



**INTÉGRER LA VALEUR DE SOLS HYDROMORPHES DANS LEUR USAGE
QUELLES STRATÉGIES D'INTERVENTION
SUR LES MARCHÉS FONCIERS ?
CONSIDERING THE VALUE OF HYDROMORPHIC SOILS IN THEIR USE
HOW TO DESIGN PUBLIC POLICIES TOWARD LAND MARKETS?**

Elsa Martin
CESAER, UMR 1041 INRA - AgroSup Dijon
26, Bd Dr Petitjean – BP 87999
21079 Dijon cedex
elsa.martin@dijon.inra.fr

Synthèse du rapport final
Février 2014

Contexte général et enjeux

Pour atteindre les objectifs fixés par la réglementation européenne en termes de qualité de l'eau, les gestionnaires locaux doivent agir activement au niveau de la source des pollutions et dégradations. Le problème est qu'il est bien souvent difficile d'identifier de manière certaine les responsables des nuisances. Une façon détournée de maîtriser les risques de pollutions diffuses est d'identifier en premier lieu les zones d'intérêt et d'y encadrer les usages. Ainsi, une des solutions envisagées en pratique consiste à intervenir sur les marchés fonciers en hiérarchisant puis ciblant des zones dites « humides » afin de mieux encadrer et potentiellement contraindre les pratiques actuelles (principalement agricoles mais aussi résidentielles, industrielles, etc.). Ce sont, bien souvent, des syndicats ou autorités responsables de la ressource en eau qui adoptent de telles stratégies avec pour objectif principal la préservation de la Fonction de Régulation de la Qualité de l'Eau de ces Sols (FRQES).

Nous proposons dans ce projet d'établir un cadre de décision pour la protection de la FRQES à l'échelle infra-départementale (bassin versant). En France, l'arrêté du 24 juin 2008 (modifié le 1er octobre 2009) précise les critères de définition et de délimitation des zones humides. Les indicateurs pédologiques y tiennent une place majeure, à côté des indicateurs de végétation. C'est sur cette base que les autorités responsables de la politique de l'eau et les organismes en charge de la protection des zones humides sont censés sélectionner les parcelles à racheter pour les protéger. Mais, appliquée à un département comme la Côte-d'Or, une telle stratégie concerne potentiellement une très grande partie des terres agricoles. Si, comme observé en pratique, la protection est synonyme de compensations financières ou d'achat de parcelles, le coût de la protection prend une place primordiale. Du fait de l'existence de contraintes budgétaires, la préservation passera nécessairement par une hiérarchisation des zones à réglementer sur la base d'une comparaison entre les gains environnementaux et les coûts économiques. Mais comment estimer ces gains et coûts ? C'est précisément ce que nous souhaitons faire dans le cadre de ce projet.

L'estimation des gains doit passer par la prise en compte des caractéristiques biophysiques des parcelles concernées (géomorphologie, hydromorphie) mais également des caractéristiques hydrologiques (connectivité au cours d'eau, ordre de Strahler, drainage, lame d'eau, débit) et hydro-chimiques (concentrations et flux en polluants). Les caractéristiques biophysiques permettent d'identifier des zones humides dites potentielles. Le premier enjeu de notre travail est d'identifier les variables biophysiques qui permettent d'identifier les zones humides potentielles de quelques bassins versants représentatifs de la Côte-d'Or. Les caractéristiques hydrologiques permettent quant à elles de déterminer dans quelle mesure ces zones humides sont effectives. Enfin, des caractéristiques hydro-chimiques peuvent permettre de voir dans quelle mesure elles sont efficaces du point de vue de la régulation de la qualité de l'eau. Un autre enjeu de notre travail est d'analyser la cohérence des approches hydrologiques, hydro-chimiques et pédologiques.

Dans le but de renseigner au mieux les ciblage possibles nous envisageons aussi d'estimer les coûts de la protection. Elle peut prendre deux formes selon que l'on considère qu'elle passe par des compensations financières pour une préservation des sols hydromorphes par ses propriétaires ou par des achats de parcelles.

