiques ont révélé qu'en plus du niveau d'attributs offerts par le lac, le consentement à payer (CAP) des usagers varie en fonctions de groupe de CSP. Plus précisément on distingue un groupe d'actifs regroupant les personnes avec un emploi, un groupe d'inactifs regroupant les chômeurs et les étudiants et le groupe composé uniquement des retraités. La valeur monétaire d'une visite est estimée ici en utilisant la distance comme proxy. En fonction de la distance qui sépare les usagers du lac la visite est valorisée à travers le coût du carburant (0.10€/ km). Il en ressort que :

- Lorsque les sports nautiques sont autorisés sur le lac on a : un **CAP de 2,76€ pour les actifs et inactifs et un CAP de - 4,1€ (valeur négative) pour les retraités pour la pratique des sports nautiques.**

- Lorsque les sports nautiques et la pêche sont autorisés. J'obtiens alors un **CAP de 6,67€ pour les actifs et inactifs et un CAP de 1,48€ pour les retraités pour la pratique des sports nautiques et de la pêche.**

- Lorsque les sports nautiques, la pêche et la baignade sont autorisés. J'obtiens alors un **CAP de 13,41€ pour les actifs, un CAP de 23,07€ pour les inactifs et un CAP de 6,79€ pour les retraités pour la pratique des sports nautiques, de la pêche et de la baignade.**

La valeur d'une visite est donnée par rapport à une situation de référence. Ici la situation de référence est celle où toutes les activités sont interdites sur le lac (situation correspondant à un CAP égal à 0).

Nous avons donc les informations sur les coûts unitaires de mise en place des mesures et sur les bénéfices individuels des usagers en fonction de niveaux de dépollution du lac. Il faut maintenant réussir à faire le lien entre l'état du lac (niveau de dépollution) et l'efficacité des mesures. Pour y arriver il faut commencer par mesurer l'efficacité de nos mesures. Cela permettra de connaître le niveau de mesure qu'il faudra mettre en place pour atteindre ces différents objectifs de dépollution. Il nous faudra ensuite réussir à utiliser les informations dont nous disposons pour calculer le coût de nos mesures. Nous testerons différentes alternatives afin d'identifier les alternatives les moins coûteuses permettant d'atteindre chacun des objectifs de dépollution. Une deuxième partie du travail va consister à agréger le consentement à payer

des usagers afin de pouvoir estimer la demande globale selon les objectifs de dépollution atteints. Cela permettra de savoir comment se situe la demande par rapport au coût.

6.2 Evaluation de l'offre

Nous voulons évaluer l'efficacité et les coûts de mise en place des mesures agricoles (suppression d'apports minéraux phosphatés, interdiction de couvert végétal et haies antiérosives)

6.2.1 Analyse de l'efficacité

L'objectif ici est de pouvoir mesurer l'impact des différentes mesures agricoles sur la réduction des flux de phosphore à l'échelle du bassin versant.

Pour la réalisation de ce travail j'utilise notamment les données issues du Registre Parcellaire Graphique (RPG) ainsi que des données issues de source annexes, notamment le Référentiel Régional Pédologique (RRP). Nous travaillons avec les logiciels QGIS et Excel. Nous travaillons notamment avec le Modèle APLE qui est un outil de modélisation conçu sur Excel.

Le modèle APLE

Pour évaluer l'efficacité de la mise en place de couvert végétal permanent et celle de la suppression d'apport minéraux nous utilisons le modèle APLE. APLE veut dire Annual Lost Phosphorus Estimator. Comme son nom l'indique il s'agit d'un outil qui permet de quantifier sur un pas de temps annuel les transferts de phosphore (P) provenant de trois sources : les phosphore (P) contenu dans le sol, les apports de fertilisants organiques et minéraux. En effet avec cet outil on peut simuler les pertes annuelles de phosphore (P) sous formes particulaires et dissoutes par transfert de surface. Concernant les apports organiques, le modèle APLE permet de distinguer ceux issus d'effluents épandus et ceux issus des excréments déposés par les animaux durant le pâturage (VADAS 2017, p. 6).

Pour faire tourner le modèle il faut renseigner différents paramètres à savoir :

- Données sur le sol : il s'agit de renseigner la profondeur des sols avec la possibilité de prendre en compte les 2 premiers horizons. Il faut ensuite renseigner la quantité de phosphore (P) disponible pour la plante et le sol (à l'aide du test de meilich-3), les teneurs en argile, et en matière organique
- La surface de la parcelle (ici nous voulons estimer des émissions à l'hectare, nous ne renseignons donc pas les mesures de surfaces des parcelles)
- Les précipitations annuelles, ruissellements, niveaux d'érosion
- Le prélèvement annuel (dépend des espèces de cultures présentes)
- Si pâturage il y a : le nombre d'animaux jours
- Les quantités d'effluents organiques apportés : leurs teneurs en matières sèches, en pentoxyde de phosphore (P), en pourcentage de phosphore extractible à l'eau ainsi que leur profondeur d'enfouissement
- La quantité d'engrais minéral phosphaté apportée ainsi que sa profondeur d'enfouissement

A partir de ces informations qui comme on peut le voir dépendent des caractéristiques du milieu et des systèmes de production adoptés, le modèle va simuler des pertes de phosphore en se

basant sur un ensemble d'équations prés-établis. Bien qu'il existe d'autres modèles de simulations permettant d'évaluer les pertes de phosphore (EPIC, SurPhos, SWAT) nous avons, après discussions avec les spécialistes en sciences du sol, retenus ce modèle pour sa facilité d'utilisation. Aussi il nous fallait un modèle nous fournisse des données quantitatives, qui soient statiques ou sur un pas de temps annuel, qui permettent de modéliser différents types de sols et qui nous permettent de modéliser différents niveaux d'attributs techniques pertinents au vu de notre étude (DUPAS 2014, p. 21; Fiorellino et al. 2017, p. 2).

L'objectif est donc de se servir du modèle APLE pour modéliser les pertes de phosphore depuis les parcelles agricoles du bassin versant en tenant de leurs caractéristiques pédologiques et des assolements. Bien que le modèle de simulation permette en plus des assolements de renseigner la présence d'activités d'élevage nous n'avons pas pu renseigner ce paramètre. En effet ne disposant pas d'informations sur la spatialisation des activités d'élevages il nous est impossible d'identifier les parcelles du bassin versant sur lesquelles sont pratiquées des activités d'élevage. Avant la modélisation un travail de simplification a été effectué. En effet dans le bassin versant on dénombre 9942 parcelles. Il aurait été contre-productif de faire tourner le modèle pour chacune des parcelles. Il a donc fallu les catégoriser.

Pour nos simulations nous avons utilisé les données du RPG sur une période allant de 2013 à 2017. Cela a permis de prendre en compte les rotations de cultures représentatives des systèmes de production. En fonction des assolements identifiés les parcelles ont été réparties en 4 classes :

- 2 classes de rotations de cultures pour les parcelles arables
 - Les rotations « mixte » : avec une alternance entre cultures d'hiver représentées par la culture de « blé » et cultures d'été représentées par la culture de maïs
 - Les rotations « blé » : représentatives des cultures d'hiver

Les rotations « mixte » sont identifiées en retenant les parcelles au niveau des quelles la culture maïs a été observée plus de trois fois pendant la période retenue pour l'analyse des rotations (2013 à 2017). Les rotations « blé » sont identifiées en retenant les parcelles au niveau des quelles la culture maïs a été observée moins de trois fois pendant la période retenue pour l'analyse des rotations.

- 1 classe « prairies » pour les parcelles en prairies
- 1 classe « autres » pour les parcelles avec des rotations non identifiées (elles représentent environ 2% de la SAU du bassin versant)

Ensuite la base de données a été croisée avec d'autres sources annexes notamment le Référentiel Régional Pédologique (RPP). Ces croisements ont permis d'obtenir des informations sur la profondeur des sols et sur les niveaux d'érosion. A ce niveau également un travail de simplification a été effectué :

Concernant la profondeur des sols, 2 classes de profondeurs ont été formées la première comprenant les parcelles avec une profondeur inférieure à 70 cm et la seconde classe, les parcelles avec une profondeur supérieure à 70 cm. Le mode de chaque classe a été retenu comme valeur représentative : on a donc 2 classes nommées « 1 » et « 2 » avec des profondeurs de sol respectives de 60 cm et 1 m.

Concernant le niveau d'érosion les parcelles du bassin versant ont été réparties en 4 classes. Chaque classe a été représentée par sa valeur médiane. Après conversion des données d'érosion

en T / ha on obtient : 4 classes d'érosions nommées « 1 », « 2 », « 3 » et « 4 » avec des niveaux d'érosions médians respectifs de 0.25, 0.48, 0.72 et 0.84 t/ha.

En croisant toute ces informations on obtient un profil de parcelle qui varie en fonction de l'assolement (4 classes), de la profondeur des sols (2 classes) et du niveau d'érosion (4 classes).

Il faut noter que seules les parcelles arables donc celles réparties dans les deux classes de rotations ont été renseignées dans le modèle. En effet en principe les mesures agricoles qu'on cherche à évaluer ne devraient être mis en place qu'au niveau des parcelles arables (nous verrons plus tard que certains de nos scénarios dérogent à cette règle). Des valeurs d'exportations fixes de phosphore (P) ont été retenues pour les parcelles des classes « prairies ». Concernant les parcelles autres des valeurs ont été fixées sur la base de recommandation de spécialistes en sciences du sol (DUPAS R. & CASQUIN A.).

On obtient en 25 profils : 16 profils regroupant les parcelles arables, 8 profils pour les parcelles classées « autres » et 1 profil pour les parcelles classées « prairies ». Chaque profil sera identifié par un code constitué d'une chaîne de caractères composée de la classe d'assolement, la classe de profondeur et la classe d'érosion. Par exemple le code « mixte13 » désignera une parcelle arable avec rotation mixte, une profondeur de sol de 60cm et un niveau d'érosion élevé (0.72 t/ha)

On obtient une base de données SIG présentant en lignes les parcelles agricoles représentées par leurs identifiants et en colonne différentes caractéristiques des parcelles dont le code permettant d'identifier le profil de la parcelle.

Les paramètres à renseigner pour nos simulations ont fait l'objet de discussions entre les spécialistes en sciences du sol. Nous ne rentrerons pas ici dans le détail (un tableau récapitulatif des paramètres renseignés est présenté en annexe 1)

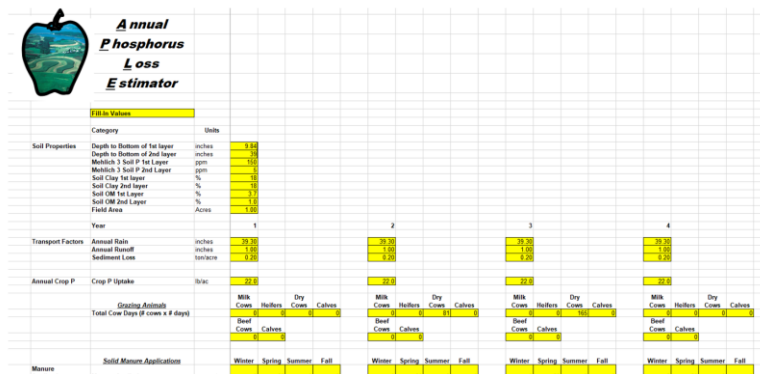


Figure 4 : Interface du modèle APLE/ Houenou M./2019

Pour modéliser la suppression d'apports minéraux il suffit de renseigner une valeur nulle dans le modèle. La modélisation de la mise en place du couvert, se fait en modifiant le paramètre d'érosion. :

Il ressort de discussions avec les spécialistes que l'un des indicateurs permettant d'évaluer l'impact des systèmes de production sur le niveau d'érosion des sols est le C factor. La formule du C factor est la suivante : $C\ factor = C\ crop * C\ management$. Le C crop dépend des cultures.

Il varie donc dans l'espace puisque les cultures sont différentes d'une parcelle à l'autre. Le C management en revanche est constant pour toute la Bretagne (0.289). La valeur la plus basse que peut prendre ce coefficient est 0.058. En considérant qu'en l'absence de mesure on a un C management égal à 0.289 et qu'après mise en place du couvert et suppression d'apports de minéraux phosphatés le C management passe à 0.058 on pourrait calculer l'impact du changement de pratique sur le niveau d'érosion en multipliant la valeur d'érosion par le coefficient (0.058/0.289) soit une division par 5 : Il a donc été retenu de modéliser la mise en place de couvert et suppression d'apports minéraux en divisant la valeur d'érosion par 5 (DUPAS 2019, p. 8).

Les 16 profils de parcelles arables seront renseignés avant et après mis en place du couvert végétal et suppression des apports minéraux. Les simulations des parcelles « ble » ont été effectuées en renseignant dans le modèle APLE, chaque année la culture de blé sur 50 ans. Les simulations des parcelles « mixte » ont été effectuées en faisant alterner chaque année la culture de blé et celle du maïs sur 50 ans. 32 simulations ont donc été réalisées. Le modèle permet d'obtenir des émissions de phosphore en kg/ha chaque année sur 50 ans (1994 à 2043). La figure suivante est présentée à titre illustratif et montre des résultats de simulations sur période de 10 ans

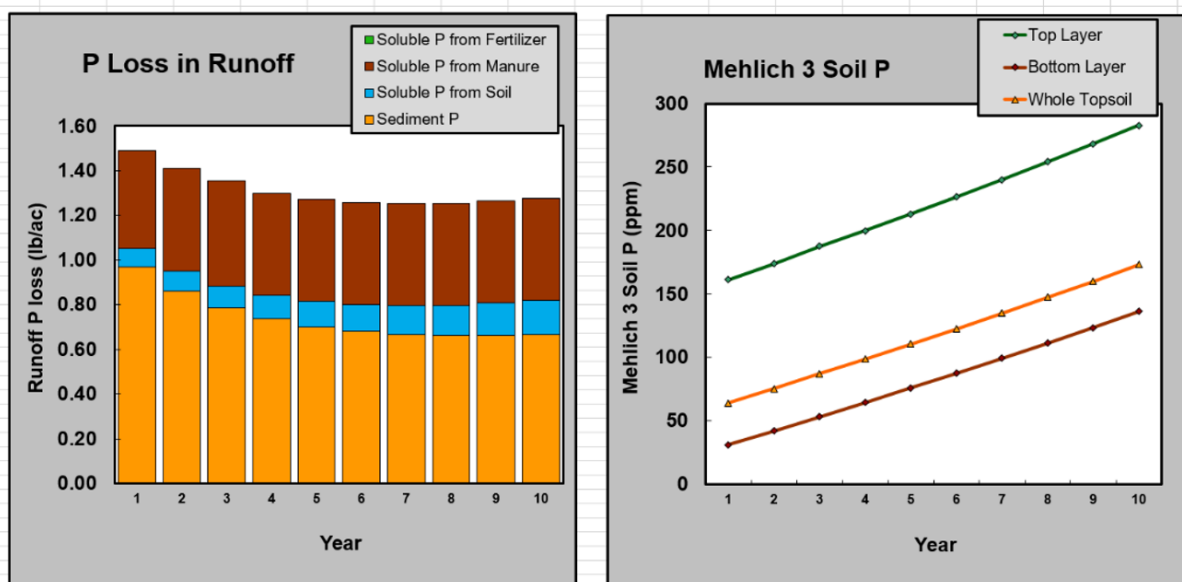


Figure 5 : Sorties du modèle APLE/ Houenou M./ 2019

Nous avons décidé de retenir pour chaque profil de parcelle renseigné les émissions moyennes sur les 30 dernières années, après stabilisation de la courbe. Nous avons ensuite calculé une valeur moyenne à partir des données retenues : on obtient donc pour chaque profil de parcelle une émission moyenne de phosphore en kg /ha avant et après mise en place du couvert et suppression des apports minéraux. Il est important de préciser que ce qui nous intéresse ici ce ne sont pas les valeurs absolues mais plutôt les coefficients de réduction (coefficient d'abattement).

