

**Evaluation économique de l'offre et de la demande de services
environnementaux sur le lac au Duc**

C. Ropars-Collet

INSTITUT AGRO, INRAE, SMART, 35000, Rennes, France

Ph. Le Goffe

INSTITUT AGRO, INRAE, SMART, 35000, Rennes, France

M. Houesnou

INSTITUT AGRO, INRAE, SMART, 35000, Rennes, France

R. Dupas

INRAE, INSTITUT AGRO, SAS, 35000, Rennes, France

A. Caquin

INRAE, INSTITUT AGRO, SAS, 35000, Rennes, France

Auteur pour la correspondance :

Carole ROPARS-COLLET

UMR SMART, Institut Agro Rennes-Angers

65 rue de Saint-Brieuc CS 84215

35042 Rennes cedex

Email : carole.ropars@agrocampus-ouest.fr

Téléphone : +33 (0)2 23 48 56 91

Evaluation économique de l'offre et de la demande de services environnementaux sur le lac au Duc

1. Contexte

Depuis les années 1970, la prolifération des cyanobactéries est la manifestation la plus problématique de l'eutrophisation du Lac Au Duc, un plan d'eau artificiel de 3,5 millions de m³ situé en aval du bassin versant de l'Yvel-Hyvet d'une superficie de 37 412 ha, et à cheval sur les départements des Côtes d'Armor, d'Ille et Vilaine et du Morbihan. Le lac couvre une superficie de 250 ha (4,8 km de longueur pour une largeur maximale de 600 m et une profondeur moyenne de 2,6 m) et se prolonge par une zone humide de 800 m. Le phénomène d'eutrophisation du lac s'explique par un apport important de phosphore (P). Cet apport provient essentiellement des parcelles agricoles situées en amont du bassin. La surface agricole utile (SAU) (23 480 ha) du bassin versant représente 62% de la superficie totale du bassin versant ce qui en fait un bassin essentiellement agricole, avec une majorité de d'exploitations laitières au nord et au sud, et des élevages hors sol de porcs et de volailles à l'ouest et au centre. Les études menées sur ce BV font état d'un apport en phosphore excédentaire par rapport aux besoins des cultures (Moisan et al. 2010). Cet excès de phosphore stocké dans le sol est transféré via le réseau hydrographique et s'accumule dans le lac situé en aval du bassin notamment lors de fortes pluies (Moisan et al. 2010). Le phosphore est le principal facteur limitant du développement de cyanobactéries et du phénomène de l'eutrophisation du lac. 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). En France, on estime qu'environ la moitié du flux annuel de phosphore dans les cours d'eau provient de sources diffuses agricoles. En Bretagne, cette contribution est d'environ 70%. Sur le lac, les apports liés à l'agriculture représentent 90% du total de l'enrichissement en P, avec l'érosion des sols comme cause principale. La moitié des 325 exploitations de ce BV présente un bilan de P excédentaire.

La préservation de la qualité de l'eau 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 pour la production d'eau potable. De plus, de nombreuses activités récréatives sont pratiquées sur le lac : baignade, activités nautiques, pêche. La gestion du risque sanitaire de l'eau se base sur deux seuils d'alerte exprimés en concentration de toxines et en

nombre de cellules de cyanobactéries par millilitre (Ministère Chargé des Affaires Sociales et de la Santé 2012). L'ARS procède à un contrôle bimensuel (comptage cellulaire des cyanobactéries). Lorsque le seuil de 20 000 cellules/millilitre (niveau d'alerte 1) est dépassé, le contrôle devient hebdomadaire. En cas de dépassement du seuil de 100 000 cellules/millilitre, l'ARS mesure en plus 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 (+/- 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 (+/- 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

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 microcystines dépasse le seuil de 13 µg/l, à plus ou moins 5% (LEVI et al. 2006). En ce qui concerne les normes sanitaires encadrant le prélèvement pour la production d'eau potable, le plan d'eau ne peut plus servir à la production d'eau potable lorsque la concentration en microcystine-LR est supérieure à 1µg/l. En cas d'exposition chronique ce seuil est abaissé à 0,1 µg/l (LEVI et al. 2006). ???

Si les problèmes d'eutrophisation sont présents depuis plus de 40 ans sur le lac, les premières actions de reconquête de la qualité de l'eau sont engagées dans les années 90 avec pour objectif premier de lutter contre les nitrates. Entre 1991 et 2006, le programme Bretagne Eau Pure a été mis en place sur le BV. Cette période correspond à la mise en place des premiers contrats territoriaux orientés vers la restauration des milieux aquatiques et la lutte contre les pollutions diffuses. Plusieurs associations de protection de l'environnement sont créées en 1996 et fédérées par l'association du Grand Bassin de l'Oust (GBO) en 2011, aujourd'hui Syndicat Mixte du GBO (SMGBO). En 2002, un premier comité de suivi de la qualité de l'eau liée aux cyanobactéries est mis en place. En 2009, le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Loire-Bretagne identifie le Lac Au Duc comme un plan d'eau exposé au risque d'eutrophisation. Entre 2014 et 2018, les actions de reconquête de la qualité de l'eau ont été

prises en place dans le cadre d'un contrat territorial (Contrat de Plan Etat-Région) visant explicitement l'enjeu phosphore sur le BV.

La prolifération des cyanobactéries est la manifestation la plus problématique de l'eutrophisation du lac au Duc. Pour l'éviter, une des solutions envisagées consisterait à réduire notablement les flux de phosphore de toutes origines (industrielle, urbaine, agricole, etc.). S'agissant du phosphore d'origine agricole, des Mesures Agro Environnementales et Climatiques (MAEC) spécifiques ont déjà été proposées pour réduire les flux, notamment en limitant l'érosion. Cependant, elles touchent aujourd'hui trop peu d'agriculteurs et de surfaces pour atteindre les objectifs de réduction nécessaires. Faire le point sur les MAEC, les SAU engagées etc... D'où l'idée de réfléchir à un système plus adapté localement et plus incitatif, sous forme de Paiements pour Services Environnementaux (PSE). Ainsi, notre travail s'inscrit dans le cadre du projet INTERREG CPES (Chanel Payments for Ecosystem Services) (2018-2020) ayant pour objectif entre autres de comprendre l'ensemble des mécanismes à l'origine du transfert de phosphore à l'échelle du bassin versant de l'Yvel-Hyvet et d'encourager les pratiques agricoles permettant une réduction des flux de phosphore. L'objectif est de fournir un cadre permettant de procéder au dimensionnement et à la mise en place de contrats de paiement pour services environnementaux (PSE) à l'échelle du bassin hydrographique, d'en évaluer a priori le coût et l'efficacité du point de vue de l'état écologique du lac et des services qu'il fournit. L'offre et la demande de services environnementaux ont été mesurées sur le lac au Duc avec comme objectif de répondre à la question : est-il rentable socialement de réduire l'eutrophisation sur le lac au Duc ? Autrement dit, selon les niveaux de réduction de la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant ciblés, les bénéfices des usagers permettent-ils de couvrir les coûts de mise en place des mesures supportées par les agriculteurs ?

Nous avons eu recours à la méthode des expériences de choix (dire pourquoi, parmi toutes les méthodes) pour générer des comportements hypothétiques et caractériser l'offre et la demande de services environnement sur le BV. Une enquête a été menée auprès des agriculteurs du BV où des contrats de PSE fictifs leur étaient proposés, chacun différent par les attributs techniques et de prix. Ainsi, nous avons identifié quels attributs techniques pouvaient être présentés aux agriculteurs pour réduire le flux de phosphore rentrant dans le lac au Duc. Puis nous avons estimé les coûts d'adoption par les agriculteurs du BV du lac de ces différents attributs techniques. L'objectif a par la suite été de quantifier les coûts de réduction des émissions diffuses de P agricole en fonction des objectifs de réduction du flux de P entrant dans le lac pour ensuite évaluer le coût de différents scénarios de réduction incluant ou non le ciblage des

parcelles agricoles (ciblage géographique des parcelles les plus contributrices aux transferts de phosphore à l'échelle du BV, ciblage des parcelles coûts-efficaces). L'intérêt de cette analyse était d'orienter les mesures sur certaines zones du BV le plus coût efficace. Les objectifs de réduction des flux de phosphore à atteindre ont été déterminés en fonction des usages récréatifs souhaités sur le lac (baignade, pêche, activités nautiques). Pour cela, une enquête auprès des habitants de la zone d'attraction du lac a été conduite.

Cet article présente successivement une section sur l'évaluation de l'offre de services environnementaux sur le BV, puis une section sur l'évaluation de l'efficacité et les coûts de mise en place des mesures agricoles de réduction des flux de phosphore à l'échelle du bassin versant, et enfin une section sur l'évaluation de la demande de services environnementaux avant de conclure.

2. Evaluation de l'offre de services environnementaux sur le lac au Duc

La mesure de l'offre de SE sur le lac au Duc passe par la révélation des coûts de réduction des proliférations de cyanobactéries sur le lac. Ces coûts correspondent aux coûts des pratiques agricoles permettant de réduire les flux de phosphore. Une enquête auprès des agriculteurs du bassin de l'Yvel Hyvet a été mise en place pour révéler leurs préférences vis-à-vis de ces pratiques et d'en évaluer les coûts. Cette enquête porte uniquement sur le volet préventif de réduction des flux de phosphore par les agriculteurs du bassin versant de l'Yvel Hyvet. La méthode de révélation des préférences retenue a été celle des expériences de choix où les agriculteurs enquêtés ont eu à choisir entre plusieurs scénarios, correspondant à des contrats de PSE fictifs, combinant différents niveaux d'attributs techniques et de prix.

Conception du questionnaire pour l'expérience de choix

Choix des attributs

Ces attributs techniques correspondent aux mesures et pratiques agricoles identifiées comme permettant de réduire les flux de phosphore. La sélection de ces mesures s'est faite au travers de nombreux échanges entre chercheurs en sciences du sol, 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). Certaines mesures retenues se sont basées sur les études et expériences déjà réalisées par le SMGBO. La teneur en phosphore du

sol et le ruissellement à la surface du sol étant, à dire d'experts, le principal mécanisme de mobilisation du phosphore dans les BV agricoles, les attributs techniques capables de réduire le flux de P transféré par ruissellement et érosion dans le contexte du BV du lac au Duc, retenus sont :

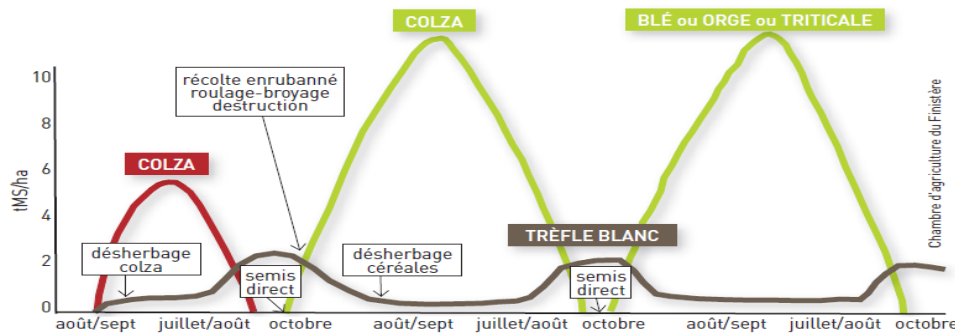
- L'arrêt de la fertilisation minérale phosphatée

Des analyses effectuées au niveau des sols du bassin versant montrent que la majeure partie des sols est en excédent de phosphore (P) pour environ 50% des exploitations agricoles, notamment dans la partie sud du bassin versant ainsi que dans une petite partie de l'amont. L'excédent est en partie provoqué par l'apport d'engrais minéral. Recourir aux engrais minéraux contenant du phosphore s'avère donc inutile. Ces engrais sont utilisés notamment sous la forme de starter pour la culture du maïs, pour permettre aux plantes de se développer plus rapidement dans les premières périodes de leur croissance (Moisan et al. 2010 ; Austruy, 2012). L'arrêt de la fertilisation minérale vise à diminuer la teneur en phosphore directement au niveau du sol et cible ainsi la source du flux érosif.