L'estimation des coûts d'achat des parcelles agricoles repose sur la méthode des prix hédoniques qui consiste à estimer le prix d'une parcelle en fonction de ses caractéristiques (taille, localisation, caractéristiques en termes de production agricole). Il s'agit de partir d'une base de données de transactions foncières réelles pour prédire le prix de parcelles n'ayant pas fait l'objet de transactions. Les bases de données sur les transactions foncières contenant peu d'informations sur les caractéristiques des parcelles, un des enjeux de notre travail est de recourir à de l'information géographique exogène pour prédire le prix de parcelles agricoles

n'ayant pas fait l'objet de transactions. Approches géographiques et économiques sont donc combinées.

L'achat est une solution extrême par rapport aux compensations financières ; si elle assure une protection complète et certaine à long terme, elle peut s'avérer particulièrement coûteuse à mettre en œuvre et ainsi conduire à une plus faible surface totale préservée. D'où l'intérêt d'envisager aussi la possibilité de faire évoluer les pratiques agricoles en matière d'utilisation d'intrants ayant un effet sur la qualité de l'eau. L'enjeu est d'identifier les marges de manœuvre agronomiques et économiques à disposition des agriculteurs pour que de telles évolutions soient envisageables. Approches agronomiques et économiques sont ainsi combinées.

Objectifs généraux du projet

L'aspect pluridisciplinaire du projet ECOSOLHYDRO lui donne un caractère essentiellement exploratoire. De manière générale, le projet vise à explorer des stratégies d'intervention sur les marchés fonciers pour préserver la FRQES. Nous avons choisi de nous focaliser sur deux types de stratégies. La première peut être qualifiée de curative dans la mesure où elle vise à racheter des terres identifiées comme étant des zones humides afin de préserver leur FRQE (Fonction de Régulation de la Qualité de l'Eau). Nous nous concentrerons sur les terres non urbanisées en faisant l'hypothèse que ce sont les terres qui nécessitent les coûts les plus faibles pour restaurer la FRQES. Cette stratégie vise en fait à modifier l'usage qui est fait du sol dans la mesure où elle vise à passer d'un usage agricole à un usage de préservation. La seconde stratégie est plus préventive dans la mesure où elle consiste à explorer les possibilités d'action à la source des pollutions, c'est-à-dire sur les pratiques agricoles. Ces deux stratégies étant dissociées, nous avons choisi de les traiter séparément. Ce choix nous a permis d'explorer la FRQES du point de vue de deux polluants distincts que sont les nitrates et les produits phytosanitaires.

La première stratégie d'intervention consiste à sélectionner des zones humides à racheter pour préserver la FRQES du point de vue des nitrates. Elle se décline en trois sous-objectifs. Le premier vise à identifier et spatialiser des zones humides potentielles sur la base de critères biophysiques et hydrologiques. Le travail a essentiellement été réalisé par des spécialistes en science du sol. Le second sous-objectif vise à hiérarchiser les zones humides potentielles sur la base de leur efficacité du point de vue de l'assimilation des nitrates. Ce sont essentiellement les hydro-chimistes qui ont été mis à contribution à ce stade. Le troisième sous-objectif vise à hiérarchiser les zones humides potentielles sur la base de leur coût d'achat. Le travail a été réalisé par des économistes et des géographes.

La seconde stratégie d'intervention consiste à agir sur les pratiques agricoles en matière d'utilisation de pesticides. Dans ce cadre, nous avons choisi de nous concentrer sur une technologie de production particulière en matière d'utilisation de pesticides : la Protection Intégrée des Cultures (PIC). Le premier sous-objectif général à ce stade était de définir précisément les technologies de production de PIC agronomiquement envisageables sur un bassin versant particulier. Le second sous-objectif était d'analyser les effets de l'adoption de ces technologies de production préalablement définies sur la qualité de l'eau dudit bassin versant. Le troisième sous-objectif était relatif aux déterminants économiques de l'adoption d'une technologie de PIC. Ce dernier a été appréhendé sous l'angle de la théorie économique ainsi que sous un angle agro-économique plus appliqué.