Nous avons ensuite calculé une moyenne d'émission des tous les profils de parcelles que nous avons pondérés par la part de la SAU totale du bassin versant que représente chacun des profils

de parcelles. Cette moyenne pondérée représentant l'émission moyenne de phosphore de tout le bassin versant a été calculée avant et après mise en place des mesures.

Grâce au modèle APLE nous sommes donc en mesure d'évaluer l'efficacité du couvert et de la suppression d'apports minéraux. Reste maintenant à pouvoir évaluer l'efficacité des haies antiérosives.

6.2.2 Hypothèses sur l'efficacité des Haies antiérosives

Concernant la question des haies l'hypothèse suivante a été émise : 100m haie permet de couvrir la totalité du côté d'une parcelle (1ha soit 100m sur 100m). Cependant même si la haie est bien placée (perpendiculairement à la pente) si elle n'est pas assez large son efficacité est réduite puis qu'elle pourra être contournée par les affluents. On ne peut donc pas lui attribuer une efficacité à 100%. Il ne faudrait pas non plus donner un avantage aux haies par rapport au couvert. En supposant qu'avec 200m bien réparti sur les côtés d'une parcelle on arrive complètement bloquer le flux (soit une efficacité de 100%), en formant un genre de réservoir on pourrait supposer une efficacité de 50% pour 100m de haie antiérosive. N'oublions pas que ce qui nous intéresse c'est le coefficient de réduction des flux de phosphore.

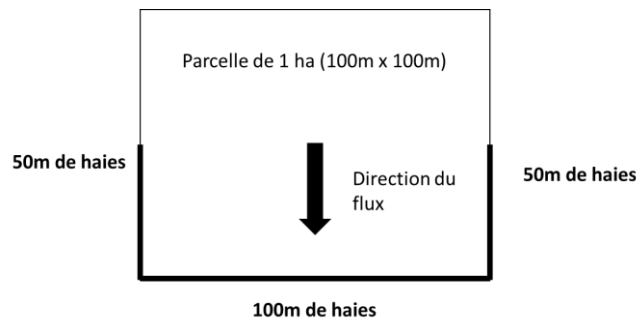


Figure 6 Hypothèse sur l'efficacité des haies/Houenou M./2019

En considérant le niveau d'émission de phosphore (P) avant mise en place de couvert et suppression d'apport de minéraux P_1 et le niveau d'émission de phosphore (P) après mise en place de couvert et suppression d'apports minéraux P_2 on est en mesure de déterminer le coefficient d'abattement de ces deux mesures (P_1/P_2). Après mise en place de ces deux mesures si on prend le niveau d'émission de phosphore final P_2 et qu'on lui applique le coefficient d'abattement des haies on obtient un niveau d'émission de phosphore (P) final P_3 : ($P_3 = P_2 * \text{coefficient d'abattement des haies}$, fonction de la longueur du linéaire de haie) alors on pourrait déterminer le coefficient d'abattement après mise en place des trois mesures : P_1/P_3 (tableau de classification en annexe2).

Nous sommes donc en mesure d'évaluer l'efficacité des trois mesures permettant de réduire la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant. Nous sommes également en mesure de calculer le coût de mise en place de nos mesures. Il nous faut maintenant un outil de simulation qui nous permette de combiner nos mesures afin de pouvoir identifier les scénarios qui nous permettront d'atteindre nos objectifs de dépollution (coefficient d'abattement).

6.2.3 Outil de simulation des combinaisons de mesures

Nous avons construit sur Excel un outil de simulation qui nous permet de faire varier nos combinaisons de mesures. L'objectif est de pouvoir choisir les parcelles sur lesquelles on veut

mettre en place nos mesures, de pouvoir tester différentes combinaisons de mesures et de pouvoir évaluer à chaque fois l'efficacité de la combinaison de mesures choisies. Comme on a pu le voir nous disposons d'un tableau présentant en lignes les profils de parcelles agricoles et en colonnes les émissions de phosphore avant et après mise en place de couvert et suppression d'apport minéraux (P₁ et P₂). On a également vu qu'on est capables d'évaluer l'impact de la mise en place des trois mesures sur l'émission de phosphore (P) : P₁/P₃. Il nous est donc possible de choisir sur quels types de parcelles (profils) on veut mettre en place une ou plusieurs mesures. Dans ce cas pour déterminer l'émission de phosphore (P) finale à l'échelle du bassin versant (P_{final}) il nous suffit donc de calculer la moyenne pondérée en considérant l'émission de P après mesures (P₂ ou P₃ selon qu'on combine avec les haies ou non) pour les parcelles impliquées dans la mesure et l'émission de P avant mesure (P₁) pour les parcelles que l'on ne souhaite pas engager dans la (les) mesure (s) :

Soit P_{xi}, P_{zi}, SAU_{xi} et SAU_{zi} respectivement les émissions moyennes de phosphore (P) des profils de parcelles non impliquées, les émissions de phosphore (P) des parcelles impliquées, les SAU des parcelles non impliquées et les SAU des parcelles impliquées (avec i représentant un profil de parcelles agricole)

$$P_{final} = \sum(P_{xi} \times \%SAU_{xi}) + \sum(P_{zi} \times \%SAU_{zi})$$

Sur la base de ce principe nous avons pu construire un outil de simulation qui permet d'évaluer l'efficacité de différentes combinaisons de nos mesures (scénarios). Le niveau de concentration de phosphore (P) pondéré par le débit actuel à l'exutoire du bassin est de 100 µg/l. En appliquant à cette valeur le coefficient d'abattement d'une combinaison donnée de mesures on est en mesure de mesurer l'impact de la mise en place de cette combinaison de mesures sur la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant

| | | | | | | |
|----|--|------------------------------|--|--------------------------------|--|------------|
| 54 | Mise en place de couvert | | | Mise en place de Haie | | |
| 55 | | | | | | |
| 56 | Emission_Partie couverte | Emission_Partie non_couverte | | Linéaire (m) | | Efficacité |
| 57 | 0,49 | 0,131304831 | | 100 | | 50,00% |
| 58 | | | | 37 | | 18,5% |
| 59 | Flux initial | Flux résiduel | | Flux résiduel final_KGP_Ha | | |
| 60 | 1,71 | 0,62 | | 0,531452449 | | |
| 61 | | | | | | |
| 62 | | | | | | |
| 63 | Coefficient de division du flux | Coefficient d'abattement (%) | | Coefficient de division finale | | |
| 64 | 2,747774896 | 63,60691694 | | 3,217399773 | | |
| 65 | | | | | | |
| 66 | Parcelles concernées: Toutes les parcelles agricoles | | | | | |
| 67 | Concentration résiduelle de P (µg/L) | 31,08099927 | | | | |
| 68 | | | | | | |

Figure 7 : Outil de simulation des combinaisons de mesures agricoles/ Houenou M./2019

Maintenant que nous connaissons les combinaisons de mesures qu'il faudra mettre en place pour atteindre les objectifs de dépollution il nous faudra tester différentes combinaisons afin d'identifier la meilleure alternative.

Plusieurs hypothèses vont nous guider dans la construction de nos scénarii :

Comme on a pu le voir l'efficacité de nos mesures varie en fonction des types de parcelles (profils). On a donc des parcelles plus efficaces que d'autres. Pour atteindre un niveau de dépollution maximal au moindre coût il faudra commencer par engager les parcelles les plus

efficaces. Nous avons donc ordonné les profils de parcelles des plus efficaces au moins efficaces. Pour ce faire nous avons calculé pour chaque profil de parcelles la différence d'émission de phosphore avant et après mise en place de couvert et suppression d'apport minéraux ($P_1 - P_2$). Nous avons ensuite ordonné ces parcelles dans un ordre décroissant suivant cette différence : on obtient alors un classement des profils de parcelles agricoles du bassin versant par ordre d'efficacité. L'efficacité des haies ne variant pas l'intégrer dans le calcul n'aurait aucun impact sur l'ordre des profils de parcelles.

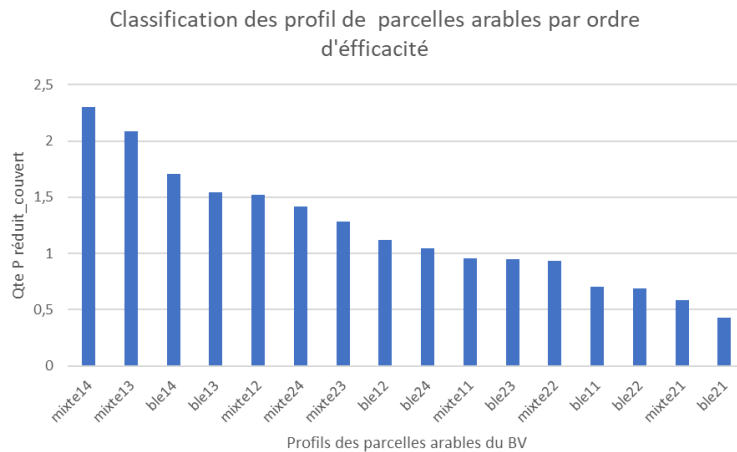


Figure 8 : Classification des profils de parcelles par ordre d'efficacité/ Houenou M./2019

On a vu dans la littérature que les auteurs recommande de cibler les paiements des PSE non seulement en fonction de l'efficacité des parcelles mais également en fonction du coût du changement de pratique (WUNDER et al. 2018). Nous avons donc recherché à intégrer le coût de nos mesures dans le classement des parcelles.

A ce niveau une difficulté s'est posé à nous : Comme nous avons pu le voir dans le cadre de nos PSE les rémunérations sont faites par des paiements systèmes cela veut dire que le coût de la mesure (qui ici correspond au consentement à recevoir et donc correspond à la rémunération du producteur pour le changement de pratique) est fonction de la SAU totale de l'exploitation.

D'où la difficulté de pouvoir calculer un coût pour chaque profil de parcelles agricoles. Rappelons que pour une additionnalité maximum la littérature recommande que les paiements soient ciblés et différenciés afin que les contrats s'ajustent en fonction des efforts des participants (Ducos et al. 2009; Espinosa-Goded et al. 2013; DUVAL et al. 2016b; Börner et al. 2017; PAJOT and KLERCH 2019).

Il nous faut donc pouvoir prendre en compte dans notre classement non seulement le coût mais également les différences de coûts liées aux différences entre les systèmes de production. Nous avons donc utilisé pour le calcul des coûts les paramètres du modèle qui permet de prendre en compte la présence de maïs sur les parcelles (se référer au tableau 2).

Pour le calcul des coûts ou paiements qui rappelons le sont des paiements système il nous aurait fallu dans l'idéal regrouper les parcelles selon leurs appartenances aux différentes exploitations et donc calculer les coûts en tenant compte des SAU totales des différentes exploitations. En

procédant ainsi nous n'aurions pas pu les regrouper selon leurs profils respectifs et n'aurions pas pu les classer.

Une première hypothèse a été de considérer que toute la SAU du bassin versant représente une seule exploitation. Avec cette hypothèse nous pouvons calculer le coût du couvert en considérant que le point % représente la part de la SAU impliquée dans les mesures par rapport à la SAU total du bassin versant. Le problème avec cette hypothèse est qu'elle ne nous permet pas de calculer des coûts unitaires. En effet nous avons besoin de coûts unitaires pour classer nos profils de parcelles agricoles pourtant la formule dont nous disposons dépend de l'ensemble des parcelles impliquée et donc implique qu'il y ait déjà un ordre.

Nous avons donc décidé de répartir les parcelles arables de notre bassin versant en 2 exploitations : une exploitation constituée uniquement de parcelles en rotation « ble » et une seconde exploitation constituée uniquement de parcelles en rotation « mixte ». L'avantage de cette hypothèse est qu'elle nous permet de facilement calculer des coûts unitaires. Il est important de rappeler ici que pour renseigner les parcelles « mixtes » dans le modèle APLE nous avons fait alterner chaque année la culture de blé et celle du maïs sur 50 ans. On peut donc considérer que le maïs représente 50 % de la SAU des parcelles « mixte ». Les formules des coûts unitaires de mise en place du couvert et de haies selon cette dernière hypothèse sont les suivantes :

Parcelle « mixte » : $130 \text{ €/ha} + (3.2 + (0.054 * 50)) \text{ €} * 100 / \text{ha} + 1.1 \text{ €/ha}$ par mètre de haie / ha = $750 \text{ €/ha} + 1.1 \text{ €/ha}$ /mètre de haies /ha +

Parcelle « ble » : $130 \text{ €/ha} + (3.2 * 100) \text{ €} / \text{ha} + 1.1 \text{ €/ha}$ par mètre de haie / ha = $450 \text{ €} / \text{ha} + 1.1 \text{ €/ha}$ /mètre de haie /ha

Lorsqu'on met en place dans le bassin versant une mesure qui implique à la fois les parcelles « mixte » et les parcelles « arables » on considère donc pour le calcul des coûts que nous avons deux exploitations : une première exploitation composée des parcelles « mixtes » impliquées dans la mesure et une seconde exploitation composée uniquement des parcelles « ble » impliquées.