- La mise en place de couverts végétaux permanents

Cette mesure, également appelée semis sous couvert permanent, permet de lutter contre l'érosion des sols. Elle consiste à semer une culture sous un couvert déjà en place (Figure 1). Bien que connue d'un grand nombre d'agriculteurs, cette technique reste très peu utilisée. En effet, sa mise en place requiert des compétences techniques spécifiques. Elle présente donc des risques pour les cultures. Elle peut même s'avérer particulièrement néfaste pour le rendement de certaines cultures comme le maïs. A contrario, elle semble plus compatible avec des cultures comme le colza ou le blé. Le semis sous couvert assurant une couverture permanente du sol est pratiqué sur certaines parcelles du BV en dehors des parcelles en maïs lesquelles représentent entre 20 et 25% de la SAU du BV selon les années (19% de la SAU des exploitations enquêtées, cf. Tableau 2).

Figure 1 : Fonctionnement du semis direct sous couvert



Source : Chambre d'Agriculture du Finistère, 2019

- L'implantation 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 déterminantes dans leur capacité à réduire la quantité d'eau ruisselante (Austruy, 2012). En effet, pour une efficacité maximale, le linéaire de haies antiérosives doit être placé de façon perpendiculaire à la pente en limite de parcelle et être suffisamment large pour que le cours d'eau ne puisse pas facilement contourner le linéaire. Les parcelles des exploitations agricoles étant concomitantes, une mise en place efficace de cette mesure doit impliquer une coopération à l'échelle du territoire. La densité bocagère du bassin versant est de 69 mètres de haies /ha et seulement 30% de ce bocage a un rôle antiérosif avéré (Gérard et al. 2011). Pour les exploitations enquêtées sur le BV, elle est de 42 mètres par ha (Tableau 2).

Ces trois mesures de réduction des flux de phosphore ont été retenues comme attributs des contrats de PSE expérimentaux proposés aux agriculteurs. Nous avons également ajouté des attributs sur les modalités du contrat, à savoir la durée d'engagement dans le contrat et le paiement. Afin de permettre aux agriculteurs enquêtés d'estimer plus facilement le coût d'adoption des mesures par rapport à leur situation actuelle, les paiements proposés portent sur toute la SAU, même si la mesure n'est mise en place que sur une partie, il s'agit donc de paiements systèmes. Ces montants / ha de SAU sont censés couvrir des coûts annuels, c'est-à-dire de fonctionnement, à l'exclusion des coûts d'investissement. Pour les haies, ces montants sont censés couvrir les coûts d'entretien et les pertes de rendements (effets de bordure, etc.). Pour fixer ces montants, nous nous sommes inspirés des aides MAEC proposées par la région dans le bassin de l'Oust. En effet, il existe des MAEC pour les haies et la couverture des sols.

Les montants proposés dans le cadre cette expérience ont été fixés après échanges avec des agriculteurs du BV de l'Hyvel et le SMGBO.

Les attributs et modalités d'attributs retenus pour les expériences de choix sont les suivants :

- La mise en place d'un couvert végétal¹ : 20%, 40%, 60%, 80% de la SAU
- La mise en place de haies antiérosives selon des niveaux de densité² : 40m, 70m, 100m par ha de SAU
- L'utilisation de fertilisants minéraux phosphatés³: Autorisé et Interdit
- La durée d'engagement du contrat selon les modalités : 4 ans et 8 ans
- La rémunération sur l'ensemble de la SAU: 100€, 200€, 300€, 400€ par ha de SAU

Design expérimental et questionnaire

Les alternatives sont des contrats de PSE fictifs construits en faisant varier les modalités des six attributs sélectionnés. Pour chaque occasion de choix proposée, l'agriculteur enquêté pouvait choisir entre trois alternatives : le contrat PSE 1, le contrat PSE 2 (chacun de ces deux sites fictifs étant définis par des niveaux d'attributs différents), ou encore ne choisir aucun des contrats proposés (alternative dite de statu quo). Un plan d'expérience factoriel complet comprend l'ensemble des alternatives qui peuvent être construites en combinant les modalités des divers attributs. Ainsi avec 2 attributs à 4 modalités, 2 à 2 modalités et 1 à 3 modalités, un plan factoriel complet correspond à 192 ($2^2 \times 4^2 \times 3^1$) combinaisons possibles. Ce nombre d'occasions de choix a été réduit à 24 (éclatés en 3 blocs) en utilisant un plan factoriel fractionnel, sans alternative dominante (design D-efficient à 92%). Ces plans d'expériences ont été réalisés sous SAS en utilisant les procédures *mktex* et *mkruns*. Trois versions du











¹ Ce couvert prend la forme de prairies et/ou de parcelles cultivées avec du semis direct sous couvert permanent. L'implantation de ce couvert se fait sur 2 ans (moitié du couvert implantée la 1^{ère} année, et l'autre moitié la 2^{ème} année). Dans le cas d'un investissement pour un semoir spécifique, il a été indiqué aux enquêtés de faire l'hypothèse que celui-ci serait pris en charge à 100 % *via* d'autres financements. Les bandes enherbées réglementaires ne sont pas prises en compte dans ce couvert végétal permanent.

² Il a été indiqué aux enquêtés que les haies antiérosives implantées doivent être des haies avec talus, ce qui limite l'érosion des sols (implantation perpendiculaire à la pente, etc.). Les coûts de création de ces haies sont subventionnés à 100% *via* d'autres financements. Seuls les coûts d'entretien sont à la charge de l'agriculteur, avec l'obligation d'un entretien minimum tous les 5 ans.

³ Il a été indiqué aux enquêtés qu'aucune autre interdiction n'est envisagée dans ces contrats. Ils sont libres d'utiliser des fertilisants minéraux azotés, des produits phytosanitaires, etc., dans la limite des seuils réglementaires autorisés.

questionnaire ont été créées. Pour chaque version, huit occasions de choix étaient proposées aux agriculteurs. Le tableau 1 présente une occasion de choix.

Tableau 1 : Exemple d'une occasion de choix proposée aux agriculteurs enquêtés

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"/>

La première partie du questionnaire porte sur les caractéristiques de l'exploitation agricole et de l'agriculteur, sur les pratiques agricoles actuelles de l'agriculteur et leurs impacts sur la qualité des eaux du territoire. La deuxième partie présente les ensembles de choix. Il est précisé aux agriculteurs de supposer que pour les expériences présentées, les contrats expérimentaux de PSE ne peuvent pas se cumuler avec des MAEC mais n'ont pas d'impact sur les autres aides perçues de la PAC. Les enquêtés devaient également faire l'hypothèse que pour les contrats proposés, ils seraient accompagnés d'un point de vue technique et administratif.

Enquête et description de l'échantillon

Les enquêtes ont été menées par 6 enquêteurs en face-à-face dans les exploitations après prise de rendez-vous téléphonique entre juin et juillet 2018. Des enquêtes en ligne ont également été menées sur la période de novembre 2018 à janvier 2019. 52 agriculteurs ont été enquêtés (dont 4 en ligne) sur environ 350 (ou 280 ?) agriculteurs ayant une SAU supérieure à 10 ha sur le BV. Près de 18,5% des agriculteurs du BV ont donc été enquêtés représentant 20 % de la SAU totale du BV. Les statistiques descriptives de l'échantillon enquêté sont présentées sur le tableau 2. (Discuter de la représentativité de cet échantillon)

Tableau 2 : Caractéristiques de l'échantillon des agriculteurs enquêtés

Variable		
Genre (homme)		85 %
Age	20-29 ans	2 %
	30-39 ans	19 %
	40-49 ans	25 %
	50-59 ans	42 %
	60-69 ans	10 %
	70-79 ans	2 %
Niveau de formation	Sans diplôme	6 %
	CAP / BEP	23 %
	Bac Pro	21 %
	BTS	37 %
	Licence	2 %
	Master	2 %
	Autre	10 %
Nombre moyen d'Unités de Travail Annuel sur l'exploitation	Familiales	1,57
	Salariées	0,34
Type d'exploitation	Exploitation individuelle	23%
	EARL	37 %
	GAEC	31 %
	SCEA	6 %
	SARL	2 %
Membre d'une coopérative agricole		69 %
Membre d'une autre structure	CUMA	60 %
	Syndicat agricole	15 %
	CETA	4 %
	Autre	6 %
Labélisation AB		19 %
En cours de conversion AB		2 %
Type de production		
Bovins seuls	Bovins lait	54 %
	Autres bovins	21 %
Monogastriques	Porc	15 %
	Volailles	17 %
	Porc + Volailles	6 %
Bovins + monogastriques	Bovin + porc	8 %
	Bovin + volailles	10 %
Autres productions		4 %
Cultures seules		8 %
Type de production végétale	Prairies temporaires	81 %
	Prairies permanentes	69 %
	Blé tendre	65 %

	Maïs ensilage	56 %
	Orge	48 %
	Maïs grain	37 %
	Colza	37 %
	Triticale	33 %
	Légumes	13 %
	Luzerne	10 %
	Féverole	10 %
	Avoine	10 %
	Soja	6 %
Surface moyenne (ha)		90,3
Surface totale des agriculteurs enquêtés sur le BV (ha)		4 695
Part des terres en propriété		40 %
Part des productions végétales des exploitations enquêtées dans la SAU du BV	Prairie	43 %
	Maïs	19 %
	Céréales à paille	26 %
	Colza	4 %
	Légumes	5 %
	Protéagineux	1 %
	Autres	2 %
Linéaire moyen de haies sur l'exploitation (km)		3,8
Participation au programme Breizh Bocage		46 %
Linéaires de haies implantés dans le cadre du Programme Breizh Bocage (km)		1,8
Souhait d'implanter des haies dans les prochaines années		16 %
Raisons évoquées de ne pas implanter de haies	Entretien des haies	71 %
	Achat et installation de haies	5 %
	Accord des propriétaires	17 %
	Accord des voisins	10 %
	Déjà suffisamment de haies	25 %
	Départ en retraite	7 %
	Autre	12 %
Connaissance du semis direct sous couvert permanent		81 %
Pratique du semis direct sous couvert permanent		12 %
Utilisation de phosphore minéral		38 %
Exploitation à l'équilibre sur la fertilisation azotée		78 %
Participation à des échanges d'effluents entre agriculteurs		58 %
Souscription à une MAEC		27 %
Raisons évoquées de ne pas souscrire à une MAEC (% des non souscripteurs)	Prix pas incitatif	21 %
	Trop de contraintes administratives	37 %
	Pas adapté à l'exploitation	26 %
	Pas assez d'accompagnement	11 %
	Manque d'information sur MAEC possibles	18 %
	Autres	8 %
Connaissance des problèmes d'eutrophisation du lac au Duc		88 %