Nous avons donc pu calculer pour chaque profil de parcelle un indicateur de coût-efficacité : $P_{zi} / \text{coût unitaire}$. P_{zi} représente l'émission de phosphore finale après mise en place de la mesure et comme on peut le voir le coût unitaire prend en compte le couvert et les haies. Ce coût unitaire varie en fonction du linéaire de haies retenu et donc selon le linéaire de haies le classement des parcelles par ordre de coût efficacité change (ce paramètre sera pris en compte dans les calculs de coûts).

Nous sommes donc en mesure d'ordonner nos profils de parcelle suivant un indicateur de coût-efficacité

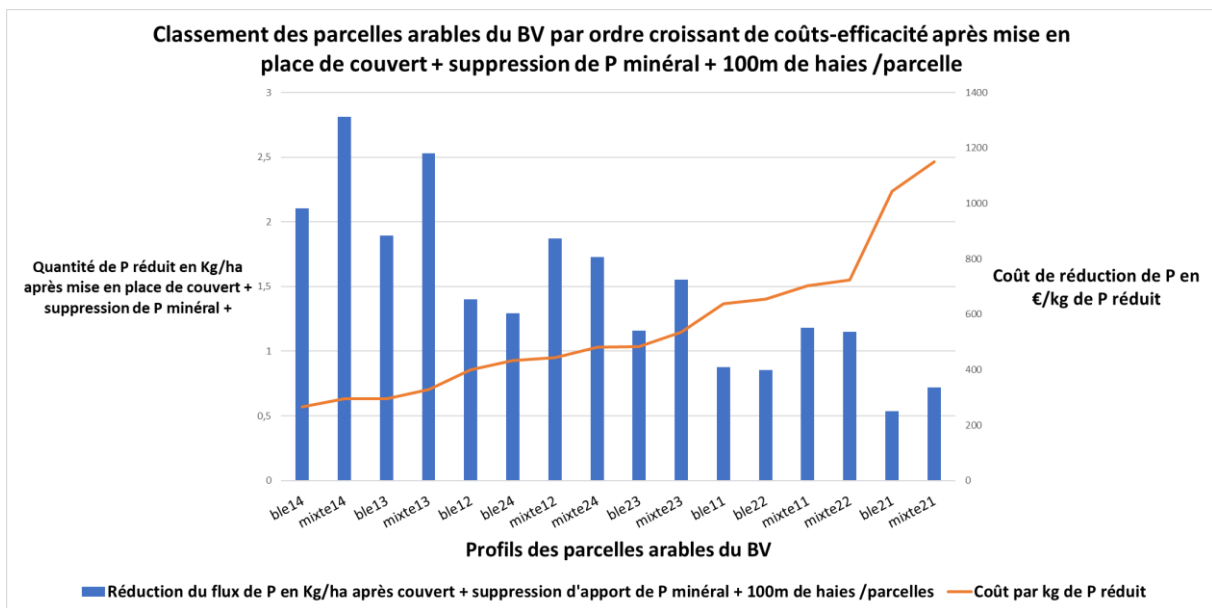


Figure 9 : Classification des profils de parcelles agricoles par ordre de coût-efficacité avec 100m de Haies/ha / Houenou M./ 2019

Ce que nous voulons démontrer dans nos scénarios c'est qu'il y a un gain lorsqu'on cible et qu'on différencie les paiements de nos mesures. Nous sommes maintenant en mesure d'identifier les alternatives les moins coûteuses permettant d'atteindre chacun des objectifs de dépollution. Une deuxième partie du travail va consister à agréger le consentement à payer des usagers afin de pouvoir estimer la demande globale selon les objectifs de dépollution atteints. Cela permettra de savoir comment se situe la demande par rapport au coût. A l'aide du logiciel de cartographie QGIS chaque scénario sera illustré par une carte montrant les parcelles impliquées dans nos combinaisons de mesures. Nous retenons pour nos scénarios des objectifs de division par 2, 3 et 5 de la concentration de P à l'exutoire du bassin versant.

6.3 Evaluation de la demande

L'objectif spécifique ici est de réussir à agréger les consentements à payer des usagers en essayant de tenir compte le plus possible de leurs caractéristiques (celles qui ont un impact sur le consentement à payer) ainsi que des niveaux d'attributs que l'on retrouve au niveau du lac.

Grâce aux travail réalisé par Carole Ropars – Collet nous disposons d'informations sur les consentements à payer individuels des usagers du lac. Nous avons vu que ce consentement à payer varie en fonction des groupes de CSP : « actifs », « inactif » et « retraité ». Ce consentement à payer (CAP) varie également selon qu'on puisse pratiquer sur le lac toutes ou certaines des activités récréatives : la baignade, la pêche et les activités nautiques.

Il faudrait maintenant pouvoir estimer le nombre annuel moyen de visites de chaque usager du lac afin de pouvoir agréger les valeurs de visites respectives

6.3.1 Estimation du nombre de visite

L'objectif ici est de pouvoir estimer le nombre de visites des usagers du lac afin de pouvoir agréger les Consentements à payer par visite. Pour y parvenir il a d'abord fallu décider à quelle échelle nous voulions agréger les consentements à payer (CAP) individuels des usagers du lac. Nous avons décidé d'agréger nos consentements à payer sur l'ensembles de communes contenues ou chevauchant la zone d'attraction du lac, estimée à 30 km autour du lac

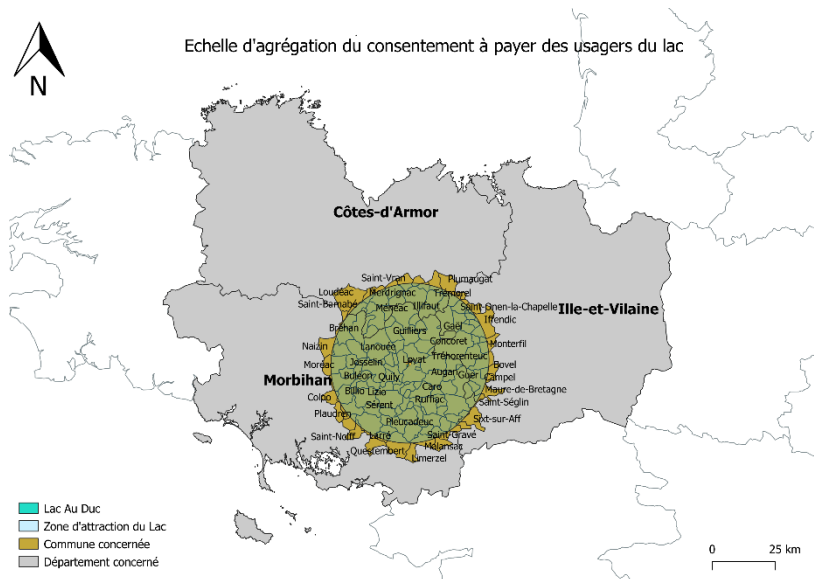


Figure 10 : Echelle d'agrégation du consentement à payer des usagers du Lac Au Duc/ Houenou M./ 2019

. Au total sont retenues pour l'agrégation 139 communes, avec une population totale de 183 055 personne adultes (INSEE 2018). A cette étape connaître l'échelle d'agrégation nous permet uniquement d'avoir des informations sur les distances qui séparent les usagers du lac selon leurs communes de provenance : à l'aide d'un algorithme du logiciel QGIS nous avons pu calculer la distance qui sépare le lac du centroïde des communes retenues dans le cas notre étude. Nous avons ensuite renseigné les distances qui séparent les usagers enquêtés du lac.

Description de la base : La base qui a servi pour les estimations est tirée de la base de données contenant les résultats de l'enquête auprès des usagers. Pour l'évaluation des bénéfices de nos mesures il a été convenu de ne retenir que les usagers issus des communes chevauchant la zone d'attraction du lac. Cela nous fait passer d'un échantillon de 285 individus enquêtés à un échantillon de 243 individus retenus pour l'analyse.

La nouvelle base qui a servi pour nos estimations présente donc en ligne 243 individus représentés par des numéros d'identification. En colonnes nous avons les modalités des variables qui ont été retenues comme ayant un impact sur le nombre de visite :

- **Le groupe de CSP** : comme nous l'avons expliqué les CSP des enquêtés ont été regroupés en « actifs », « inactifs » et « retraités ». Une variable csp2 a été construite en codant respectivement par les valeurs « 1 », « 2 » et « 3 » les modalités des individus appartenant aux groupes des inactifs, des actifs et des retraités

- **La distance** : il s'agit de la distance entre chacune des communes de provenance des usagers enquêtés et le lac. Ici nous considérons la distance à vol d'oiseau comme proxy de la distance à parcourir via les réseaux routiers pour se rendre sur le lac.
- **Le nombre de visite** : L'une des questions de l'enquête réalisée auprès des usagers consistait à savoir à quelles fréquences ils se rendaient sur le lac. Les modalités de réponses à cette question sont :
 - Plusieurs fois par semaine
 - Plusieurs fois par mois
 - Plusieurs fois par An
 - Jamais

Nous avons fait l'hypothèse que :

- Quelqu'un qui déclare se rendre sur le lac plusieurs fois par semaines s'y rendrait au moins une fois par semaine ce qui ferait par an environs 52 visites
 - Quelqu'un qui déclare se rendre sur le lac plusieurs fois par mois s'y rendrait au moins 2 fois par mois ce qui ferait par an environs 24 visites
 - Quelqu'un qui déclare se rendre sur le lac plusieurs fois par an s'y rendrait au moins une fois tous les 2 mois ce qui ferait par an environs 6 visites
 - Quelqu'un qui déclare ne jamais se rendre sur le lac ferait 0 visites par an
- **La distance des communes à la mer** : la mer pourrait représenter un substitut du lac pour les usagers, notamment ceux dont les communes sont les plus proches du littoral. La distance de la commune à la mer pourrait donc également impacter sur le nombre de visite. Nous avons alors décidé d'intégrer cette variable dans le modèle. Pour ce faire nous avons calculé à l'aide du logiciel QGIS la distance à la mer pour chacune des communes des usagers enquêtés. Ici également nous considérons la distance à vol d'oiseau comme proxy de la distance à parcourir via les réseaux routiers pour se rendre sur le lac

Sur la base de ces hypothèses nous avons pu construire la variable « nbre_visite » qui correspond au nombre de visite annuel d'un usager : Les modalités de cette variable ont été déterminées en codant respectivement les modalités de réponses « Plusieurs fois par semaine », « Plusieurs fois par mois », « Plusieurs fois par An » et « Jamais » par les valeurs « 52 », « 24 », « 6 » et « 0 ». Nous cherchons à estimer l'effet des caractéristiques de nos usagers sur les nombres de visites annuels respectifs. Nous avons donc essayé d'expliquer à l'aide d'un model logit le nombre de visite à partir des variables de distances (communes au lac, communes à la mer) en croisant ces variables avec les groupes de CSP des usagers). Les résultats de la régression sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3 Sortie Modèle Logit 1 / Houenou M./ 2019

| Variables | Coefficient | Significativité P> t |
|----------------------------------|-------------|----------------------|
| Distance Lac commune # inactifs | -0,47 | 0,114 |
| Distance Lac commune # actifs | -0,44 | 0,001 |
| Distance Lac commune # retraités | -0,82 | 0 |
| Distance Mer commune # inactifs | 0,14 | 0,343 |
| Distance Mer commune # actifs | 0,02 | 0,826 |
| Distance Mer commune # retraités | 0,15 | 0,229 |
| Constante | 20 | 0 |

Comme on peut le constater aucune modalité n'est omise (modalité de référence). Ceci s'explique par le fait qu'en croisant les modalités de la variable « csp2 » avec la variable « distance_mer » il ne peut plus y avoir de colinéarité entre les modalités de la variable « csp2 ».

Le pouvoir explicatif du modèle est faible. Ceci est dû au fait que, bien que l'enquête menée nous ai permis d'avoir beaucoup d'informations qui pourraient expliquer le nombre de visite nous ne pouvons tenir compte que des variables (de l'enquête) que nous pouvons renseigner à l'échelle agrégée. Aussi nous pouvons voir que la variable « distance_mer » n'est pas significative qu'elle que soit le groupe de CSP avec lequel elle est croisée, il en de même pour la variable « distance_km » lorsqu'elle est croisée avec la modalité 1 (Inactif). Nous avons donc décidé de faire tourner le modèle en n'incluant cette fois que la variable distance de la commune au lac « distance_km ». Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 4 Sortie Modèle logit 2 / Houenou M. / 2019

| Variables | Coefficient | significativité P> t |
|----------------------------------|-------------|----------------------|
| Distance Lac commune # inactifs | -0,34 | 0,082 |
| Distance Lac commune # actifs | -0,54 | 0 |
| Distance Lac commune # retraités | -0,68 | 0 |
| Constante | 23 | 0 |

Le pouvoir explicatif du modèle demeure faible (R^2 ajusté = 0.11) cependant toutes les variables du modèle sont significatives à un seuil de 10%. Nous avons donc décidé de retenir ce modèle.

Interprétation : La constante du modèle représente la moyenne du nombre de visites par an. Les coefficients représentent l'effet d'un kilomètre de distance au lac sur ce nombre moyen de visite. Ainsi pour un individu inactif (modalité 1 de la variable csp2) situé à 10 km du lac le nombre de visite serait calculé de la façon suivante :

Nombre de visite annuel pour notre exemple = $(-0.3 (\approx - 0.34) \times 10) + 23 (\approx 22.7)$

Nombre de visite annuel pour notre exemple = 20 visites / an

Le tableau suivant présente une synthèse des paramètres d'agrégation.

Tableau 5 Synthèse des paramètres d'agrégation du CAP / Houenou M. / 2019

| Groupe CSP | Impact km/nbre_visite | Nautique | Nautique + pêche | Nautique + pêche + baignade |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------------------|--|
| Retraités | -0,7 | -4,1 | 1,48 | 6,79 |
| Actifs | -0,5 | 2,76 | 6,67 | 13,41 |
| Inactifs | -0,3 | 2,76 | 6,67 | 23,07 |
| Nbre_visite moyen/an | 23 | | | |

6.3.2 Agrégation du consentement à payer (CAP) des usagers

Nous sommes maintenant en mesure d'estimer le nombre annuel visites des usagers. Nous connaissons également les valeurs de visites. Il nous faut maintenant agréger ces valeurs à l'échelle des 139 communes retenues. Pour ce faire nous avons construit une base de données présentant les caractéristiques des populations concernées par notre étude. Les données utilisées pour renseigner notre base proviennent des données de l'INSEE :

- Les informations sur les effectifs de la population proviennent des estimations de la population à la date du 1^{er} Janvier 2019 (INSEE 2018)
- Les informations sur la répartition des groupes de catégories socioprofessionnelles pour chaque commune proviennent de fascicules issus du recensement et présentant l'évolution de la structure de la population en 2015 (INSEE 2019)

L'agrégation porte sur la population adulte. Dans le cadre de cette étude sont considérés comme adultes les personnes âgées de plus de 14 ans. Nous supposons qu'en dessous de cet âge le paiement d'une visite sera à la charge des parents (nous sommes conscients que cette définition est discutable). Nous avons donc commencé par retirer de la population les individus âgés de moins de 14 ans.

Un autre bémol est que nous avons dû répartir les groupes de catégories socio-professionnelles au sein de la population considérée en nous basant sur des informations concernant la structure de la population âgée de 15 à 64 ans. En effet il y a un risque que la part des retraités soit sous-estimée étant donné que les observations sont limitées aux populations ayant moins de 64 ans.

On obtient une base de données présentant en ligne les 139 communes retenues et en colonnes les différentes caractéristiques qui nous intéressent. Il suffira alors d'appliquer nos formules pour déterminer les nombres de visites et de sommer les valeurs de visites selon les caractéristiques des usagers.

Maintenant que nous sommes en mesure d'évaluer la demande de service à une échelle agrégée il faut maintenant faire le lien entre l'offre et la demande.

6.4 Liaison entre Offre et demande

Nous avons vu que pour qu'on parle de PSE il faut qu'il y ait un changement de pratique qui impacte sur un service écosystémique. Encore faudrait-il que ce service soit mesurable. L'existence d'indicateurs qui permettent de mesurer ce lien représente un condition sine qua non à la mise en place d'un PSE (DUVAL et al. 2016b; Börner et al. 2017; WUNDER et al. 2018). D'où l'importance de pouvoir mesurer l'impact de nos mesures sur l'état de pollution du lac et par conséquent sur le niveau d'attribut que ce lac peut offrir.

Rappelons qu'actuellement le niveau de concentration de phosphore (P) pondéré par le débit à l'exutoire du bassin est de 100 µg/l et qu'on est en mesure de mesurer l'impact de la mise en place d'une combinaison de mesures sur la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant. Reste maintenant à pouvoir établir un lien entre le niveau de concentration pondéré par le débit de phosphore, l'état trophique du lac et le niveau d'attribut que peut offrir le lac.

La concentration de phosphore est l'un des paramètres classiquement utilisé pour mesurer l'état d'eutrophisation d'un plan d'eau. Le tableau qui suit présente différentes études qui permettent d'évaluer l'état trophique d'un plan d'eau

Tableau 6 : Statuts trophiques/écologiques décrits pour les plans d'eau peu profonds. 1 : Nemery 2018 ; 2 : Moss et al. 2003, 3 : Søndergaard et al. 2005./ Consortium scientifique du site pilote/2018

| Paramètres | Etude | Ultra-oligotrophe / Très bon | Oligotrophe / Bon | Mésotrophe / Moyen | Eutrophe / Médiocre | Hypereutrophe / Mauvais |
|------------------------|-------|------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| P total (µg/L) | 1 | <5 | 5-10 | 10-30 | 30-100 | >100 |
| | 2 | <15 | <30 | <50 | <75 | >75 |
| | 3 | <25 | <50 | <100 | <200 | >200 |
| Chlorophyll e a (µg/L) | 1 | <2,5 | <8 | 8-25 | 25-75 | >75 |
| | 2 | <10 | <20 | <30 | <50 | >50 |
| | 3 | <5 | <11 | <21 | <55 | >55 |
| Secchi (m) | 1 | >6 | >3 | 3-1,5 | 1,5-0,7 | <0,7 |
| | 2 | >3 | >3 | >2 | >1 | <0,9 |
| | 3 | >2 | >1,5 | >1 | >0,8 | <0,8 |

Source : (Consortium scientifique du site pilote "Lac au Duc" 2018b, p. 28)

Comme on peut le voir selon les études existantes les références sont différentes. Dans le cadre notre étude nous retenons les références de l'étude n°3. En effet des 3 études utilisant les mesures de phosphore (P) pour évaluer l'état trophique d'un plan d'eau l'étude n°3 est celle qui nous permettra de pouvoir tester le plus de situations. Les autres études pourraient s'avérer trop exigeantes au regard des mesures que nous souhaitons mettre en place.

En ce qui concerne les cyanobactéries sur le lac bien qu'il soit évident que le phosphore représente un facteur limitant nous ne sommes pas aujourd'hui pas en mesure d'établir un lien rigide entre le niveau de concentration du phosphore et la densité des cyanobactéries dans l'eau. En effet la prolifération dépend d'une multitude de facteur (température, ph, luminosité), ce à quoi il faut ajouter la forte capacité d'adaptation des cyanobactéries (AUSTRUY 2012).

Il faut pourtant établir un lien qui serve d'indication et qui permette de mettre en relation les changements de pratique que nous souhaitons mettre en place et les attributs que pourrait offrir le Lac Au Duc selon le niveau de dépollution atteint.

A l'issue de nombreux échanges entre spécialistes l'hypothèse suivante a été retenue :

En considérant le niveau de concentration de phosphore pondéré par le débit actuel à l'exutoire du bassin versant est de 100µg/l et nous basant sur les niveaux de références retenus pour évaluer l'état trophique du lac (Consortium scientifique du site pilote "Lac au Duc" 2018b) nous considérons que :

- Une **division par 5** de la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant soit l'atteinte d'un **seuil de 20µg/l** permettrait au lac d'atteindre un état Ultra Oligotrophe, ce qui permettrait la pratique de la **baignade**, de la **pêche** et des **activités nautiques**
- Une **division par 3** de la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant soit l'atteinte d'un **seuil de 33.33µg/l** permettrait au lac d'atteindre un état Oligotrophe, ce qui permettrait la pratique de la **pêche** et des **activités nautiques**
- Une **division par 2** de la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant soit l'atteinte d'un **seuil de 50µg/l** permettrait au lac d'atteindre un état Mésotrophe, ce qui permettrait la pratique des **activités nautiques**

Nous sommes conscients qu'il s'agit là d'une hypothèse robuste et qu'elle de ce fait critiquable. Elle nous permettra cependant de mettre en relation l'offre de services environnementaux et la demande de service écosystémique (ici il s'agit de services culturels fournis par le Lac Au Duc)

Tableau 7 : Objectifs retenus pour les simulations / Houenou M./ 2019

| Paramètres | | P total (µg/L) | Activités praticables |
|-------------------|----------|----------------|--------------------------------------|
| Ultra-oligotrophe | Très bon | <25 | Baignade, Pêche, Activités nautiques |
| Oligotrophe | Bon | <50 | Pêche, Activités nautiques |
| Mésotrophe | Moyen | <100 | Activités nautiques |
| Eutrophe | Médiocre | <200 | Aucune |

7 Présentation des résultats

Nous allons maintenant Présenter les principaux résultats. Dans un premier temps nous présentons les principaux scénarios retenus, ensuite nous présentons les résultats de l'agrégation des consentements à payer des usagers.

7.1 Présentation des scénarios

Nous rappelons que les objectifs fixés pour nos mesures sont la division de la concentration de phosphore (P) à l'exutoire du bassin versant par 2, 3 et 5. Pour chaque objectif nous allons présenter plusieurs scénarii : un scénario efficace et un scénario non efficace. On devrait observer que lorsqu'on cible les parcelles les plus coûts efficaces on obtiens un même résultat à un moindre coût relativement au non-ciblage des parcelles.

Pour chaque scénario nous présenterons une carte et une fiche signalétique qui renseignera sur l'intensité de la mesure, le coût les profils de parcelles concernées.

1. Objectif : Division par 2 de la concentration de phosphore (P) à l'exutoire du bassin versant

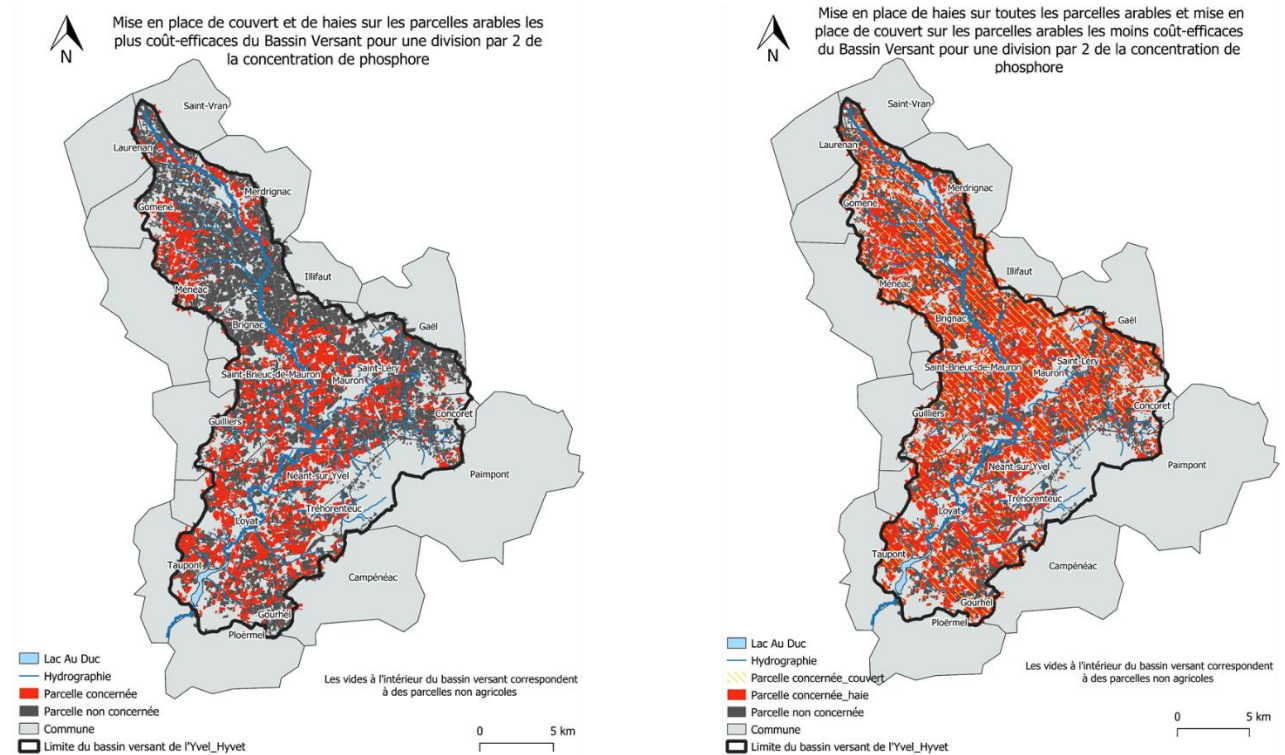


Figure 11 : comparaison de mesures pour une division par 2 du P à l'exutoire du bassin versant / Houenou M./2019

Tableau 8 : comparaison de mesure pour une division par 2 à l'exutoire du bassin versant/ Houenou M./ 2019

| Approche | Ciblage (à gauche) | Non ciblage (à droite) |
|----------------------|--|--|
| Mesure | (100m de haies+ Couvert) /P | 20m de haies/P sur toutes les parcelles + couvert sur 74,30% des parcelles arables |
| Parcelles concernées | ble14, mixte14, ble13, mixte13, ble12, ble24 | Toutes les parcelles arables |
| % Parcelles arables | 50 | 74,3 |
| % SAU | 36,75 | 73,34 |
| Coût (€) | 6 171 013 | 10 414 563 |
| Activités | Activité nautiques | Activités nautique |

NB : (/P) veut dire par parcelle

Dans le scénario du non-ciblage (carte à droite) nous cherchons à montrer une alternative qui permettrait d'atteindre un même niveau de division qu'une première alternative avec un scénario ciblé (carte à gauche) mais qui ne cible pas les parcelles les plus coût efficace et induit de ce fait un coût plus élevé.

2. Objectif : Division par 3 de la concentration de phosphore (P) à l'exutoire du bassin versant

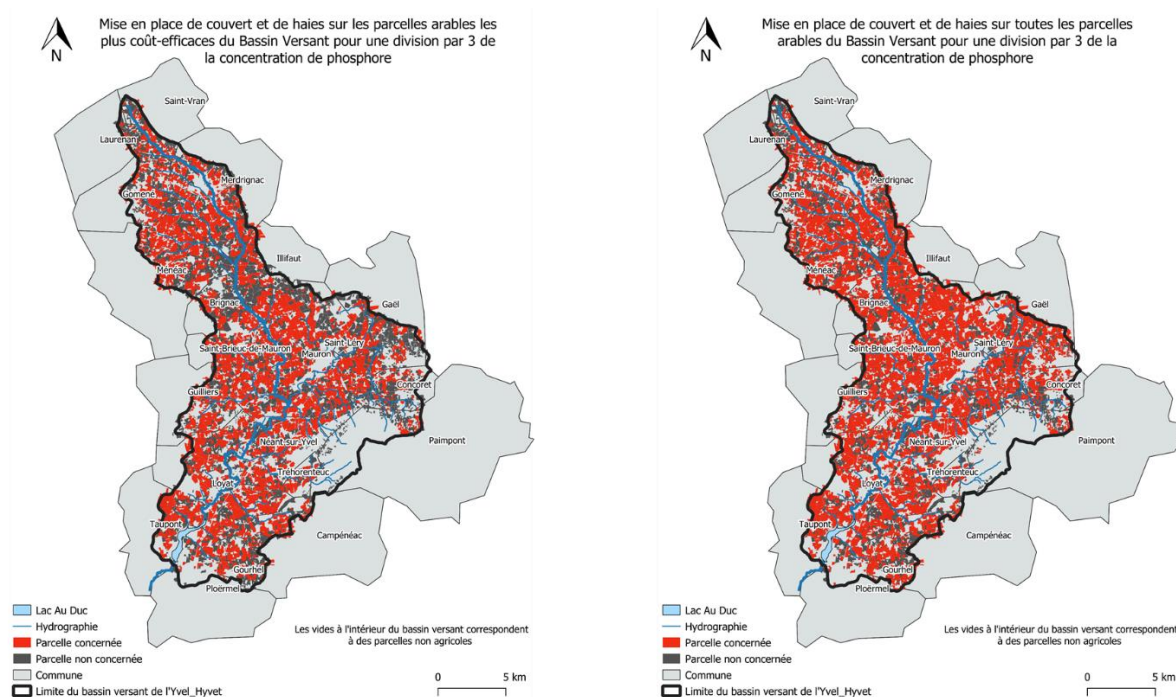


Figure 12 : comparaison de mesures pour une division par 3 du P à l'exutoire du bassin versant / Houenou M./2019

Tableau 9 : comparaison de mesure pour une division par 3 à l'exutoire du bassin versant/ Houenou M./ 2019

| Approche | Ciblage (à gauche) | Non ciblage (à droite) |
|----------------------|--|------------------------------|
| Mesure | (100m de haies+ Couvert)/P | (37m de haies + couvert)/P |
| Parcelles concernées | ble14, mixte14, ble13, mixte13, ble12, ble24, mixte12, mixte24, ble23, mixte23 | Toutes les parcelles arables |
| % Parcelles arables | 79 | 100 |
| % SAU | 57,98 | 73,34 |
| Coût (€) | 10 328 417 | 11 897 813 |
| Activités | Activités nautiques + Pêche | Activités nautiques + Pêche |

NB : (/P) veut dire par parcelle

Nous comparons ici deux scénarios qui permettent de mettre en évidence un gain au ciblage.