Mise en place de mesures pour diminuer l'impact sur la qualité de l'eau les 10 dernières années dont :	92 %
Semis direct sous couvert permanent sur une partie de la SAU	28 %
Augmentation des prairies dans la SAU	36 %
Réduction ou arrêt de la fertilisation minérale	47 %
Réduction de la fertilisation organique	26 %
Augmentation de la densité de haies sur les parcelles	51 %
Mise en place de bandes enherbées plus larges sur les parcelles	47 %
Changement dans l'alimentation des animaux d'élevage	34 %
Changement dans les pratiques de travail du sol	51 %
Restauration de zones humides dans l'exploitation	21 %
Autre	13 %
Cours d'eau sur l'exploitation	94 %
Linéaire de cours d'eau moyen sur l'exploitation (km)	1,6
Surface moyenne de bandes enherbées sur l'exploitation (ha)	2,08
Surface moyenne de zones humides sur l'exploitation (ha)	3,21
Existence de parcelles à risque d'érosion	31 %
Problèmes récurrents de :	
Sècheresse	46 %
Parasites et rongeurs	50 %
Mauvaises herbes	62 %
Fertilité des sols	25 %
Changements importants sur l'exploitation sur les 10 dernières années	67%
dont :	
Mise en place de techniques culturales simplifiées	54 %
Construction de bâtiments	37 %
Achat de terres	46 %
Nouvel atelier	11 %
Souscription à une MAEC	26 %
Conversion à l'agriculture biologique	14 %
Arrêt d'un atelier	14 %
Changements importants sur l'exploitation sur les 10 prochaines années	71 %
dont :	
Mise en place de techniques culturales simplifiées	20 %
Construction de bâtiments	23 %
Achat de terres	23 %
Nouvel atelier	14 %
Souscription à une MAEC	6 %
Conversion à l'agriculture biologique	6 %
Arrêt d'un atelier	11 %
Départ en retraite	60 %
Nombre d'observations	52

Modèle économétrique

Dans la méthode des expériences de choix, les individus enquêtés font face à plusieurs occasions de choix. A chaque occasion, ils doivent choisir entre plusieurs alternatives hypothétiques et mutuellement exclusives. Basée sur la théorie du consommateur de Lancaster (1966), l'analyse des préférences des individus suppose que l'utilité individuelle associée au choix de l'alternative j dans l'occasion de choix t se décompose en une partie linéaire dans les paramètres et dépendant de variables observées (les attributs), et un terme d'erreur. Pour l'individu i , l'alternative j est préférée à l'alternative h dans l'occasion de choix t , si elle lui apporte une plus grande utilité.

Le modèle logit conditionnel est le modèle standard utilisé où l'utilité que retire l'individu i en choisissant l'alternative j pour l'occasion de choix t est donnée par :

$$V_{ij} = U(X_{ij}/\beta_i) + \varepsilon_{ij} \quad , \quad \forall j \neq h$$

Où β_i est le vecteur des paramètres, X_{ij} est le vecteur des attributs observés par l'individu i pour l'alternative j de l'occasion de choix t . Les termes d'erreur ε_{ij} sont supposés indépendants et identiquement distribués selon une loi de valeurs extrêmes. Cette hypothèse conduit à la propriété d'indépendance des alternatives non pertinentes qui signifie que le rapport des probabilités de choix de deux alternatives est indépendant de l'introduction ou de la suppression d'une alternative.

La probabilité que l'individu i choisisse l'alternative j dans l'occasion de choix t s'écrit :

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

Les β_k sont les paramètres associés à l'attribut k , et β_p celui associé à l'attribut prix pour l'individu i . Le paramètre associé 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 l'individu i . 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 :

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

Déterminants des choix des agriculteurs

Après avoir présenté les occasions de choix aux agriculteurs enquêtés, nous leur avons demandé d'évaluer la difficulté à choisir entre les alternatives de l'expérience de choix, sur une échelle de 1 (très facile) à 10 (très difficile). Le niveau moyen de difficulté perçue est de 5,04 (avec un écart-type 2,6). 23% des agriculteurs enquêtés ont refusé tous les contrats de PSE proposés dans l'expérience. Pour 100% de ces derniers, ce choix est guidé par le fait de ne pas vouloir implanter de nouvelles haies, et pour les trois quarts les contrats proposés sont jugés trop contraignants, pour la moitié le prix rémunérateur n'est pas assez incitatif (tableau 3). Deux tiers des agriculteurs enquêtés pensent que la mise en place de couvert végétal aura un impact positif sur les rendements La mise en place de haies antiérosives est estimée avoir un effet positif sur les rendements pour un tiers d'entre eux à 5 ans, et pour la moitié d'entre eux à dix ans.

Tableau 3 : Raisons évoquées pour lesquelles aucun des contrats de PSE proposés dans l'expérience n'a été choisi

Je ne souhaite pas implanter de nouveaux couverts dans mon exploitation	58 %
Je ne souhaite pas implanter de nouvelles haies dans mon exploitation	100 %
Le prix rémunérateur proposé n'est pas assez incitatif	50 %
Les PSE proposés ne sont pas crédibles	42 %
Les PSE proposés sont trop contraignants	75 %
Je préfère conserver les MAEC que j'ai actuellement	25 %
Autres	17 %

Tableau XXX : Estimation par les agriculteurs des effets potentiels de différentes mesures sur les rendements

	Impact positif	Impact négatif	Pas d'impact
Mise en place d'un couvert végétal			
à 5 ans	67 %	22 %	11 %
à 10 ans	71 %	19 %	10 %
Arrêt d'utilisation du phosphore minéral			
à 5 ans	19 %	49 %	32 %
à 10 ans	16 %	51 %	33 %
Mise en place de haies antiérosives			
à 5 ans	36 %	22 %	42 %
à 10 ans	48 %	32 %	20 %

Résultats des modèles estimés

Les résultats des estimations des modèles de choix à partir des données d'enquête auprès des agriculteurs du BV sont présentés dans le tableau 5. Un modèle logit conditionnel et un modèle logit panel à paramètres aléatoires ont été estimés en intégrant comme variables explicatives les six attributs spécifiques. A l'exception de l'attribut « durée du contrat », les cinq autres ont été traités comme des variables continues. Une constante spécifique à l'alternative (CSA) statu quo a été introduite afin de capter l'utilité procurée par le fait de ne choisir aucun des contrats proposés. Puisque aucune autre constante n'a été introduite, celle-ci permet de mesurer l'utilité que procure le choix du statu quo par rapport au choix de l'alternative 1 ou 2. Avec le modèle LPA, on fait l'hypothèse que les préférences relatives aux attributs des contrats de PSE proposés, sont hétérogènes entre les individus enquêtés. D'ailleurs, le résultat du test du ratio des log-vraisemblances (test LR (6) = 2010,67 (0,00)) signifie que l'on peut rejeter l'hypothèse de nullité de tous les écarts-types estimés des paramètres aléatoires. Les préférences des agriculteurs enquêtés quant aux attributs des contrats proposés sont bien hétérogènes. En plus du modèle LPA, nous avons estimé un modèle logit conditionnel. Ceci est justifié par le fait de pouvoir utiliser plus facilement les résultats d'estimation pour estimer pour les agriculteurs du BV les coûts d'adoption des pratiques visant à réduire les flux de phosphore, de quantifier les coûts de réduction des émissions de phosphore agricole en fonction d'objectifs de réduction du flux de phosphore, puis enfin évaluer les parcelles du BV les plus coûteuses efficaces. Le modèle LC suppose que la propriété d'indépendance des alternatives non pertinentes (IIA) soit vérifiée. Ceci a été testé à l'aide du test d'Hausman-Mc Fadden (Hausman et Mc Fadden, 1984). Les choix « PSE 1 », « PSE 2 » et « Statu quo » ont été successivement enlevés de l'échantillon. Les résultats du test, présentés dans le tableau de l'Annexe 1, indiquent que l'hypothèse IIA est bien vérifiée, ce qui conduit à des estimations consistantes. Comme le montrent les résultats du modèle LPA, les préférences relatives aux attributs décrivant les contrats de PSE ne sont pas forcément homogènes entre les agriculteurs enquêtés. Par conséquent dans le modèle LC, nous avons considéré certaines caractéristiques individuelles des agriculteurs ou de leur exploitation, en les croisant avec les attributs.

La qualité d'ajustement des trois modèles est plutôt bonne, les tests du ratio de vraisemblance (test LR) indiquent que les modèles sont globalement significatifs

Pour le modèle LPA, les espérances estimées des coefficients des attributs techniques que sont le couvert végétal ou les haies antiérosives sont significatives (à 1% d'erreur) et négatifs, ces pratiques étant perçues comme des contraintes pour les agriculteurs. (discuter / tableau de statistiques descriptives). Par contre, les espérances estimées des coefficients des attributs portant sur l'interdiction de la fertilisation minérale phosphatée et de la durée du contrat ne sont pas significatives. En moyenne, l'interdiction de la fertilisation minérale phosphatée ou encore la durée du contrat ne sont pas des facteurs déterminants pour le choix d'un contrat PSE. L'abandon de la fertilisation ne nécessite aucun investissement. (discuter / tableau de statistiques descriptives). Enfin comme attendu, l'espérance estimée du coefficient de l'attribut « rémunération » est significatif et positif. Ainsi, plus la rémunération / ha de SAU est élevée, plus les agriculteurs enquêtés sont prêts à s'engager, et ce toutes choses égales par ailleurs. L'espérance de la constante spécifique à l'alternative *statu quo* n'est pas significative. Cependant l'écart-type de la CSA l'est à 1% d'erreur. Ainsi, en s'appuyant sur les caractéristiques de la distribution de la CSA, la valeur de cette constante est positive sur une partie de la distribution sur la population enquêtée et négative sur l'autre partie. Les préférences des agriculteurs enquêtés quant aux attributs sont bien hétérogènes. En particulier, les écarts types estimés des paramètres des attributs techniques et la rémunération/ha de SAU sont très significatifs, indiquant ainsi une forte hétérogénéité des préférences pour ces attributs d'intérêt. Par contre, les préférences sont homogènes quant à la durée du contrat.

Pour le modèle CL sans interaction, la constante spécifique à l'alternative *statu quo* est significative et positive dans le modèle sans interaction, ce qui suggère que pour les agriculteurs interrogés, conserver leurs pratiques actuelles apporte plus d'utilité que les contrats de PSE proposés. Les coefficients estimés relatifs aux attributs techniques que sont le couvert végétal ou les haies antiérosives sont significatifs (à 1% d'erreur) et négatifs, mais ceux relatifs à l'interdiction des fertilisants minéraux phosphatés et à la durée du contrat ne sont pas significatifs. Enfin comme attendu, plus la rémunération / ha de SAU est élevée, plus les agriculteurs enquêtés sont prêts à s'engager, et ce toutes choses égales par ailleurs.