3. Objectif : Division par 5 de la concentration de phosphore (P) à l'exutoire du bassin versant

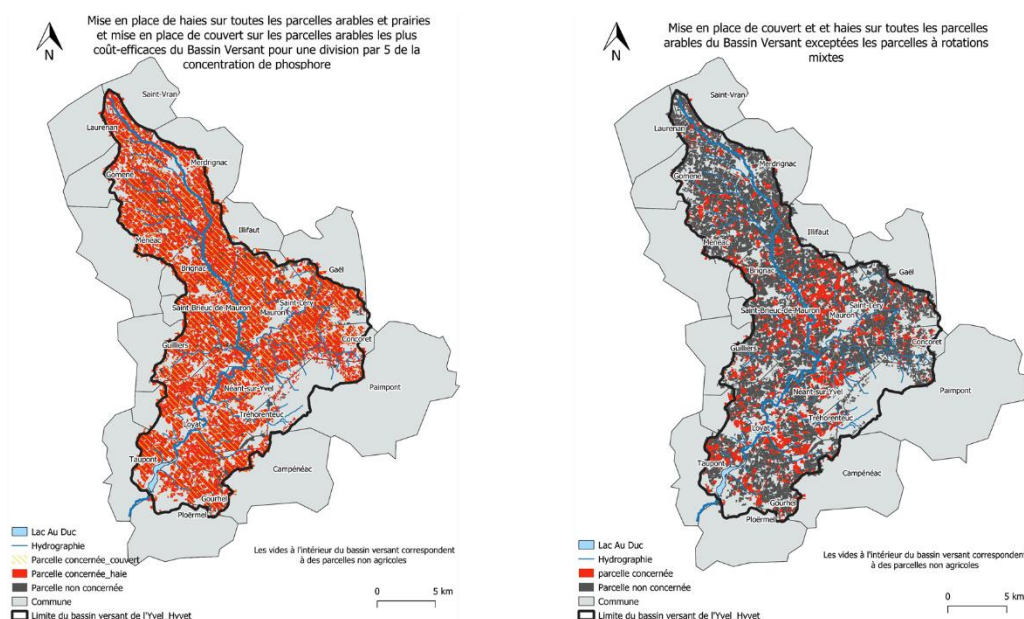


Figure 13 : mesures extrêmes pour une division par 5 du P à l'exutoire (gauche) ; mise en place de paiement uniforme/ Houenou M./2019

Tableau 10 : fiche signalétique mesure pour une division par 5 du P à l'exutoire du bassin versant et mise en place de paiement uniformes / Houenou M./ 2019

| Approche | Mesure extrême pour une division /5 | Paiement uniforme (2) |
|----------------------|--|---|
| Mesure | Haie_100m sur toutes les parcelles arables sauf mixte21 + couvert sur toutes les parcelles arables et sur prairies | 100 m de haies + couvert sur toutes les parcelles « ble » |
| Parcelles concernées | Toutes les parcelles arables sauf mixte 21 et toutes les parcelles en prairies | Toutes les parcelles "ble" |
| % Parcelles arables | 97 | 32 |
| % SAU | 97,74 | 23,5 |
| Coût (€) | 14 151 085 | 2 402 427 |

NB : (/P) veut dire par parcelle

Nous présentons ici deux mesures (2 alternatives dans l'évaluation des coûts de la 2nd mesure) :

- Une mesure que considérons comme extrême puisqu'elle implique la mise en place de haies antiérosives sur les parcelles en prairies (carte à gauche) : Ce scénario permet de diviser par 5 la concentration de P

- La mise en place d'un paiement uniforme (carte à droite) : Dans ce cas les agriculteurs des parcelles mixtes ne s'engageront pas. On atteint même le seuil de division /2.

7.2 Bénéfice des usagers et comparaisons (coût – bénéfice)

Le tableau suivant présente les bénéfices agrégés et les coûts des scénarios les moins couteux selon les types d'activités praticables sur le lac

Tableau 11 comparaison des bénéfices des usagers aux coûts de nos mesures/ Houenou M./ 2019

| Division P total (µg/l) | Activité(s) praticable(s) | CAP total | Coût mesure optimale |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------|----------------------|
| Division/2 | Activités nautiques | 5 602 710 € | 6 171 013 € |
| Division/3 | Activités nautiques et Pêche | 20 437 351 € | 10 328 417 € |
| Division/5 | Activité nautique, Pêche et Baignade | 34 426 613 € | 14 151 085 € |

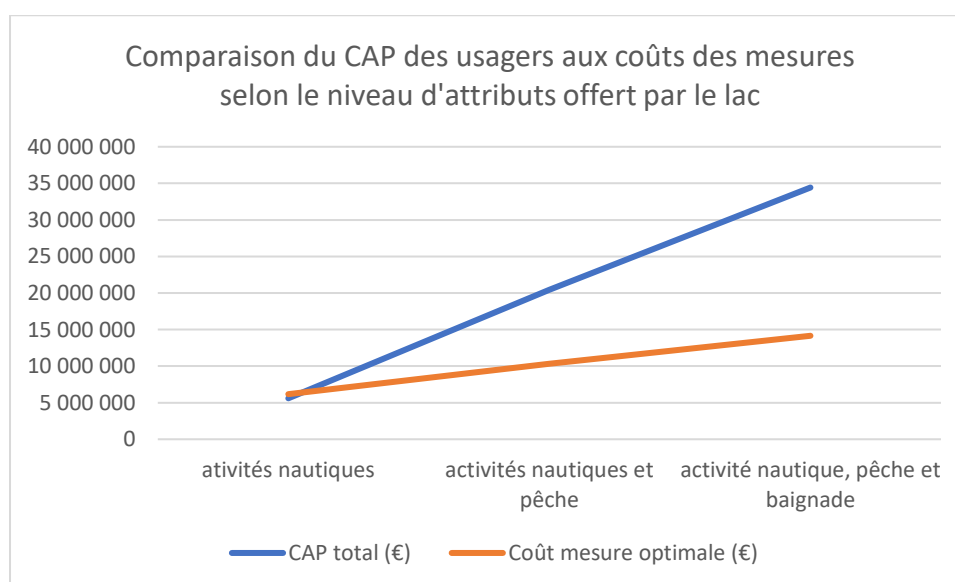


Figure 14 comparaison du coût des mesures optimales au bénéfice des usagers

Plus le niveau des attributs offerts par le lac est élevé plus le l'écart entre le CAP des usagers et le consentement à recevoir (CAR) des agriculteurs augmente. Il y a bien une demande suffisante pour inciter à la production de services environnementaux dans le bassin versant de l'Yvel-Hyvet. On a donc intérêt à atteindre un niveau de dépollution maximal sur le lac.

8 Discussion

Les objectifs visés dans nos simulations ont été retenus en cohérence avec l'hypothèse permettant de faire le lien entre nos mesures et les attributs offerts par le Lac Au Duc. Nous sommes conscients du fait que notre étude repose en partie sur des hypothèses pas assez robustes, notamment celle sur l'efficacité des haies antiérosives et celles permettant de faire le lien entre l'offre et la demande de services. En effet selon les valeurs d'efficacité retenus pour les haies antiérosives on peut accorder un avantage à l'une ou l'autre de nos mesures. Cependant il nous a fallu pouvoir estimer l'efficacité de cette mesure. Sur ce point le concours des spécialistes en sciences du sol, qui d'ailleurs interviennent au sein de ce projet depuis sa mise en place a été indispensable. Pour ce qui est de la 2nd hypothèse nous rappelons qu'elle a été retenue à titre indicatif et nous a permis de tester la viabilité de nos approches.

L'outil APLE nous a permis de simuler les émissions de phosphore des parcelles arables du bassin versant en kg/ha/an. Parallèlement à nos simulations, des mesures ont été faites sur le terrain entre Avril 2018 et Mars 2019 par les spécialistes en sciences du sol (cartes en annexe3). La comparaison des mesures de terrain aux résultats de nos simulations révèle que le modèle APLE permet de faire ressortir avec justesse la variabilité globale des zones à l'intérieur du bassin versant. En revanche le modèle ne fait pas ressortir la variabilité qu'on retrouve au niveau des parcelles. Ceci n'a pas d'effet important sur les résultats de notre étude. En effet compte tenu des objectifs de dépollution retenus on est rapidement obligés d'impliquer une grande partie des parcelles agricoles du bassin versant. Le premier scénario (Fig13 : carte de gauche) qui permet d'atteindre le seuil de dépollution le plus bas fait d'ailleurs déjà ressortir les zones du bassin les plus émettrices. Il s'agit de la partie aval du bassin à partir de la commune de Brignac et d'une petite zone située au nord-est du bassin versant. L'impact de la variabilité inter parcellaire est donc négligeable. Cette différence entre les résultats de simulations et les mesures de terrain s'explique par le fait que le fonctionnement du modèle APLE soit basé sur des relations prédéterminées, ce qui ne permet pas de prendre en compte de nouveaux processus. Certains auteurs recommandent de ne l'utiliser que sur des sols dont les caractéristiques se rapprochent de ceux des sols à partir desquels l'outil a été conçu (sols agricoles aux USA) (Benskin et al. 2014; VADAS 2017, p. 2). Il serait intéressant que des travaux soient menés sur la conception d'un outil de simulation qui prendrait en compte les spécificités des sols bretons.

L'outil qui a servi à la simulation des combinaisons de mesures fonctionne à partir de profils de parcelles. De ce fait toutes les parcelles d'un même profil représentent une unité et il n'est pas possible de ne considérer qu'une partie des parcelles d'un même profil. Cela implique une certaine rigidité dans les combinaisons de mesures (difficulté d'atteindre un niveau précis). Cependant cette contrainte peut illustrer le fait que l'implication d'une parcelle plutôt qu'une autre se justifie par son profil (caractéristiques). Par soucis d'équité, dimension importante des PSE (Börner et al. 2017), il pourrait arriver que l'on doive impliquer toutes les parcelles identiques au regard des exigences du programme. Nous aurions pu éclater nos profils de parcelles pour avoir des simulations plus fines et donc une plus grande souplesse dans nos combinaisons mais cela nous aurait posé un problème au niveau de l'illustration : comment choisir au sein d'un ensemble de parcelles ayant le même profil lesquelles devront être impliquées ? Dans la réalité on pourrait y voir une marge de manœuvre : Un contrat de PSE nécessite un engagement volontaire. La perception du risque ayant sa part de subjectivité un

agriculteur dont l'engagement est nécessaire pour l'atteinte de nos objectifs pourrait ne pas vouloir s'engager pendant qu'un autre agriculteur qui lui est identique compte tenu des exigences du programme voudrait, lui s'engager. Dans ce cas on saurait vers quels agriculteurs nous tourner pour atteindre nos objectifs.

Une 2nd contrainte dans la réalisation de nos simulations est due au fait que menons une analyse coût-efficacité. En effet pour pouvoir être comparés, nos scénarios doivent permettre d'atteindre un même niveau de division de P. Pour atteindre les objectifs de division par 2 et 3 nous avons donc retenu des scénarios qui permettent d'atteindre respectivement une division par 1,9 et par 3,21. Nous avons également dû retenir pour atteindre la division par 2 un « mauvais ciblage » plutôt qu'une mesure uniforme : En effet la mise en place du couvert uniquement ou des haies antiérosives uniquement sur toutes les parcelles arables entraînent respectivement une division par 2,74 ou une division par 1,85 de la concentration de P. Plutôt que d'ajuster la combinaison de mesure pour le scénario « ciblé » nous avons opté pour un « mauvais ciblage ».

En observant l'évolution des scénarios on se rend compte qu'à mesure qu'on s'élève dans le niveau de dépollution on dispose de moins en moins de marge de manœuvre. Pour atteindre le seuil le plus élevé (division /5) on est obligé d'impliquer les parcelles en prairies (mise en place de haies antiérosives) en plus des parcelles arables du bassin versant. Cela nous conforte dans l'idée que notre choix des références retenues pour fixer nos seuils de dépollution a été judicieux. En effet avec des références plus exigeantes nous aurions dû d'entrée de jeu devoir appliquer des niveaux extrêmes de mesures. Notre analyse aurait de fait perdu de sa richesse.

Nous rappelons qu'en comparant les coûts et bénéfices de la dépollution il ne s'agit pas de mener un analyse coût-bénéfice. En effet la temporalité n'est pas prise en compte dans le cadre de notre étude (d'où l'absence d'actualisation des bénéfices). Cette comparaison nous permet juste de vérifier l'existence d'une demande suffisante pour inciter à la production de services environnementaux. En effet il ressort de la littérature que pour qu'il puisse avoir mise en place de PSE il faut qu'il y ait une capacité des organisations à se structurer, une existence des droits de propriétés du côté des fournisseurs du service, un caractère attractif du paiement et pour finir le plus important, l'existence d'une demande supérieure à l'offre (WUNDER et al. 2018). Notre étude a permis de montrer qu'il existe bien une demande suffisante pour la fourniture de services environnementaux en direction du Lac Au Duc.

Concernant la temporalité il faut noter que lors de l'enquête il n'a pas été précisé aux usagers enquêtés que les mesure mettraient des décennies avant de faire effet. Il serait intéressant de pouvoir évaluer l'effet que cette temporalité pourrait avoir sur le CAP des usagers. Les retraités sont les plus réticents à se rendre sur le lac. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'ils aient des difficultés à se rendre mobiles. Donc des investissements dans des infrastructures leur permettant de pouvoir se déplacer facilement pourrait faire augmenter leur consentement à payer (CAP).

La comparaison de différents scénarii pour l'atteinte des objectifs de division par 2 et par 3 de la concentration de P à l'exutoire du bassin versant nous montre qu'il y a un gain au ciblage. Ceci est cohérent avec la littérature(DUVAL et al. 2016a; Börner et al. 2017; PAJOT and KLERCH 2019). La division de la concentration de P par 5 étant la plus exigeante nous ne disposons pas de marge de manœuvre permettant de faire une comparaison. Lorsqu'un paiement uniforme est mis en place les agriculteurs des parcelles mixtes ne s'engagent pas. Ceci

s'explique par la présence du maïs qui entraîne un surcoût. Ce surcoût est dû notamment au risque lié à la mise en place de couvert sur des parcelles en maïs. Il est donc nécessaire de mettre en place un paiement différencié qui prenne en compte la diversité des systèmes de production.

Le niveau des coûts de nos mesures est dû notamment à la présence d'incertitude, à la méconnaissance des systèmes de fonctionnement des PSE, aux coûts de transactions inhérents aux procédures administratives et surtout aux aspects techniques de la couverture des sols qui présentent des risques selon les types de cultures (THOMAS 2011). Ces coûts devraient diminuer à mesure que les aspects techniques et procédures administratives seront de plus en plus maîtrisés.

9 Conclusions

Cette étude intervient dans le cadre du projet INTERREG Channel Payments for Ecosystem Services (CPSE). Ce projet vise notamment à mettre en place des PSE au niveau des agriculteurs situés dans le bassin de l'Yvel-Hyvet pour la fourniture de services environnementaux en direction du Lac Au Duc situé en aval du bassin. Pour mener à bien cette étude nous avons dû mobiliser des connaissances issues de plusieurs disciplines. Il a notamment été question de construire des scénarii qui permettraient de répondre à un certain nombre de questionnement. Cette étude nous a notamment permis de classer les parcelles agricoles du bassin versant selon leurs niveaux d'efficacité et de coût-efficacité. Nous avons été en mesure de montrer qu'il existe un gain au ciblage des parcelles. Il existe également un surcoût des mesures propre à certains systèmes de production qui doit être pris en compte dans la conception des PSE. En effet dans le cas de notre étude la mise en place d'un paiement uniforme ne permettrait d'atteindre aucun des objectifs de dépollution du lac. La comparaison de bénéfices aux coûts de nos mesures nous montre qu'il existe bel et bien une demande suffisante pour inciter à la production de services environnementaux en direction du Lac Au Duc.

Références bibliographiques

- Austruy E (2012) Apports de phosphore et proliférations de cyanobactéries dans le Lac au Duc (Morbihan) : diagnostic et propositions d'actions préventives et curatives potentielles
- Benskin CMcWH, Roberts WM, Wang Y, Haygarth PM (2014) Review of the Annual Phosphorus Loss Estimator tool - a new model for estimating phosphorus losses at the field scale. *Soil Use Manag* 30:337–341. doi: 10.1111/sum.12128
- Börner J, Baylis K, Corbera E, et al (2017) The Effectiveness of Payments for Environmental Services. *World Dev* 96:359–374. doi: 10.1016/j.worlddev.2017.03.020
- Bray M, Institut international de planification de l'éducation (2009) La scolarisation à double vacation: conception et mise en oeuvre pour un meilleur rapport coût-efficacité. Unesco, Institut international de planification de l'éducation, Paris
- Bremer LL, Farley KA, Lopez-Carr D (2014) What factors influence participation in payment for ecosystem services programs? An evaluation of Ecuador's SocioPáramo program. *Land Use Policy* 36:122–133. doi: 10.1016/j.landusepol.2013.08.002
- 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 (2019) CPES Interreg - Paiements pour Services Environnementaux Manche - Le Projet. In: CPES. <https://www.cpes-interreg.eu/fr/projet-cpes/le-projet>. Accessed 18 Aug 2019
- Consortium scientifique du site pilote "Lac au Duc" (2018a) Etat des lieux initial, Geographic scope report (Site pilote du Lac au Duc et du bassin-versant de l'Yvel-Hyvet, Ploërmel, France. 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
- Consortium scientifique du site pilote "Lac au Duc" (2018b) Etat de la qualité de la ressource en eau : State of environment report (Site pilote du Lac au Duc et du bassin-versant de l'Yvel-Hyvet, Ploërmel, France. 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
- Corvalán C, Hales S, McMichael AJ, et al (eds) (2005) Ecosystems and human well-being: health synthesis. World Health Organization, Geneva, Switzerland
- Ducos G, Dupraz P, Bonnieux F (2009) Agri-environment contract adoption under fixed and variable compliance costs. *J Environ Plan Manag* 52:669–687. doi: 10.1080/09640560902958248
- Dupas R (2014) Revue bibliographique sur les modèles de transfert du phosphore, de la parcelle au bassin versant. INRA
- Dupas R (2019) quantification des flux de phosphore sous différents scénarios
- Duval L, Binet T, Dupraz P, (2016a) Paiements pour services environnementaux et méthodes d'évaluation économique : Enseignements pour les mesures agroenvironnementales de la politique agricole commune. Oréade-Brèche

- Duval L, Binet T, Dupraz P, (2016b) Paiements pour services environnementaux et méthodes d'évaluation économique : Enseignements pour les mesures agroenvironnementales de la politique agricole commune. Oréade-Brèche
- Espinosa-Goded M, Barreiro-Hurlé J, Dupraz P (2013) Identifying additional barriers in the adoption of agri-environmental schemes: The role of fixed costs. *Land Use Policy* 31:526–535. doi: 10.1016/j.landusepol.2012.08.016
- Fiorellino NM, McGrath JM, Vadas PA, et al (2017) Use of Annual Phosphorus Loss Estimator (APLE) Model to Evaluate a Phosphorus Index. *J Environ Qual* 46:1380. doi: 10.2134/jeq2016.05.0203
- Gentils H (2017) Annual Communication Plan. European Regional Development Fund
- Gérard D, Guilliers GJ-L, Jacky E (2011) Compte-rendu du Comité de Pilotage Breizh Bocage du bassin versant de l'Yvel-Hyvet. 3
- Hanley N, Wright RE, Alvarez-Farizo B (2006) Estimating the economic value of improvements in river ecology using choice experiments: an application to the water framework directive. *J Environ Manage* 78:183–193. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.05.001
- INSEE (2018) Recensement de la population
- INSEE (2019) Téléchargement des fichiers par départements des populations légales en 2016 – Populations légales 2016 | Insee. INSEE
- Levi Y, Harvey M, Cervantès P, et al (2006) Evaluation des risques liés à la présence de cyanobactéries et leurs toxines dans les eaux destinées à l'alimentation, à la baignade et autres activités récréatives. Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments
- Levin HM (1987) Cost-benefit and cost-effectiveness analyses. *New Dir Program Eval* :83–99. doi: 10.1002/ev.1454
- Ministère Chargé des Affaires Sociales et de la Santé (2012) Ministère chargé de la santé / Eaux de baignade / Critères d'évaluation. In: Pourquoi Comment Est Contrôlée Qual. Eaux Baign. http://baignades.sante.gouv.fr/baignades/editorial/fr/controle/critere_s.html. Accessed 22 Aug 2019
- Moisan S, Guichard L, Cuesta R (2010) Eutrophisation du Lac au Duc de ploërmel : Diagnostic des fuites de phosphores sur le bassin versant de l'Yvel Hyvet et propositions de solutions correctives. Grand Bassin de l'Oust (GBO)
- Pajot G, Klerch D (2019) Les Paiements pour Services Environnementaux : Vers un socle commun de connaissance et de partage d'expérience pour la Bretagne. Creseb-Centre de Ressources et d'Expertise Scientifique sur l'Eau de Bretagne/ CRB -La Région Bretagne
- Ropars-Collet C, Goffe PL, Lefnatsa Q (2018) Evaluation économique de la pêche du saumon en « no-kill » : impact sur le consentement à payer des pêcheurs. UMR SMART-LERECO Agrocampus Ouest
- Salzman J, Bennett G, Carroll N, et al (2018) The global status and trends of Payments for Ecosystem Services. *Nat Sustain* 1:136–144. doi: 10.1038/s41893-018-0033-0
- Syndicat Mixte du Grand Bassin de l'Oust (2011) BASSIN VERSANT DE L'YVEL HYVET - PRESENTATION. In: Gd. Bassin OUST. <http://www.grandbassindeloust.fr/77-yvel-hyvet>. Accessed 18 Aug 2019

Thomas F (2011) Semis de couvert sous maïs : Sortir du maïs avec un couvert en place. TCS Mars, Avril, Mai:9

Vadas PA (2017) Annual Phosphorus Loss Estimator. U.S. Dairy Forage Research Center, Madison, Wisconsin, USA

Wunder S, Brouwer R, Engel S, et al (2018) From principles to practice in paying for nature's services. *Nat Sustain* 1:145–150. doi: 10.1038/s41893-018-0036-x

Yates BT (2015) Cost-Benefit and Cost-Effectiveness Analyses in Evaluation Research. In: *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Elsevier, pp 55–62

Annexe

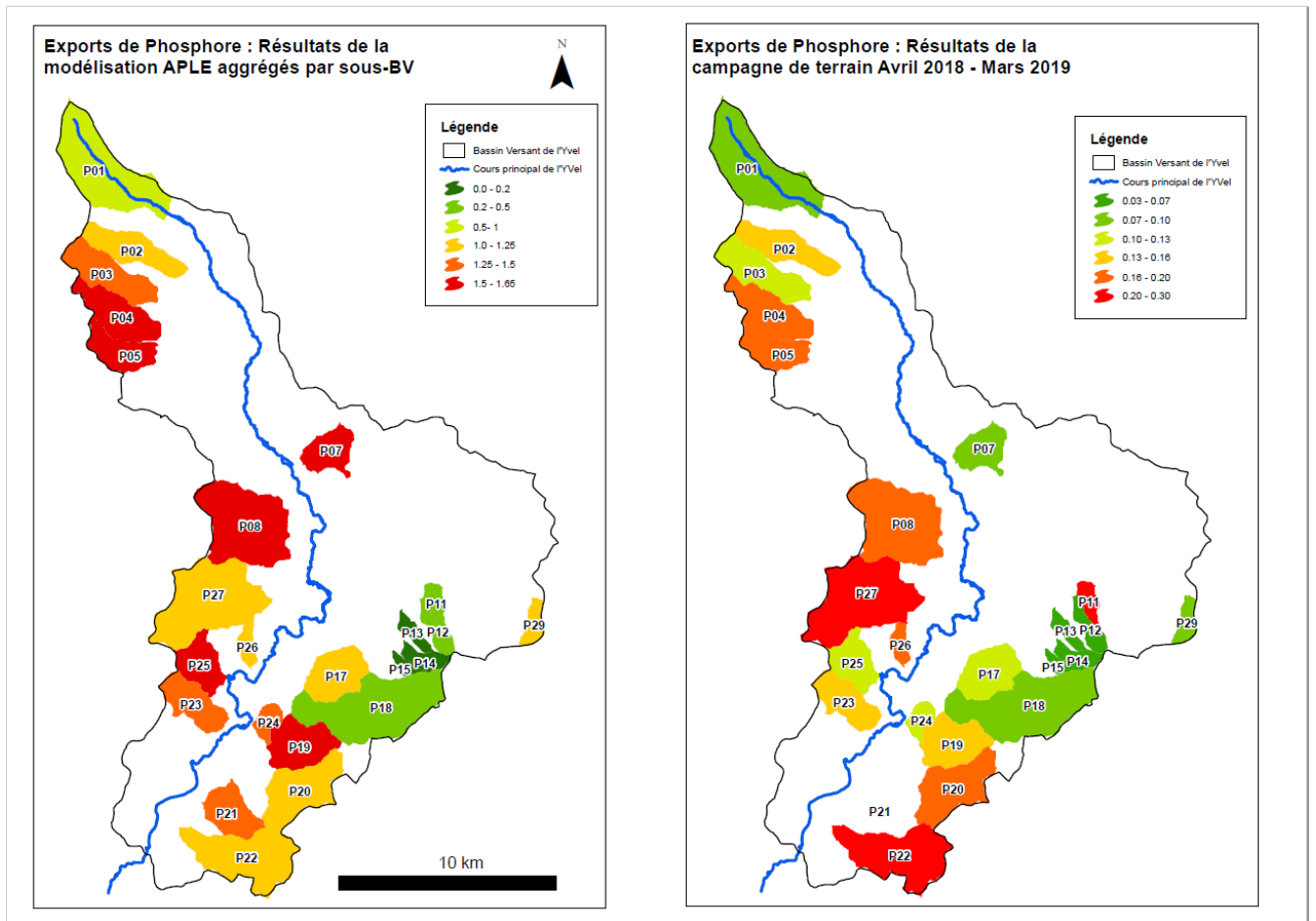
Annexe1 : Récapitulatif des paramètres renseignés dans le modèle APLE

| sol | | |
|--|--|----------|
| Paramètres | Valeurs | |
| | ble | mixte |
| Depth to Bottom of 1st layer | 25 cm (250mm soit 9.84 inch) | |
| Depth to Bottom of 2nd layer | 35 cm (350mm soit 13.78 inch) pour sol 1 et 75 cm (750mm soit 29.53 inch) pour sol 2 | |
| Mehlich 3 Soil P 1st Layer | 180 ppm (moyenne de 772 échantillons sur l'Yvel) | |
| Mehlich 3 Soil P 2nd Layer | 36 ppm (j'ai juste divisé par 5 la teneur de l'horizon 1) | |
| Soil Clay 1st layer | 18% (« donnée Sols de Bretagne ») | |
| Soil Clay 2nd layer | 18% (« donnée Sols de Bretagne ») | |
| Soil OM 1st Layer | 3% (moyenne de 772 échantillons sur l'Yvel) | |
| Soil OM 2nd Layer | 0.5% (« expertise » Rémi) | |
| Field Area | Pas important puisqu'on cherche des mesure unitaires | |
| Climat | | |
| Annual Rain | 884 mm (moyenne 1998-2017)= 34.80 inch | |
| Annual Runoff | 10 – 20 mm soit 0,39 inch (sol 1) - 0,79 inch (sol 2) | |
| Sediment Loss | donnée d'érosion | |
| % argile | 18% | |
| Itinéraire technique | | |
| Rotation | ble - ble | ble-mais |
| Crop P uptake | 25 lb/acre | |
| Grazing animal | 0 | |
| <u>Solid Manure Applications</u> | | |
| | Fall (Automne) | |
| Manure Applied | 0,53 wet ton / acre | 0 |
| Manure Solids | 15% | 0 |
| Manure Total P ₂ O ₅ Content | 66,15 lbs/wet ton | 0 |
| Manure WEP/TP | 4% | 0 |
| Manure Incorporated | 10 | 0 |
| Depth of Incorporation | 4% | 0 |
| <u>Liquid Manure Applications</u> | | |
| | Spring (Printemps) | |
| Manure Applied | 0 534,75 gallons /acre | |
| Manure Solids | 0 | 8% |
| Manure Total P ₂ O ₅ Content | 0 286,65 lbs/1000 | |
| Manure WEP/TP | 0 | 9,20% |
| Injection without Tillage (1=yes 2=no) | 0 | 1 |
| Manure Incorporated by Tillage | 0 | 0 |
| Depth of Injection or Incorporation | 0 | 0 |
| <u>Fertilizer Applications</u> | | |
| Fertilizer P ₂ O ₅ Applied | 0 | |
| Fertilizer Incorporated | 0 | |
| Depth of Incorporation | 0 | |
| Degree of Soil Mixing | 20% | |