La prise en compte de l'hétérogénéité des préférences par l'introduction des caractéristiques individuelles des agriculteurs en enquêtés et de leur exploitation, croisées avec les attributs et la CSA a permis d'améliorer la qualité d'ajustement du modèle. Le niveau de formation semble être un facteur déterminant, les agriculteurs les moins diplômés étant plus réticents à contractualiser. Le type de production sur l'exploitation détermine également la volonté de

contractualiser ou non. Ainsi, il apparaît que les exploitations ayant seulement des cultures sont beaucoup plus réticentes à s'engager dans un contrat PSE. Ceci est certainement à mettre en lien avec un besoin de main d'œuvre plus important pour ces exploitations. La culture du maïs semble être particulièrement contraignante pour la mise en place de couvert végétal. Ceci est probablement à mettre en lien avec la difficulté technique que constitue la maîtrise des couverts végétaux sous maïs et les risques de perte de rendement en cas de non maîtrise de ces compétences techniques. Les agriculteurs ayant une part de prairie permanente dans la SAU plus élevée sont moins réticents à la mise en place de couverts végétaux permanents, mais trouve plus contraignants l'implantation de haies antiérosives. D'autres interactions ont été testées mais non significatives. Notamment, il n'est pas apparu de différences significatives dans le fait de ne pas s'engager ou dans les préférences pour les attributs proposés avec l'âge de l'exploitant, la souscription ou non à une MAEC, pour les agriculteurs en AB, selon le type d'assolement.

Le modèle Logit conditionnel suppose l'hypothèse IIA vérifiée. Cette hypothèse a été testée à l'aide du test Hausman-McFadden (Hausman et McFadden, 1984). Les choix « PSE 1 », « PSE 2 » et « Statu quo » ont été retirés à tour de rôle de l'échantillon. Les résultats du test présentés dans le tableau de l'annexe 1, indiquent que l'hypothèse IIA est vérifiée, ce qui donne des estimations cohérentes.

Tableau 5 : Résultats des estimations des modèles logit conditionnel (LC) et logit à paramètres aléatoires (LPA)

Variables	Paramètres estimés			
	LC	LC avec interactions	LPA	
			Espérance	Ecart-type
CSA (<i>statu quo</i>)	0,867* (0,489)	0,810* (0,5304)	0,182 (0,755)	2,021** (0,452)
% de SAU sous couvert végétal	-2,649*** (0,448)	-2,336*** (0,552)	-5,770*** (1,103)	-4,30*** (0,884)
% de SAU sous Couvert végétal # % Maïs dans la SAU		-4,745*** (1,567)		
% de SAU sous Couvert végétal # % Prairie permanente dans la SAU		3,355** (1,682)		
Mètre/ha de haies antiérosives	-0,013*** (0,004)	-0,007* (0,004)	-0,026*** (0,007)	0,017*** (0,004)
Mètre/ha de Haies antiérosives # % Prairie permanente dans la SAU		-0,059*** (0,016)		
Interdiction Fertilisant minéral phosphaté	0,104 (0,182)	0,099 (0,186)	0,152 (0,328)	1,516*** (0,388)
Durée du contrat	0,043 (0,192)	0,076 (0,196)	0,275 (0,287)	-0,338 (0,204)
Rémunération/ha de SAU	0,007*** (0,000)	0,007*** (0,000)	0,009*** (0,002)	0,007*** (0,001)
Nb obs. (Nb ind. X 3 alt. X 8 ens. de choix)	1224	1224	1224	
Log Vraisemblance	-342,90	-326,46	-265,88	
Test LR	210,67 (0,00)	243,55(0,00)	263,74 (0,00)	
Pseudo R²	0,235	0,272	0,331	

***, **, * désignent les variables significatives au seuil de 1%, 5% et 10 % respectivement.

Les écart-types estimés figurent entre parenthèses.

Le tableau 3 présente les consentements à recevoir de l'agriculteur pour chaque attribut, excepté ceux relatifs à la durée du contrat et à l'interdiction de la fertilisation minérale phosphaté car non leurs coefficients sont non significatifs. Nous les avons seulement calculés à partir des modèles LC, car ce sont ces résultats qui sont utilisés pour la simulation des mesures sur la zone d'étude. Les attributs « couvert végétal permanent » et « haies antiérosives » sont traités comme

des variables continues dans la régression. Concernant la CSA, l'utilité marginale pour l'agriculteur de garder ses pratiques actuelles et de ne pas s'engager dans un contrat s'interprète ici comme un paiement incitatif de base pour s'engager et correspondant à un coût fixe par ha de SAU, quelles que soient les mesures retenues. Ainsi, pour s'engager dans un contrat, un agriculteur n'ayant que des cultures comme production devrait recevoir 313€/ha de SAU et ce avant même d'avoir choisi les pratiques qu'il souhaite mettre en place.

Tableau 3 : Estimation des CAR pour les pratiques agricoles à mettre en place dans le cadre d'un contrat PSE

	Consentements à recevoir	
	Modèle LC	Modèle LC avec interactions
Paiement de base (€/ha de SAU)	123,85 ***	121,10***
CAR (€/ha de SAU) pour la mise en place de couvert végétal permanent par % de SAU couverte	3,78 ***	3,49 ***
CAR supplémentaire (€/ha de SAU) pour la mise en place de couvert végétal par % Maïs dans la SAU		0,07 ***
CAR (€/ha de SAU) supplémentaire pour la mise en place de couvert végétal par % Prairie permanente dans la SAU		-0,05 ***
CAR (€/ha de SAU) par mètre/ha de haies antiérosives implantées	1,86 ***	1,11 ***
CAR (€/ha de SAU) supplémentaire pour l'implantation de haies antiérosives implantées par % Prairie permanente dans la SAU		0,01 ***

Evaluation de l'offre agrégée

Nous avons cherché à évaluer l'efficacité et les coûts de mise en place des mesures agricoles de réduction des flux de phosphore à l'échelle du bassin versant. L'efficacité des mesures diffère selon la typologie des parcelles mais aussi le coût des mesures. Nous avons cherché à spatialiser et classer les parcelles du BV en fonction des rotations culturales, de la pente et de la profondeur des sols, mais aussi en calculant la réduction de P/ha selon les mesures mises en place. L'idée est ensuite de les classer selon le rapport efficacité-coût des mesures (qui s'avère différent du classement basé sur la seule efficacité).

Evaluer l'effet de la mise en place de couvert végétal permanent et de la suppression d'apport de P minéral

L'efficacité de la mise en place de couvert végétal permanent et de la suppression d'apport de P minéral a été évalué à l'aide de l'outil de modélisation APLE (Annual Lost Phosphorus Estimator) permettant de quantifier sur un pas de temps annuel les transferts de P provenant de trois sources (P contenu dans le sol, les apports de fertilisants organiques et les apports minéraux) selon le type de sols. Il nous permet donc simplement de modéliser l'impact des différentes mesures agricoles retenus dans le cadre de notre étude (DUPAS 2014,; Fiorellino et al. 2017). Cet outil permet de simuler les pertes annuelles de P sous formes particulières 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). Les paramètres à renseigner dans l'outil sur les caractéristiques du milieu concernent entre autres le sol (profondeur, P disponible pour la plante et le sol, teneur en argile et matière organique), la surface des parcelles, l'érosion, les précipitations, les quantités d'effluents organiques apportés, la quantité d'engrais minéral phosphaté apportée ainsi que la profondeur d'enfouissement, le prélèvement annuel de P.

Identifier des parcelles types

Dans le BV de l'Hyvel-yvet, on dénombre 9942 parcelles. Pour modéliser les pertes de phosphore sur les parcelles agricoles du BV en tenant compte de leurs caractéristiques pédologiques et des assolements⁴, il a fallu les classer à partir des données du Registre parcellaire Graphique (RPG) sur la période 2013-2017, nous permettant de prendre en compte

⁴ Le modèle APLE permet également de renseigner la présence d'activités d'élevage. Cependant nous n'avons pas d'informations sur la spatialisation des activités d'élevages. Il nous a été impossible d'identifier les parcelles du BV sur lesquelles sont pratiquées des activités d'élevage.

les rotations de cultures représentatives des systèmes de production. Quatre types parcelles ont été identifiés : (1) parcelles avec rotations « mixte⁵ » (alternance entre cultures d'hiver représentées le blé et cultures d'été représentées par le maïs), (2) parcelles avec rotations « blé⁶ » (représentatives des cultures d'hiver), (3) parcelles en prairies, et (4) parcelles « autres » (rotations non identifiées représentant 2% de la SAU du BV).

A partir du Référentiel Régional Pédologique (RPP), nous avons également distingué les parcelles selon la profondeur du sol et le niveau d'érosion. Deux niveaux de profondeurs de sol ont été retenus : (1) parcelles avec une profondeur inférieure à 70 cm, (2) parcelles avec une profondeur supérieure à 70 cm. Quatre niveaux d'érosion ont été définis. Chaque niveau est représenté par sa valeur médiane. Les données d'érosion ont été converties en t/ha. Ainsi les niveaux d'érosion médians sont 0,25 t/ha (1), 0,48 t/ha (2), 0,72 t/ha (3) et 0,84 t/ha. Ainsi, un profil de parcelle varie en fonction de l'assolement (4 types), de la profondeur du sol (2 niveaux) et du niveau d'érosion (4 niveaux). Seules les parcelles arables (réparties dans les deux classes de rotations) ont été renseignées dans le modèle. En effet, les mesures agricoles qu'on cherche à évaluer ne devraient être mises en place qu'au niveau des parcelles arables. Des valeurs d'exportations fixes de P ont été retenues pour les parcelles « prairies ». Concernant les parcelles autres, des valeurs ont été fixées sur la base de recommandation de spécialistes en sciences du sol. On obtient alors 25 profils de parcelles : 16 profils de parcelles arables, 8 profils de parcelles « autres » et 1 profil pour les prairies.

Pour modéliser la suppression d'apports minéraux dans APLE, 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. L'un des indicateurs permettant d'évaluer l'impact des systèmes de production sur le niveau d'érosion des sols est le Cfactor où $Cfactor = Ccrop * Cmanagement$. La valeur de Ccrop dépend du type de culture et diffère donc d'une parcelle à l'autre. La valeur de Cmanagement vaut pour toute la Bretagne 0,289. Mais la valeur minimale que peut prendre ce coefficient est 0,058. En considérant qu'en l'absence de mesure, la valeur de Cmanagement est 0,289 et qu'après mise en place de couvert végétal permanent et suppression d'apports de minéraux phosphatés, cette valeur passe à 0,058, alors le changement de pratique agricole conduit à une division du niveau d'érosion par 5 ($0,289/0,058$). Nous avons retenu cette valeur

⁵ Les rotations « mixte » sont identifiées en retenant les parcelles où la culture maïs a été observée plus de trois fois sur la période 2013-2017.

⁶ Les rotations « blé » sont identifiées en retenant les parcelles où la culture maïs a été observée moins de trois fois sur la période 2013-2017.

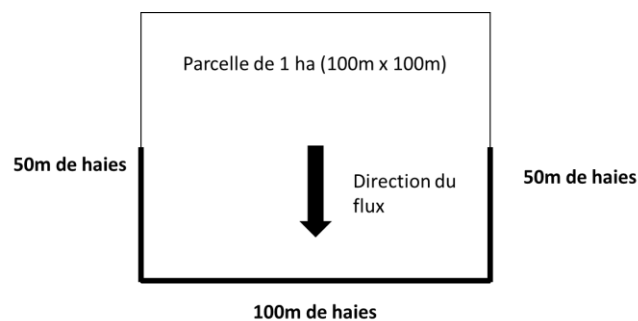
pour modéliser l'effet de la mise en place de couvert végétal et la suppression d'apports minéraux phosphatés.