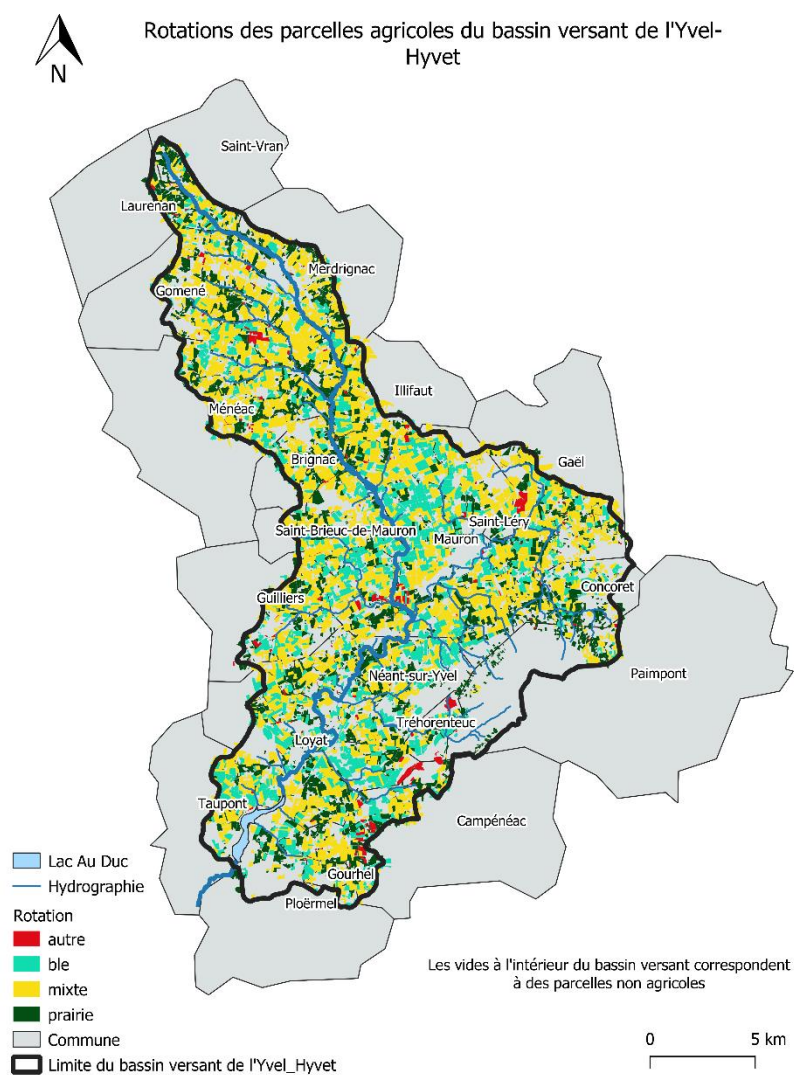
Annexe 2 : Tableau de classification des profils de parcelles agricoles

| Profil | moyenne (25 dernières ans)kg/ha | Moyenne (25 dernières années)_F | %_SAU |
|----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|
| ble14 | 2,51 | 0,80 | 4,36% |
| mixte14 | 3,32 | 1,02 | 7,98% |
| ble13 | 2,24 | 0,70 | 6,50% |
| mixte13 | 2,98 | 0,89 | 10,76% |
| ble12 | 1,68 | 0,55 | 6,18% |
| ble24 | 1,54 | 0,49 | 0,97% |
| mixte12 | 2,23 | 0,71 | 10,83% |
| mixte24 | 2,04 | 0,61 | 4,23% |
| ble23 | 1,38 | 0,43 | 1,30% |
| mixte23 | 1,82 | 0,54 | 4,88% |
| ble11 | 1,05 | 0,35 | 2,18% |
| ble22 | 1,03 | 0,34 | 1,41% |
| mixte11 | 1,41 | 0,45 | 5,07% |
| mixte22 | 1,36 | 0,43 | 4,14% |
| ble21 | 0,64 | 0,22 | 0,66% |
| mixte21 | 0,86 | 0,27 | 1,90% |
| autre14 | 2,51 | 2,51 | 0,22% |
| autre13 | 2,24 | 2,24 | 0,32% |
| autre12 | 1,68 | 1,68 | 0,48% |
| autre24 | 1,54 | 1,54 | 0,04% |
| autre23 | 1,38 | 1,38 | 0,15% |
| autre11 | 1,05 | 1,05 | 0,69% |
| autre22 | 1,03 | 1,03 | 0,21% |
| autre21 | 0,64 | 0,64 | 0,15% |
| prairie11 | 0,40 | 0,40 | 4,64% |
| prairie12 | 0,40 | 0,40 | 5,44% |
| prairie13 | 0,40 | 0,40 | 4,31% |
| prairie14 | 0,40 | 0,40 | 2,67% |
| prairie21 | 0,40 | 0,40 | 1,99% |
| prairie22 | 0,40 | 0,40 | 2,51% |
| prairie23 | 0,40 | 0,40 | 1,77% |
| prairie24 | 0,40 | 0,40 | 1,09% |
| moyenne | 1,71 | 0,62 | |

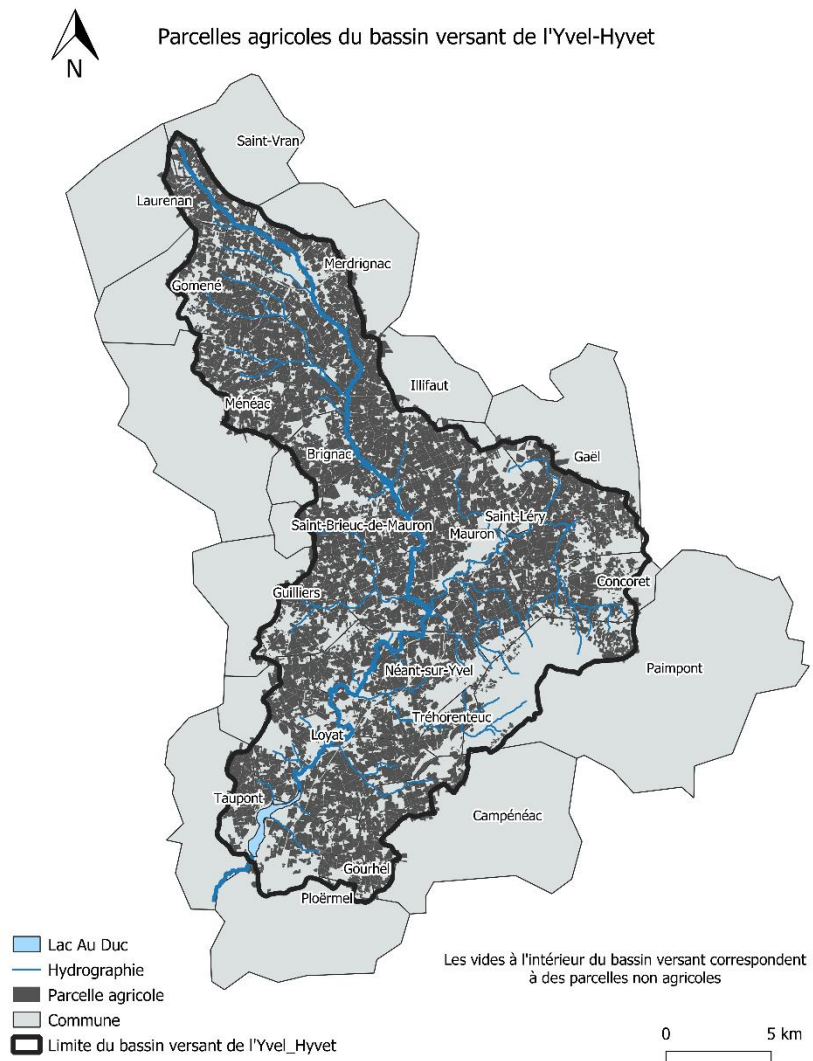
Annexe 3 : Comparaison des résultats du modèle APLE aux mesures de terrain



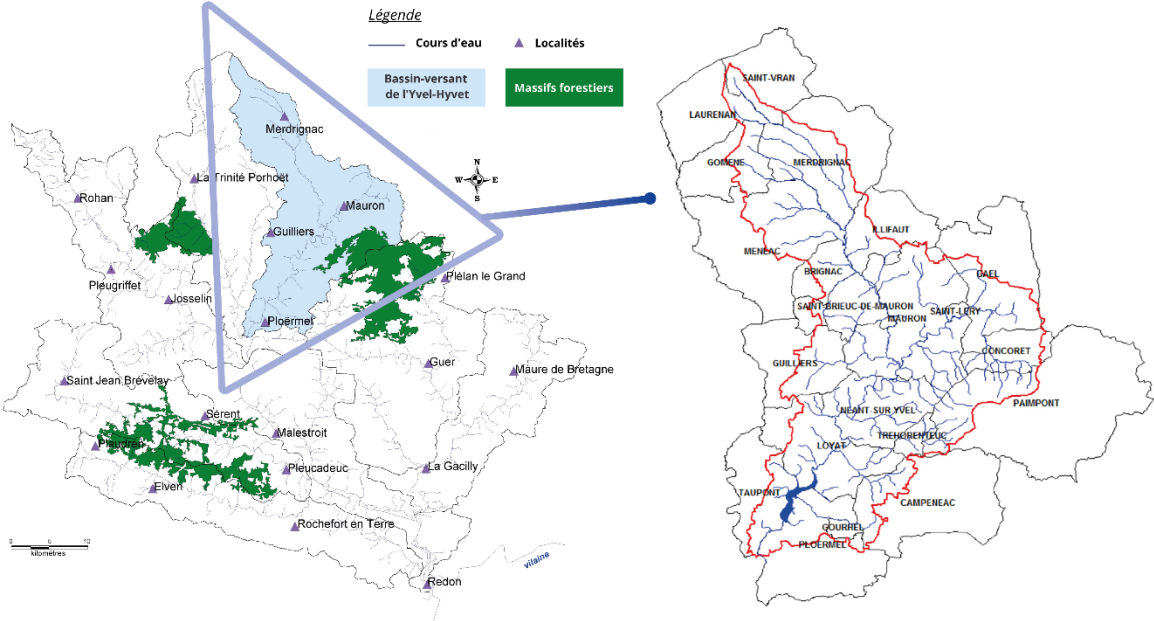
Annexe 4 : Carte des rotations de parcelles agricoles de l'Yvel-Hyvet



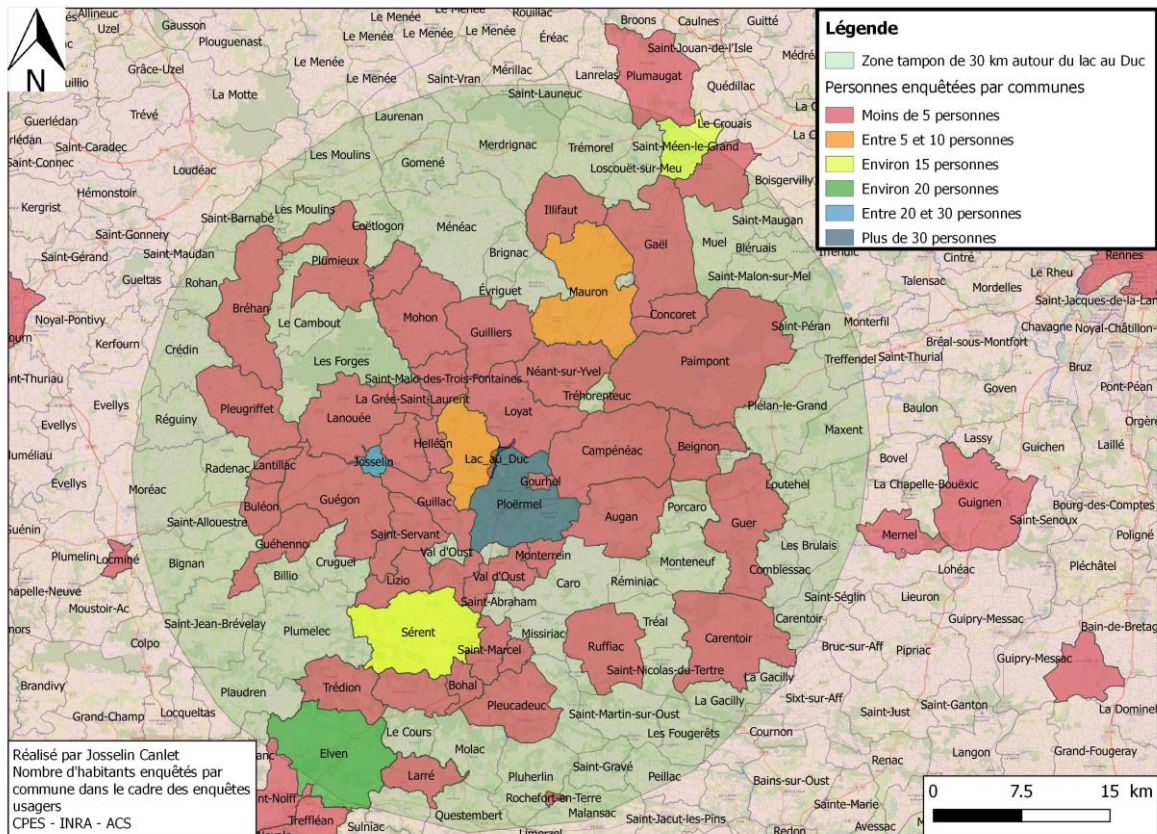
Annexe 5 : Carte des parcelles agricoles de l'Yvel-Hyvet