Les 16 profils de parcelles arables sont renseignés avant et après mise en place du couvert végétal et suppression des apports minéraux phosphatés. Les simulations des parcelles « blé » ont été effectuées en renseignant dans le modèle chaque année la culture de blé pendant 50 ans. Celles des parcelles « mixte » ont été effectuées en alternant chaque année blé et maïs pendant 50 ans. 32 simulations ont donc été réalisées. Le modèle permet d'obtenir les émissions de phosphore en kg/ha/an pendant 50 ans (1994 à 2043). Pour chaque profil de parcelle, nous avons calculé une valeur moyenne (sur 30 ans) des émissions de phosphore en kg /ha avant et après mise en place des mesures⁷. Cette moyenne d'émission a été pondérée par le % des profils de parcelles dans la SAU totale du BV. Cette moyenne pondérée représentant l'émission de P dans le BV a été calculée avant et après mise en place des mesures.

Evaluer l'effet des haies antiérosives

Concernant l'efficacité des haies antiérosives, nous avons fait des hypothèses assez frustes. Nous avons supposé que 100m de haies permet de couvrir un côté d'une parcelle d'1ha de dimension 100m sur 100m. Cependant, même si la haie est placée perpendiculairement à la pente, son efficacité est réduite si elle n'est pas assez large car elle peut être contournée par les affluents. On ne peut donc pas lui attribuer une efficacité à 100%. Mais si avec 200m de haies bien répartis sur les côtés d'une parcelle de 1 ha et formant une sorte de réservoir (figure 6), on arrive complètement à bloquer le flux de P (efficacité de 100%), alors on peut supposer que pour 100m de haies antiérosives, l'efficacité est de 50%.

Figure 2 : Hypothèse sur l'efficacité des haies



⁷ Plus que les valeurs absolues, ce sont les coefficients de réduction (coefficient d'abattement) qui nous intéressent ici.

Simuler des combinaisons de mesures permettant de réduire la concentration de P à l'exutoire du BV

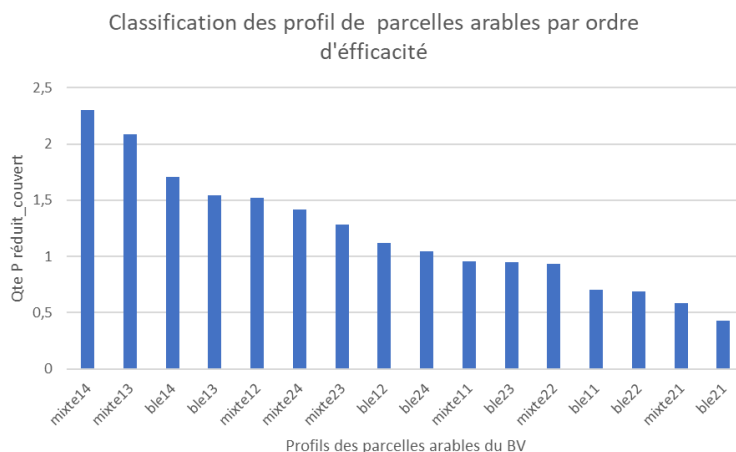
Le niveau d'émission de phosphore avant toute mesure est noté P_1 . Le niveau d'émission de phosphore après mise en place de couvert végétal et suppression d'apport de minéraux phosphatés est noté P_2 . Le coefficient d'abattement de ces deux mesures est P_1/P_2 . Après en plus de la mise en place de ces deux mesures, si on ajoute des haies, alors le niveau d'émission de phosphore final P_3 est $P_3 = P_2 * \text{coefficient d'abattement des haies}$, ce coefficient étant fonction de la longueur du linéaire de haies. Le coefficient d'abattement après mise en place des trois mesures est P_1/P_3 .

Différentes combinaisons de mesures (% de couvert végétal et suppression de P minéral associés ou non à des linéaires de haies antiérosives) ont été testées afin de déterminer les mesures les plus efficaces en terme de réduction des émissions de P pour chaque type de parcelles. Le graphique 8 présente la classification des profils de parcelles⁸ selon leur efficacité en terme de réduction des émissions de P après mesures.

L'émission de P à l'échelle du BV après mise en place des mesures est alors défini par : $P_{final} = \sum_{ni} P_{ni} \cdot \%SAU_{ni} + \sum_i P_i \cdot \%SAU_i$ où P_i est l'émission de P après mesures sur les parcelles i engagées et P_{ni} est l'émission de P pour les parcelles ni non engagées. $\%SAU_i$ et $\%SAU_{ni}$ sont les parts de parcelles engagées et non engagées dans la SAU totale du B. Le niveau de concentration de P pondéré par le débit actuel à l'exutoire du BV est de 100 $\mu\text{g/l}$. Ainsi en appliquant à cette valeur le coefficient d'abattement déterminé par une combinaison donnée de mesures, on peut calculer la concentration de P à l'exutoire du BV après mise en place des combinaisons de mesures. Sur chaque type de parcelles, nous avons testé différentes combinaisons de mesures et identifié pour chacune la plus efficace. Le graphique 8 présente les profils des parcelles selon leur efficacité en calculant pour chaque type de parcelle, la différence d'émission de phosphore avant et après mise en place de couvert végétal permanent et suppression d'apports minéraux (l'efficacité des haies ne variant pas selon le type de parcelles, leur prise en compte ne modifierait pas le classement des profils de parcelles).

⁸ « mixte13 » désigne une parcelle arable avec rotation mixte, où (1) correspond à une profondeur de sol inférieure à 70 cm et (3) à un niveau d'érosion de 0,72 t/ha.

Graphique 3 : Classification des parcelles arables du BV du Lac au Duc par ordre décroissant d'efficacité de réduction du flux de P suite à l'implantation d'un couvert végétal permanent (résultats issus du modèle APLE)



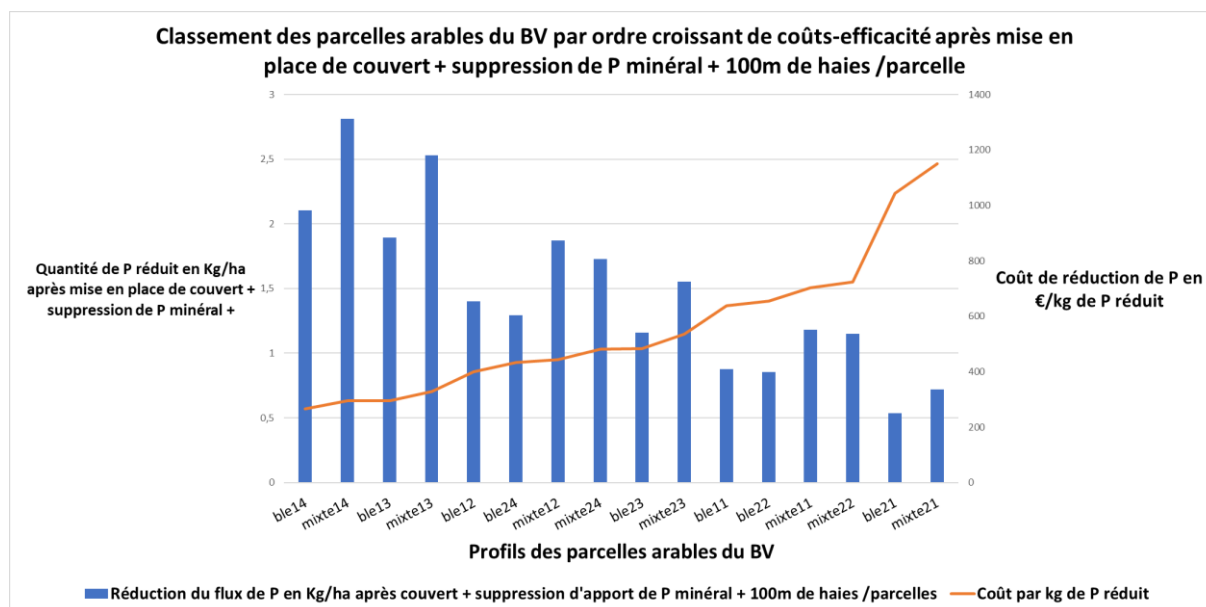
Les mesures diffèrent selon la typologie des parcelles, mais les coûts diffèrent à la fois selon les mesures et les systèmes de production des exploitations, ce qui rend complexe le calcul d'un coût pour chaque profil de parcelles. Cependant pour une additionnalité maximale, les paiements doivent être 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 et Klerch 2019). Les contrats de PSE proposés dans le CE sont rémunérés via des paiements systèmes. Ainsi, quelles que soient les mesures, il s'agit pour l'agriculteur d'une rémunération (CAR pour un changement de pratiques) par ha de SAU de l'exploitation agricole. L'idéal aurait été de regrouper les parcelles selon leurs appartenances aux différentes exploitations et calculer les coûts des mesures en tenant compte des SAU totales des différentes exploitations. Mais en procédant ainsi nous n'aurions pas pu les regrouper selon leurs profils respectifs et n'aurions pas pu les classer. Nous avons fait l'hypothèse que les parcelles arables du BV étaient réparties en deux exploitation, l'une constituée de parcelles en rotations « mixtes » et l'autre de parcelles en rotations « blé », ce qui nous permet de calculer des coûts unitaires par type de parcelle. Pour les parcelles « mixtes », nous avons considéré dans le modèle APLE une alternance chaque année entre la culture de blé et celle du maïs. Nous supposons donc que le maïs représente 50 % de la SAU des parcelles « mixtes ». En partant des résultats des estimations, les formules des coûts unitaires de mise en place de couvert végétal et de haies antiérosives sont les suivantes :

Coût/ha de parcelle « mixte » : $45 \text{ €/ha} + (3,06 + (0,09 \times 50)) \text{ €} \times 100 \text{ €/ha} + 1,1 \text{ €/ha}$ par mètre de haie/ha = $801 \text{ €/ha} + 1,1 \text{ €/ha}$ par mètre de haies /ha

Coût/ha de parcelle « blé » : $45 \text{ €/ha} + (3,06 \times 100) \text{ €/ha} + 1,1 \text{ €/ha}$ par mètre de haie/ha = $396 \text{ €/ha} + 1,1 \text{ €/ha}$ par mètre de haie/ha

Ainsi, pour chaque profil de parcelle un indicateur de coût-efficacité des mesures, réduction du flux de P après mise en place des mesures/coût des mesures, a été calculé, nous permettant un nouveau classement des différents types de parcelles arables du BV. Ce classement des parcelles a conduit à déclasser les parcelles mixtes très érosives mais contenant du maïs au profit des parcelles de même érodabilité mais cultivées uniquement en blé (Graphique 9). Les parcelles les plus coûteuses à gauche sont des parcelles présentant un risque d'érosion fort cultivées en blé.

Graphique 9 : Classement des parcelles arables du BV du lac au Duc selon un rapport coût-efficacité croissant de réduction du flux de P suite à l'implantation d'un couvert végétal permanent



Partant de ces classements, des scénarios coûts-efficacité de réduction du flux de P en entrée de Lac ont été construits en agréant à l'échelle du BV les simulations de réduction de flux à la

parcelle par implantation d'un couvert végétal permanent combiné avec différents linéaires d'implantation de haies. Nos scénarios montrent qu'il existe un gain économique à cibler certaines mesures et certains types de parcelles. Nous pouvons identifier les alternatives les moins coûteuses permettant d'atteindre des objectifs de dépollution. Cependant, il faut établir un lien entre le niveau de concentration de phosphore pondéré par le débit, l'état trophique du lac et le niveau d'attributs que peut offrir le lac. La concentration de Phosphore est l'un des paramètres classiquement utilisés pour mesurer l'état d'eutrophisation d'un plan d'eau. Le phosphore représente un facteur limitant au développement de cyanobactéries mais il est difficile d'établir une relation directe entre le niveau de concentration du phosphore et la densité des cyanobactéries dans l'eau. En effet la prolifération des cyanobactéries dépend d'une multitude de facteurs (température, Ph, luminosité), ainsi qu'à leur forte capacité d'adaptation (Austruy, 2012). Le tableau 4 présente les critères retenus pour la pratique des activités sur le lac.

Tableau 4 : Critères retenus pour la pratique des activités sur le lac au Duc

P total (µg/L)	Niveaux trophiques	Etats écologiques	Activités praticables
P < 25	Ultra-oligotrophe	Très bon	Baignade, Pêche, Activités nautiques
25 < P < 50	Oligotrophe	Bon	Pêche, Activités nautiques
50 < P < 100	Mésotrophe	Moyen	Activités nautiques
P > 100	Eutrophe	Médiocre	Aucune

En s'appuyant sur les références de l'étude 3 pour évaluer l'état trophique du lac au Duc (qui nous permettent de tester de multiples situations) et en prenant les critères du tableau 7 pour la pratique des activités, si l'on considère un niveau de concentration de phosphore pondéré par le débit actuel à l'exutoire du bassin versant de 100µg/l, alors :

- Une division par 5 de la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant, i.e. l'atteinte d'un seuil de 20µg/l, permettrait au lac d'atteindre un état ultra oligotrophe, rendant la pratique de la baignade, de la pêche et des activités nautiques possibles.
- Une division par 3 de la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant, i.e. l'atteinte d'un seuil de 33.33µg/l, permettrait au lac d'atteindre un état oligotrophe, rendant la pratique de la pêche et des activités nautiques possibles.

- Une division par 2 de la concentration de phosphore à l'exutoire du bassin versant, i.e. l'atteinte d'un seuil de 50µg/l, permettrait au lac d'atteindre un état mésotrophe, rendant seule la pratique des activités nautiques possible.

Simulation de mesures permettant de réduire le flux de P entrant dans le lac

Nous nous sommes fixés une division de la concentration de phosphore (P) à l'exutoire du bassin versant par 2, 3 et 5. Pour chacun de ces objectifs, nous présentons un scénario ciblant les parcelles les plus coûts-efficaces du point de vue de l'implantation d'un couvert végétal permanent et en maximisant le linéaire de haie sur ces parcelles (100m/ha) et un scénario moins contraignant sur le linéaire de haie et en enrôlant plus de parcelles, dont des parcelles moins coûts-efficaces du point de vue du couvert végétal. Les tableaux 5, 6 et 7 ainsi que les figures 11, 12 et 13 présentent les résultats des simulations pour chaque objectif de division du flux de P à l'exutoire du lac au Duc.

Tableau 5 : Comparaison de mesures pour une division par 2 à l'exutoire du lac au Duc

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

Figure 3 : Comparaison de mesures pour une division par 2 à l'exutoire du lac au Duc

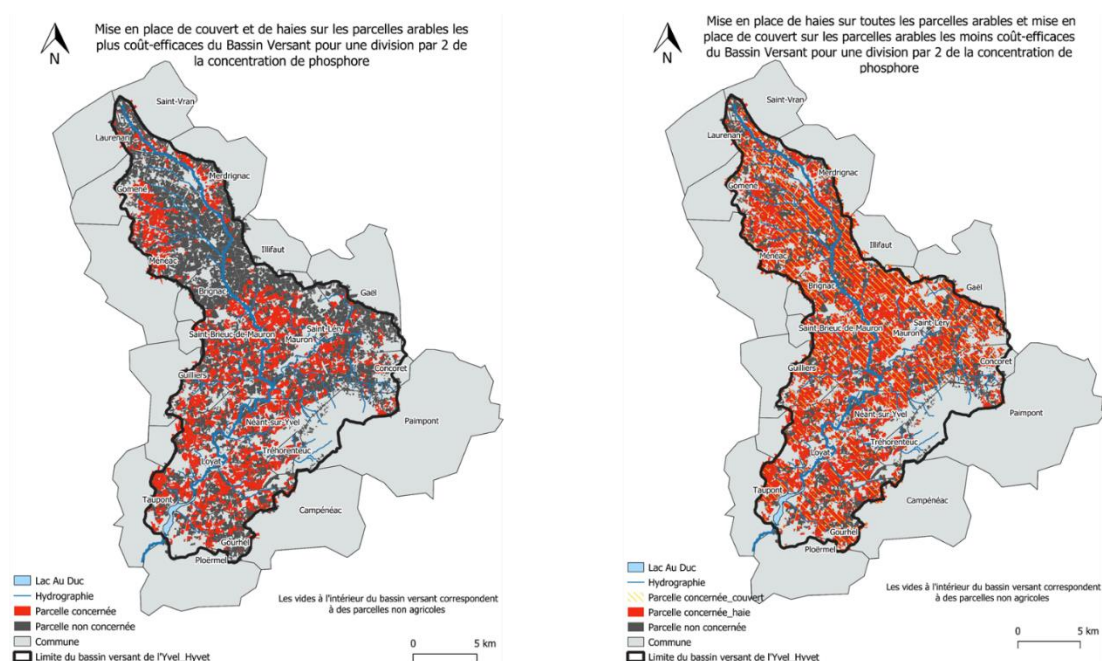


Tableau 6 : Comparaison de mesures pour une division par 3 à l'exutoire du lac au Duc

Approche	Ciblage (à gauche)	Non ciblage (à droite)
Mesure	(100m/ha de haies + couvert végétal) par parcelle	(37m/ha de haies + couvert végétal) par parcelle
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 total (€)	10 328 417	11 897 813
Activités praticables	Activités nautiques + Pêche	

Figure 4 : Comparaison de mesures pour une division par 3 à l'exutoire du lac au Duc

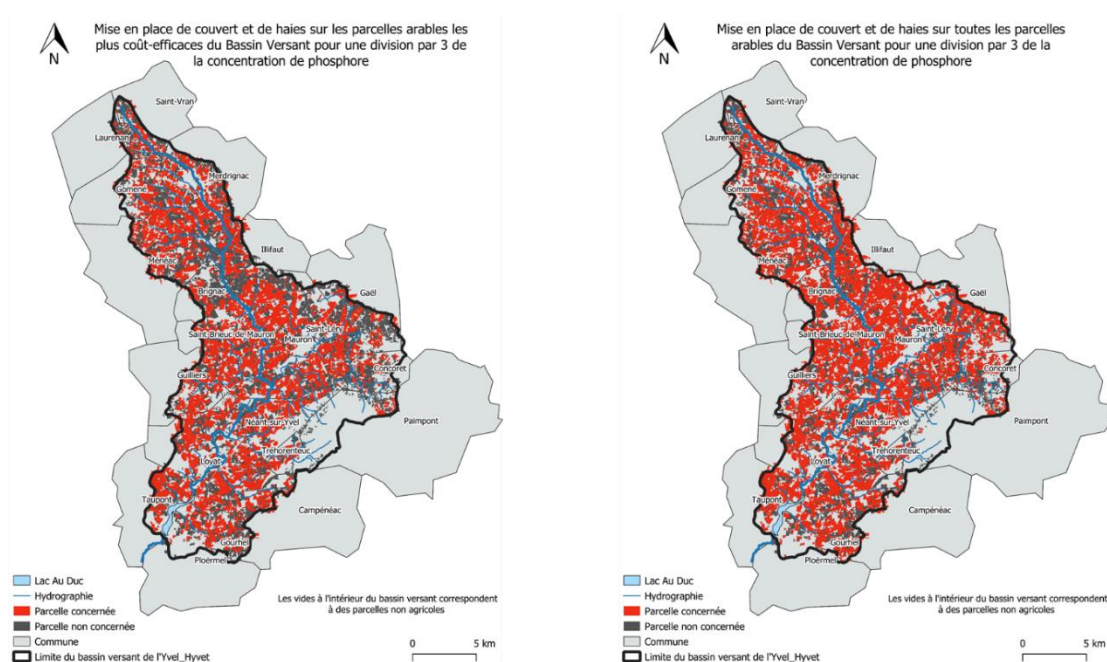
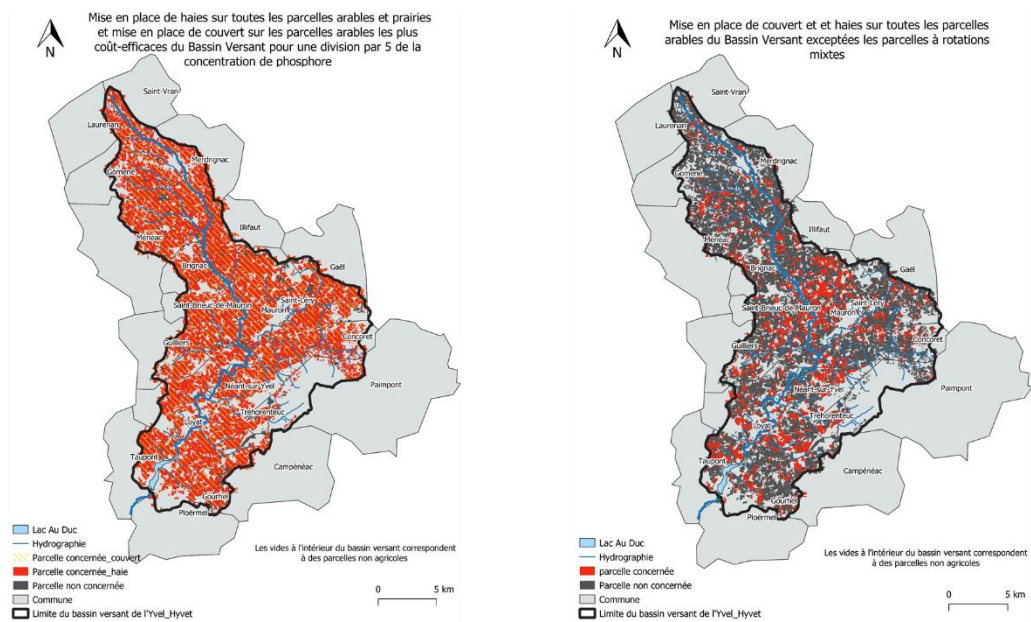


Tableau 7 : Division par 5 à l'exutoire du lac au Duc

Approche	Mesure extrême pour une division /5
Mesure	100m/ha de haies sur toutes les parcelles arables sauf mixte21 + couvert végétal sur toutes les parcelles arables et sur prairies
Parcelles concernées	Toutes les parcelles arables sauf mixte21 et toutes les parcelles en prairies
% Parcelles arables	97
% SAU	97,74
Coût total (€)	14 151 085
Activités praticables	Baignade, Pêche, Activités nautiques

Figure 5 : Comparaison de mesures pour une division par 5 à l'exutoire du lac au Duc



3. Evaluation de la demande services environnementaux sur le lac au Duc

Le Lac au Duc est un pôle d'attractivité pour les habitants de la région et les touristes. De nombreuses activités récréatives sont pratiquées sur le lac : baignade, activités nautiques et pêche. Les problèmes causés par l'eutrophisation et les cyanobactéries impactent de manière significative certaines de ces activités – interdiction de consommer des poissons, interdiction de se baigner, dégradation générale de l'état du lac, etc. La perte de bien-être à laquelle conduisent les interdictions d'usage dont sont victimes les usagers du lac a été évaluée. Pur cela, nous avons eu recours à la méthode des expériences de choix pour générer des comportements hypothétiques et caractériser la demande de services environnementaux sur le lac. Une enquête a été menée auprès des habitants des communes dans un périmètre de 30 km autour du lac. Le but de cette enquête était de connaître les préférences des enquêtés entre des lacs fictifs différents par les services récréatifs proposés, leur qualité écologique et la distance à parcourir depuis le domicile pour s'y rendre. Ces lacs fictifs n'ont pas de lien direct avec l'état actuel du lac au Duc, il s'agit ici avant tout de comprendre les usages que les répondants préfèrent et qui sont prioritaires pour eux.