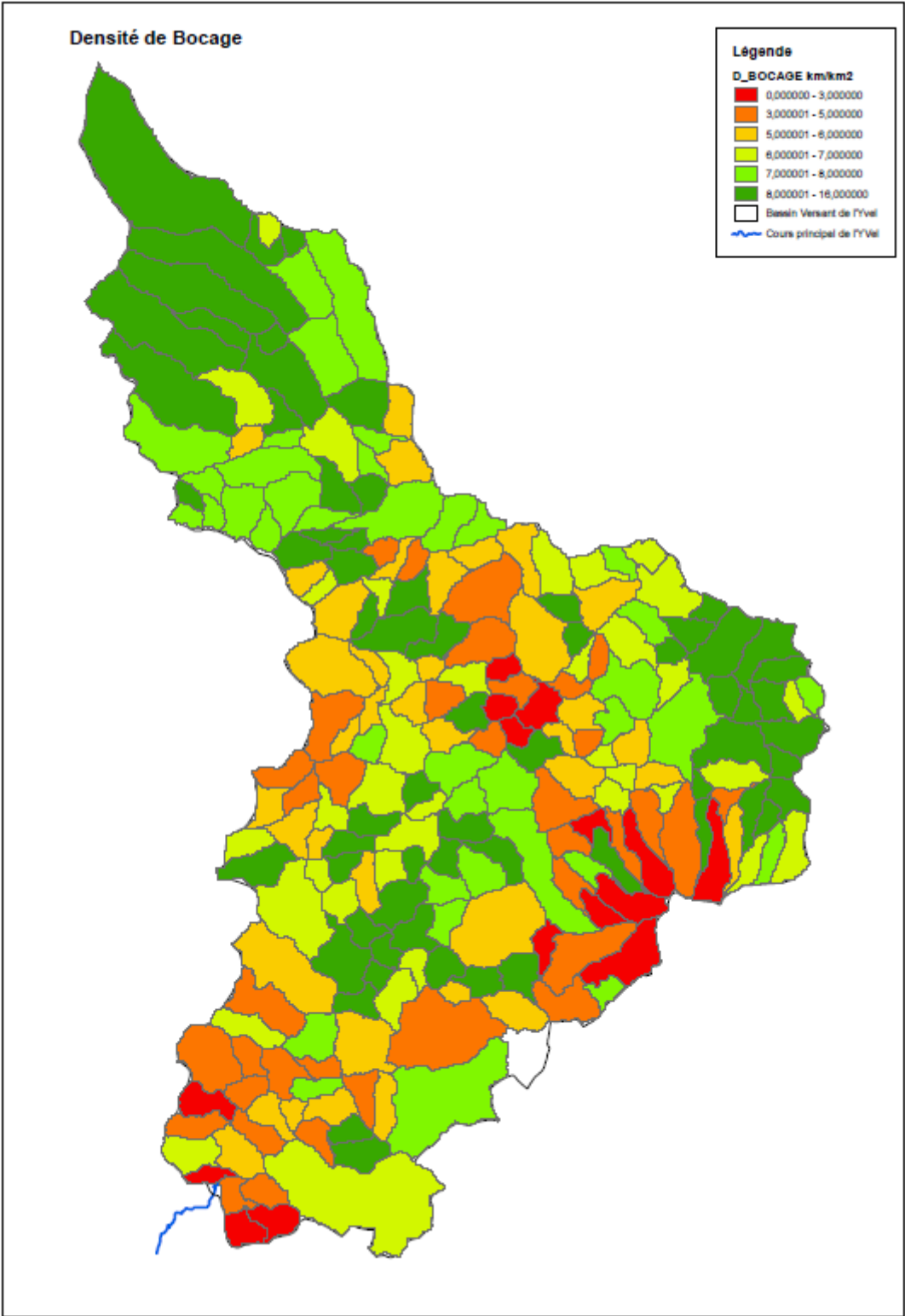
Annexe 5 : Localisation du bassin versant de l'Yvel-Hyvet



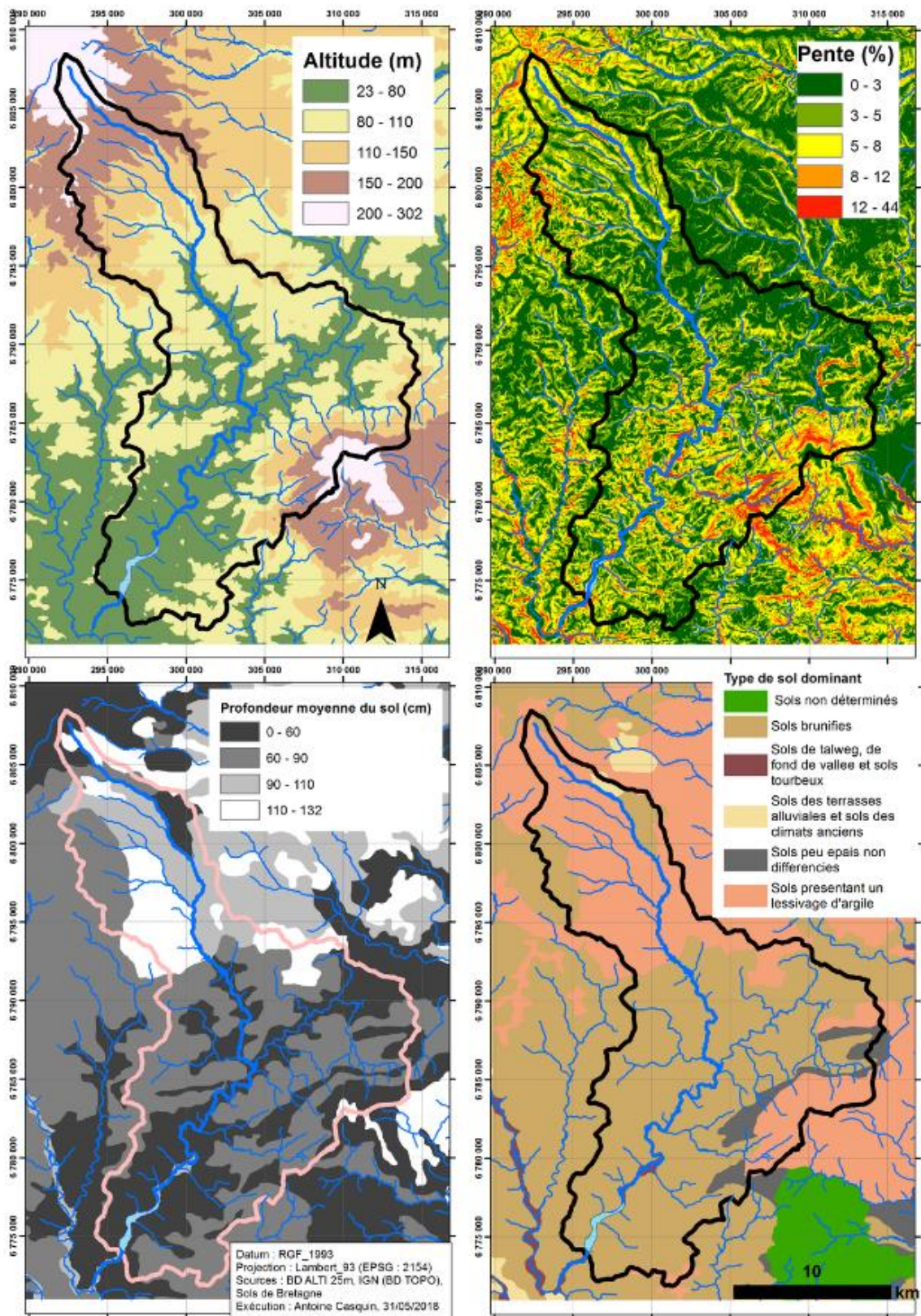
Annexe 6 : Nombre d'usagers enquêtés



Annexe 7 : Densité du bocage du bassin de l'Yvel-Hyvet



Annexe 8 : milieu physique du bassin de l'Yvel-Hyvet



Cartes détaillant le milieu physique du bassin-versant de l'Yvel-Hyvet (Source : INRA).

Annexe 9 : Sortie stata 1 (estimation du nombre de visite à partir de la distance entre les usagers et le lac et la distance entre les usagers et la mer)

```
. reg nbre_visite i.csp2#c.distance_km i.csp2#c.distance_mer
```

| Source | SS | df | MS | | | |
|----------|------------|-----|------------|-----------------|--------|--|
| Model | 7454.26899 | 6 | 1242.37817 | Number of obs = | 243 | |
| Residual | 48780.3977 | 236 | 206.6966 | F(6, 236) = | 6.01 | |
| Total | 56234.6667 | 242 | 232.374656 | Prob > F = | 0.0000 | |
| | | | | R-squared = | 0.1326 | |
| | | | | Adj R-squared = | 0.1105 | |
| | | | | Root MSE = | 14.377 | |

| nbre_visite | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|---------------------|-----------|-----------|-------|-------|----------------------|-----------|
| csp2#c.distance_km | | | | | | |
| 1 | -.4691514 | .2959631 | -1.59 | 0.114 | -1.052219 | .1139157 |
| 2 | -.4384297 | .1355561 | -3.23 | 0.001 | -.7054843 | -.1713752 |
| 3 | -.816409 | .1824593 | -4.47 | 0.000 | -1.175866 | -.4569519 |
| csp2#c.distance_mer | | | | | | |
| 1 | .1417817 | .1493262 | 0.95 | 0.343 | -.152401 | .4359643 |
| 2 | .0198459 | .0903392 | 0.22 | 0.826 | -.1581284 | .1978203 |
| 3 | .1489284 | .1235547 | 1.21 | 0.229 | -.0944825 | .3923394 |
| _cons | 19.99164 | 4.643762 | 4.31 | 0.000 | 10.84312 | 29.14016 |

Annexe 10 : Sortie stata 2 (estimation du nombre de visite à partir de la distance entre les usagers et le lac)

```
. reg nbre_visite i.csp2#c.distance_km
```

| Source | SS | df | MS | | | |
|----------|------------|-----|------------|-----------------|--------|--|
| Model | 6899.65639 | 3 | 2299.88546 | Number of obs = | 243 | |
| Residual | 49335.0103 | 239 | 206.422637 | F(3, 239) = | 11.14 | |
| Total | 56234.6667 | 242 | 232.374656 | Prob > F = | 0.0000 | |
| | | | | R-squared = | 0.1227 | |
| | | | | Adj R-squared = | 0.1117 | |
| | | | | Root MSE = | 14.367 | |

| nbre_visite | Coef. | Std. Err. | t | P> t | [95% Conf. Interval] | |
|--------------------|-----------|-----------|-------|-------|----------------------|-----------|
| csp2#c.distance_km | | | | | | |
| 1 | -.3413466 | .1956783 | -1.74 | 0.082 | -.726821 | .0441277 |
| 2 | -.5427068 | .1120659 | -4.84 | 0.000 | -.7634699 | -.3219438 |
| 3 | -.6836452 | .1313176 | -5.21 | 0.000 | -.942333 | -.4249574 |
| _cons | 22.77803 | 1.815931 | 12.54 | 0.000 | 19.20076 | 26.35531 |



Diplôme : Master
 Spécialité : Economie Appliquée : Agriculture, Mer, Environnement (E2AME)
 Spécialisation / option :
 Enseignant référent : ROPARS – COLLET Carole

| | | |
|--------------------------------------|---------------|--|
| Auteur(s) : HOUENOU HOUNSINO Maixent | | Organisme d'accueil : Agrocampus Ouest Adresse : 65, rue de Saint-Brieuc CS 84215 35042 – Rennes cedex France Maître de stage : LE GOFFE Philippe |
| Date de naissance* : 17 Mars 1993 | | |
| Nb pages : 40 | Annexe(s) :12 | |
| Année de soutenance :2019 | | |

Titre français : Analyse coût-bénéfice de la réduction des flux de phosphore dans un bassin versant : Cas de l'Yvel-Hyvet et du Lac Au Duc

Titre anglais : Cost-benefit analysis of the reduction of phosphorus fluxes in a watershed: Case of Yvel-Hyvet and Lac Au Duc

Résumé :

Cette étude intervient dans le cadre du projet INTERREG Channel Payments for Ecosystem Services (CPSE). Ce projet vise notamment à mettre en place des PSE au niveau des agriculteurs situés dans le bassin versant de l'Yvel-Hyvet pour la fourniture de services environnementaux en direction du Lac Au Duc situé en aval du bassin. L'objectif de cette étude est de montrer qu'il y a un gain au ciblage et à la différenciation des paiements dans le cadre de la mise en place de paiements pour services environnementaux (PSE). Notre étude s'appuie notamment sur des enquêtes qui ont permis de révéler par la méthode des choix expérimentaux les consentements à payer d'agriculteurs du bassin versant et consentements à recevoir d'usagers du Lac Au Duc. A l'aide d'outils de simulations nous avons mesuré l'efficacité et testé différentes combinaisons de mesures permettant d'atteindre des niveaux de dépollution donnés. Il en ressort qu'il y a bien un gain au ciblage et à la différenciation de paiements. Face au problème d'eutrophisation du Lac Au Duc il y a bien une demande suffisante pour inciter à la production de services environnementaux.

Abstract

This study is part of the INTERREG Channel Payments for Ecosystem Services (CPES) project. This project aims to implement payments for environmental services at the level of farmers located in the Yvel-Hyvet catchment area for the provision of environmental services to the Lac Au Duc located downstream of the catchment. The aim of this study is to show that there is a gain in the targeting and differentiation of payments in the context of the implementation of payments for environmental services (PES). Our study is based on surveys that have made it possible to reveal by the experimental choice method the consent to receive from farmers in the watershed and willingness to pay from lake users. Using simulation tools, we measured efficiency and tested different combinations of measures to achieve given clearance levels. Results show that there is a gain in the targeting and differentiation of payments. Facing the Lac Au Duc eutrophication problem, there is a enough demand to encourage the production of environmental services

Mots-clés : eutrophisation, phosphore, choix expérimentaux, PSE, Lac Au Duc, APLE
Key Words: eutrophication, phosphorus, choice experiments, PSE, Lac Au Duc, APLE