Choix des attributs

Les attributs et modalités d'attributs retenus pour les expériences de choix sont les suivants :

- **Les activités récréatives accessibles sur le lac en fonction du taux de cyanobactéries.**
4 options vous seront proposées. Ces 4 choix sont liés aux taux de cyanobactéries des lacs fictifs qui vous seront présentés. Plus il y aura de cyanobactéries, plus le nombre d'activités récréatives possibles sur ces lacs sera réduit :
 - La baignade, la consommation de poissons et les activités nautiques sont autorisées ;
 - La baignade est interdite, la consommation de poissons et les activités nautiques sont autorisées ;
 - La baignade et la consommation de poissons sont interdites, les activités nautiques sont autorisées ;
 - La baignade, la consommation de poissons et les activités nautiques sont interdites
- **La présence d'installations touristiques autour du lac :** les installations touristiques comprennent des cafés, des restaurants, des jeux pour les enfants, etc. Trois niveaux sont proposés : présence **importante** d'installations touristiques (environ 8 ou 9 installations autour du lac), **moyenne** (aux alentours de 4 ou 5 installations) ou **faible** (1 ou 2 installations).
- **La qualité écologique du lac.** Nous parlons ici de la qualité écologique propre au lac, et non des alentours de ce dernier. 3 niveaux seront proposés :
 - **Qualité écologique du lac riche :** plusieurs espèces végétales menacées sont préservées, nombreuses espèces de faune (poissons) et de flore différentes dans le lac
 - **Qualité écologique du lac moyenne :** un ou deux espèces végétales menacées sont préservées, variété de faune (poissons) et de flore dans le lac moyenne;
 - **Qualité écologique du lac pauvre :** disparition des espèces menacées, peu de variété dans les espèces de faune (poissons) et de flore du lac
- **La présence ou non d'un sentier aménagé et entretenu** pour la promenade et la randonnée autour du lac (poubelles, panneaux d'informations, etc.)
- **La distance entre les lacs fictifs et le domicile :** 5 km, 20 km, 35 km ou 50 km.

Design expérimental et questionnaire

Avec 3 attributs à 3 modalités, 1 à 2 modalités et 1 à 4 modalités, un plan factoriel complet correspond à 216 ($3^3 \times 2^1 \times 4^1$) combinaisons possibles. Ce nombre d'occasions de choix a été réduit à 48 (éclatés en 6 blocs) en utilisant un plan factoriel fractionnel, sans alternative dominante. Six versions du questionnaire ont été créées. Pour chaque version, huit occasions de choix étaient proposées. A chaque choix présenté, les enquêtés doivent choisir le lac fictif vers lequel ils pourraient faire une sortie à la journée. Si aucun des lacs proposés ne convient, ils ont toujours la possibilité de n'en choisir aucun. Le tableau 11 présente une occasion de choix.






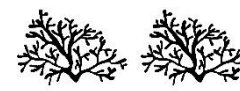




Choix 2	Lac 1	Lac 2	Aucun
Activités récréatives du lac : pêche, baignade et activités nautiques	Baignade et consommation de poissons interdites, activités nautiques autorisées 	Toutes activités interdites 	
Présence d'installations touristiques autour du lac	Moyenne 	Importante 	
Qualité écologique du lac	Riche 	Moyenne 	
Présence d'un sentier aménagé autour du lac	Oui 	Non 	
Distance entre le lac et votre domicile	5 km 	20 km 	
Je choisis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tableau 8 : Exemple d'une occasion de choix entre des lacs fictifs

La première partie du questionnaire porte sur les activités récréatives pratiquées par les enquêtés. La deuxième partie présente les ensembles de choix.

Data collection

L'enquête a été administrée par 15 enquêteurs sur une 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. Les CSP les plus représentées sont celles des retraités (25%) et des employés (25%).

Variable	Moyenne	Ecart-type
Nombre d'adultes dans le foyer	1.87	0.62
Nombre d'enfants dans le foyer	0.92	1.22

Variable	Proportion
Genre (Femme)	55%
Age	
Moins de 20 ans	5%
20-29 ans	14%
30-39 ans	15%
40-49ans	18%
50-59 ans	15%
60-69 ans	19%
70-79 ans	11%
Plus de 80 ans	2%
CSP	
Chef d'entreprise ou profession libérale	9%
Cadre ou profession intellectuelle supérieure	8%
Profession intermédiaire	7%
Employé	25%
Ouvrier	7%
Retraité	26%
Etudiant	7%
Chômeur	3%
Autre (RSA, autoentrepreneur, etc.)	9%
Revenus nets mensuels du foyer (%)	
< 1000 €	8%
1000 € - 1999 €	36%
2000 € - 2999 €	30%
3000 € - 3999 €	13%
4000 € - 4999 €	8%
> 5000 €	4%
Niveau de formation (%)	
Sans diplôme	5%
CAP / BEP	27%
Bac Pro	9%
Bac Général	8%
Bac+2	20%
Bac+3	10%
Bac+4	5%
Bac+5	8%
Autre	4%
Usagers du lac au Duc	81%
Activités et services récréatifs en lien avec le lac au Duc et ses environs	
Promenade/randonnée	28%
Sports nautiques	6%
Baignade	8%
Pêche	3%

	Plage artificielle	13%
	Structure de jeux enfant payante	22%
	Restaurant/bar	12%
	Autres	7%
Période de fréquentation du lac au Duc	Majoritairement d'octobre à mars	5%
	Majoritairement d'octobre à mars	55%
	Les deux indifféremment	40%
Fréquence de visites au lac au Duc parmi les usagers	Chaque semaine	12%
	Quelques fois par mois	29%
	Quelques fois par an	59%
Durée d'une sortie au lac au Duc	Moins d'une heure	7%
	Entre une et trois heures	67%
	Une demi-journée	21%
	Une journée entière	5%
Gêne lors des activités récréatives due à la présence de cyanobactéries	Oui, souvent	25%
	Oui, rarement	11%
	Non, jamais	56%
Perception de l'évolution de la qualité de l'eau sur le lac au Duc ces 10 dernières années	Améliorée	3%
	Détériorée	51%
	Sans avis	46%
Connaissance de la présence d'une usine d'eau potable près du lac au Duc	Oui	38%
	Non	61%
	Sans réponse	1%
Moyen de transport principal pour se rendre sur le lac au Duc	A pieds	10%
	Deux roues	3%
	Voiture personnelle	65%
	Transport en commun	1%
	Covoiturage	3%
	Autre	4%
	Sans réponse	14%
Fréquence de visite sur le littoral	Chaque semaine	10%
	Quelques fois par mois	27%
	Quelques fois par an	52%
	Jamais	11%
Fréquence de sorties à la piscine	Chaque semaine	10%
	Quelques fois par mois	11%
	Quelques fois par an	29%
	Jamais	49%
Nombre d'observations		285

Résultats d'estimation

Tableau 9 : Résultats d'estimation du modèle logit conditionnel

Variables	Paramètres estimés	
CSA (<i>statu quo</i>)	0,939*** (0,130)	0,940*** (0,131)
Sports nautiques autorisés (pêche et baignade interdites)	0,083*** (0,097)	0,223*** (0,105)
Sports nautiques autorisés (pêche et baignade interdites) ## Retraité		-0,555*** (0,174)
Sports nautiques et pêche autorisés (baignade interdite)	0,423*** (0,096)	0,540*** (0,106)
Sports nautiques et pêche autorisés (baignade interdite) ## Retraité		-0,420*** (0,166)
Toutes activités autorisées	1,031*** (0,096)	1,085*** (0,109)
Toutes activités autorisées ## Retraité		-0,536*** (0,172)
Toutes activités autorisées ## Inactif		0,781*** (0,251)
Présence faible d'installations touristiques	0,350*** (0,085)	0,354*** (0,085)
Présence moyenne d'installations touristiques	0,232*** (0,086)	0,238*** (0,087)
Qualité écologique riche	0,965*** (0,088)	0,977*** (0,089)
Qualité écologique moyenne	0,584*** (0,083)	0,592*** (0,083)
Présence d'un sentier	1,160*** (0,069)	1,168*** (0,069)
Distance	-0,016*** (0,002)	-0,017*** (0,002)
Nb obs. (Nb ind. X 3 options X 8 ens. de choix)	6810	6810
Log Vraisemblance	-2157,48	-2140,48
Test LR	672,84 (0,00)	706,74 (0,00)
Pseudo R²	0,135	0,142

La CSA Statu quo a été introduite de façon à capter l'utilité procurée par le fait de ne visiter aucun des lacs fictifs proposés. Elle est significative et positive, signifiant ainsi que pour les répondants choisir de ne se rendre sur aucun des lacs apporte plus d'utilité que de choisir un des deux lacs fictifs. Les paramètres des attributs spécifiques aux lacs sont tous significatifs. Ce sont donc des déterminants pertinents de choix de visite sur les lacs. Concernant les activités praticables sur les lacs, *Toutes activités interdites* est la modalité de référence. Ainsi par rapport à la référence, toute possibilité de pratiquer une activité sur le lac contribue positivement à

l'utilité des répondants. La probabilité de choisir une sortie sur un lac augmente surtout quand il est possible de pêcher et encore plus si l'autorisation de la baignade s'ajoute à celle de la pêche. Interdire la pratique de sports nautiques diminue l'utilité mais dans une proportion moindre. La probabilité pour les enquêtés de choisir une sortie sur un lac diminue d'autant plus que le nombre d'installations touristiques autour du lac est important, (modalité de référence de l'attribut *Installations touristiques*) et que la qualité écologique du lac est pauvre (modalité de référence de l'attribut *Qualité écologique*). Evidemment, une courte distance à parcourir pour se rendre sur un site sur le littoral est préférée aux distances plus longues.

Les préférences relatives aux attributs ne sont pas homogènes. Des interactions entre les attributs des lacs et certaines caractéristiques individuelles des répondants ont été testées. Parmi celles significatives, il apparaît de l'hétérogénéité entre les actifs, inactifs et retraités. Ainsi, la probabilité pour un retraité de se rendre sur un lac diminue si seuls les sports nautiques sont autorisés. Les retraités valorisent moins que les inactifs la possibilité de pratiquer toutes activités sur un lac.

Estimation des CAP des enquêtés

A partir des résultats d'estimation des paramètres du modèle expliquant les choix des usagers, nous avons calculé le consentement à payer pour une variation marginale de chacun des attributs. En général, le CAP s'exprime comme le rapport négatif du paramètre de l'attribut k sur le paramètre de l'attribut coût (or il s'agit ici d'un attribut distance). Les estimations des CAP sont contingentes aux hypothèses retenues pour mesurer le coût de déplacement. L'attribut *Distance* est ici utilisée comme une variable indicatrice du coût, est convertie par la suite en un coût comme chez Hanley *et al.* [2002] et Timmins et Murdoch [2007]. Seul le coût du carburant, sans y inclure le coût de l'usure du véhicule, a été retenu, supposant ainsi que les individus n'accordent d'importance qu'au coût du carburant lors du choix d'une visite à la journée, surtout lorsque les distances sont relativement courtes comme c'est le cas dans les occasions de choix proposées. Un coût de 0,103 € par kilomètre a été utilisé, moyenne de l'indemnisation des frais de carburant au kilomètre pour les véhicules de 5 à 7 chevaux fiscaux, en considérant que 75% du parc automobile français roule au gazole. L'attribut distance est converti en coût de transport aller-retour par la formule suivante : Distance en kilomètres x 2 x 0,103 €.

Ainsi, le CAP individuel est de 1,04€ pour la pratique des sports nautiques (/ à tout interdit), de 5,33€ lorsque les sports nautiques et la pêche sont autorisés et de 12,96€ pour la pratique des sports nautiques, de la pêche et de la baignade (/ à tout interdit). Ces CAP varient selon la CSP.

En particulier, il existe des différences de CAP entre trois groupes d'usagers : les actifs, les inactifs (regroupant chômeurs et étudiants) et les retraités. Lorsque seuls les sports nautiques sont autorisés sur le lac, les actifs et inactifs ont un CAP de 2,76€ tandis que les retraités ont un CAP de - 4,1€ (valeur négative). Ces derniers ne valorisent pas les sports nautiques. Les CAP augmentent lorsque les sports nautiques et la pêche sont autorisés, puisqu'il est de 6,67€ pour les actifs et inactifs, et de 1,48€ pour les retraités. Enfin, lorsque toutes les activités récréatives sont autorisées (sports nautiques, pêche et baignade) alors le CAP est de 13,41€ pour les actifs, de 23,07€ pour les inactifs et un CAP de 6,79€ pour les retraités.

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. Ces CAP sont les bénéfices individuels des usagers en fonction des types d'activités pouvant être pratiqués, ils dépendent donc de l'état écologique et par conséquent des niveaux de dépollution du lac visés pour atteindre ces états. L'agrégation de ces consentements à payer individuels nous a permis par la suite d'évaluer la demande globale de SE selon les objectifs de dépollution visés. L'idée est de pouvoir relier les niveaux de dépollution à atteindre sur le lac aux pratiques à mettre en place pour les atteindre et aux coûts agrégés des pratiques agricoles pour y parvenir.

Evaluation de la demande agrégée

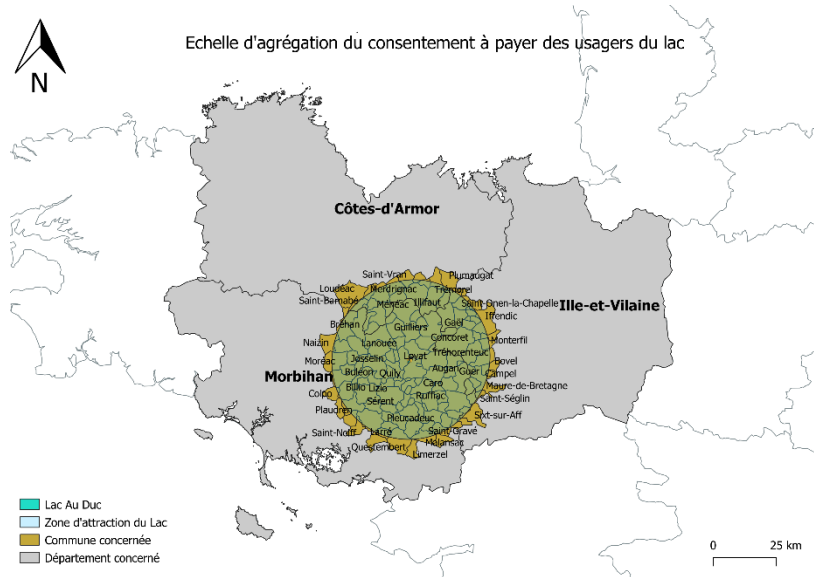
Notre objectif est d'agrèger les consentements à payer des usagers pour les activités récréatives praticables sur le lac (baignade, pêche et activités nautiques), en prenant en compte leurs caractéristiques individuelles. Nous avons vu en particulier que ces CAP individuels d'une visite varient selon que les usagers sont actifs, inactifs ou retraités. Pour cette agrégation, il a fallu estimer le nombre annuel moyen de visites des habitants des communes contenues dans ou chevauchant la zone d'attraction du lac, que nous avons estimé à un rayon de 30 km autour du lac (139 communes pour une population totale de 183 055 adultes (INSEE 2018)) (Figure ???).

Agrèger 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

- Estimation du nombre de visites / an des usagers du lac

- Agrégation des valeurs de visites respectives des usagers en fonction de leurs caractéristiques

Figure 6 : Echelle d'agrégation du consentement à payer des usagers du Lac Au Duc



Une fois les bénéfices évalués par visite et pour chaque type d'activité, il nous a fallu évaluer le nombre de visites totale. Afin d'évaluer les bénéfices, nous avons convenu de ne retenir que les usagers issus des communes chevauchant la zone d'attraction du lac, réduisant ainsi notre échantillon à 243 individus.

□ **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 :

- o Plusieurs fois par semaine
- o Plusieurs fois par mois
- o Plusieurs fois par An
- o Jamais

Nous avons fait l'hypothèse que :

- o 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
- o 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
- o 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
- o 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 modèle 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 : 36

<i>Tableau 3</i> Modèle Logit 1 / 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

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.

L'agrégation des CAP à l'échelle des 180 000 personnes résidant dans le périmètre d'attraction du lac nous donne une estimation de la perte de bien être des usagers potentiels selon l'état écologique du lac. Le tableau 10 suivant présente les bénéfices agrégés selon les types d'activités praticables sur le lac, comparés aux coûts des scénarios les moins coûteux (ou coût efficace ???) correspondant aux objectifs de dépollution visés.

Tableau 10 : Comparaison des bénéfices des usagers aux coûts des mesures agricoles

Objectif de division du phosphore total (µg/l)	Activités praticables ciblées par les mesures de réduction du phosphore	Bénéfice total des usagers	Coût des mesures agricoles optimales à mettre en place
Division par 2	Activités nautiques	5 602 710 €	6 171 013 €
Division par 3	Activités nautiques et Pêche	20 437 351 €	10 328 417 €
Division par 5	Activité nautique, Pêche et Baignade	34 426 613 €	14 151 085 €

4. Conclusion

L'enquête auprès agriculteurs a révélé qu'il existe un coût à mettre en place des mesures pour réduire les flux de phosphore, et des différences de coûts selon les systèmes de production qui doivent être prises en compte dans la conception des PSE. En effet, si on proposait un paiement uniforme à l'hectare de type MAEC aux agriculteurs, sur la base de notre CAR moyen tel que révélé par l'expérience, ce CAR moyen ne suffirait pas pour enrôler les exploitations qui ont du maïs dans leur rotation et pour lesquelles le CAR est plus élevé. On voit bien qu'un paiement différencié prenant en compte la diversité des systèmes de production est nécessaire. Le risque d'un paiement uniforme est d'enrôler les parcelles à coût faible (effet d'aubaine) et pas celles à coût élevé qui pourraient être les plus intéressantes d'un point de vue écologique. Les parcelles agricoles du bassin versant ont été classées selon leurs niveaux d'efficacité et de coût-efficacité en terme de réduction des flux de phosphore. Les objectifs visés pour nos simulations correspondent aux différents états écologiques visés sur le lac et aux activités récréatives praticables correspondantes. 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 existe un gain au ciblage des parcelles. Par contre, la division de la concentration de P par 5 étant la plus exigeante, il y a peu de marge de manœuvre sur les mesures à mettre en place. Il faut impliquer les parcelles en prairies (mise en place de haies antiérosives) en plus des parcelles arables du bassin versant.

La comparaison coût-bénéfice nous permet de vérifier l'existence d'une demande suffisante pour inciter à la fourniture de services environnementaux sur le lac au Duc. 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). Il existe bien une demande pour la fourniture de services environnementaux sur le Lac Au Duc.

[Discussion et Conclusion non finalisée]

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
- 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
- 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

Appendix 1: Results of the Hausman-Mc Fadden test for the IIA hypothesis

The IIA assumption requires that the inclusion or exclusion of alternatives does not affect the relative risks associated with the regressors in the remaining alternatives. The IIA Hausman-Mc Faden test compares the estimated parameters of the model including all alternatives with models excluding each alternative.

	Khi²(6)	p-value
Exclusion of « PSE 1 »	5,67	0,461
Exclusion of « PSE 2 »	6,95	0,326
Exclusion of « <i>Opt-out</i> »	6,48	0,263

The tests say that excluding the alternatives “PSE 1”, “PSE 2 ” or “*Opt-out*” does not affect the relative risks of the remaining alternatives. The IIA property has not been violated.

Annexe 2

Variables	Paramètres estimés
	LC avec interactions
CSA (<i>statu quo</i>)	0,322 (0,538)
CSA # Cultures seules	1,912*** (0,598)
CSA # Autres bovins	-1,495*** (0,402)
CSA # Sans diplôme	3,111*** (0,706)
CSA # Bac Pro	1,383*** (0,328)

CSA # CAP-BEP	0,637**
	(0,290)
% de SAU sous couvert végétal	-2,179***
	(0,581)
% de SAU sous Couvert végétal # % Mais dans la SAU	-6,168***
	(1,675)
% de SAU sous Couvert végétal # % Prairie permanente dans la SAU	3,195*
	(1,853)
Mètre/ha de haies antiérosives	-0,0074*
	(0,004)
Mètre/ha de Haies antiérosives # % Prairie permanente dans la SAU	-0,075***
	(0,019)
Interdiction Fertilisant minéral phosphaté	0,089
	(0,193)
Durée du contrat	0,083
	(0,204)
Rémunération/ha de SAU	0,007***
	(0,001)
<hr/>	
Nb obs. (Nb ind. X 3 alt. X 8 ens. de choix)	1224
Log Vraisemblance	-296,72
Test LR	303,04 (0,00)
Pseudo R ²	0,338
<hr/>	

<hr/>	
	Consentements à recevoir
<hr/>	
	Modèle LC avec interactions
<hr/>	
Paiement de base (€/ha de SAU)	45,14 ***
Paiement de base pour une exploitation avec cultures seules (€/ha de SAU)	313,57***

Paiement de base pour un agriculteur sans diplôme (€/ha de SAU)	481,88 ***
Paiement de base pour un agriculteur ayant un Bac Pro (€/ha de SAU)	239,34 ***
Paiement de base pour un agriculteur ayant un CAP-BEP (€/ha de SAU)	134,62 ***
CAR (€/ha de SAU) pour la mise en place de couvert végétal permanent par % de SAU couverte	3,06 ***
CAR supplémentaire (€/ha de SAU) pour la mise en place de couvert végétal par % Maïs dans la SAU	0,09 ***
CAR (€/ha de SAU) supplémentaire pour la mise en place de couvert végétal par % Prairie permanente dans la SAU	-0,045 ***
CAR (€/ha de SAU) par mètre/ha de haies antiérosives implantées	0,99 ***
CAR (€/ha de SAU) supplémentaire pour l'implantation de haies antiérosives implantées par % Prairie permanente dans la SAU	0,01 ***