Quelques éléments de méthodologie

Le projet initial de recherche était très général quant à la **zone d'étude** choisie dans la mesure où nous envisagions de travailler à l'échelle administrative du département de Côte-d'Or. La précision des données nécessaires pour mener à bien les volets hydro-pédologique et agronomique de l'étude nous a amenés à préciser notre zone d'investigation. L'objet d'intérêt

du projet de recherche étant la FRQES, il a par conséquent été décidé de travailler à l'échelle de bassins versants. Ces bassins versants ont été sélectionnés en raison de leur représentativité de fonctionnements hydrologique et hydrogéologique courants en Côte-d'Or et de la qualité des données hydro-chimiques disponibles. Les quatre bassins versants suivants ont été sélectionnés :

- Les bassins versants de l'Ource et de la Seine qui se caractérisent par un contexte hydrogéologique de calcaires karstiques.
- Les bassins versants de l'Armançon et de la Brenne, représentatifs de l'Auxois essentiellement marneux (imperméable) mais comportant des zones de plateau calcaires eux aussi karstiques.

La question du **polluant à étudier** s'est également posée au démarrage du projet. L'étude des transferts de phosphore a été mise de côté dans la mesure où le phosphore est un élément stable dans le sol et peu mobile : la pollution des eaux de surface par le phosphore est généralement liée à une érosion importante sur le bassin versant amont et à l'accumulation de sédiments dans les zones humides à l'aval. La thématique des produits phytosanitaires, très actuelle et liée aux activités des agronomes associés au projet, a été retenue même si elle s'avère très délicate à traiter d'un point de vue hydro-chimique. Cette difficulté a trait au fait que ces produits représentent très souvent un grand nombre de molécules avec des propriétés différentes qui sont impliquées. Il est par conséquent très difficile de raisonner de manière globale : il est peu aisé d'évaluer les entrées sur un bassin versant, la partie dégradée par les sols et l'impact de changements de pratiques agricoles et d'itinéraire technique. Les données de qualité de l'eau relatives aux produits phytosanitaires sont par ailleurs délicates à obtenir, lorsqu'elles existent sous une forme temporellement pérenne et spatialement uniforme. Pour ces raisons, il a été choisi de traiter de ce polluant d'un point de vue agro-économique lors de la phase d'exploration des stratégies d'intervention consistant à agir sur les pratiques agricoles. La thématique des nitrates a quant à elle été privilégiée pour la phase d'exploration des stratégies de rachats de terres agricoles. Ces molécules sont étudiées depuis des décennies (le cycle de l'azote ainsi que les processus de nitrification et de dénitrification sont maîtrisés) et on dispose de données d'analyses fiables et continues sur de longues périodes (les évaluations des entrées d'azote minéral sont accessibles).

Afin de faciliter la lecture aux non-spécialistes, nous hiérarchisons les méthodes mobilisées par grands domaines disciplinaires : hydro-pédologie, géo-économie et agro-économie.

Hydro-pédologie

En raison de lacunes en termes d'informations pédologiques spatialisées à l'échelle de la Côte-d'Or et suite à plusieurs essais infructueux, nous avons finalement choisi de mobiliser les indices topographiques pour identifier puis spatialiser les zones humides de notre zone d'étude. Ces indices sont basés sur le concept de zone contributive et ont été mobilisés à plusieurs reprises pour modéliser la distribution spatiale des zones humides à l'échelle d'un bassin versant. En faisant intervenir la surface amont d'alimentation et l'inverse de la pente, ils s'avèrent pertinents pour estimer l'extension spatiale des zones humides dans des bassins versants de petits ordres. Il s'est donc agi pour nous de tester le comportement de différents indices topographiques pour prédire la distribution spatiale des zones humides potentielles en Côte-d'Or. Deux indices différents ont été utilisés : l'indice de Beven et l'indice de Beven pente aval qui permet d'intégrer un contrôle par l'aval des conditions de la submersion. Ils ont été estimés à partir de modèles numériques de terrain de 25 mètres et de 50 mètres de résolution puis calibrés sur les bassins versants d'étude. Le seuillage a été réalisé sur le terrain. La méthode a consisté à placer des transects au niveau des zones où l'indice décroît le plus progressivement possible du cours d'eau vers le versant. Les sondages ont été positionnés sur ces transects et focalisés sur la zone de transition entre domaine bien drainé et domaine hydromorphe pour fixer une valeur d'indice seuil d'apparition des zones humides. Les transects ont été implantés de manière à notamment être représentatifs des différents facteurs de mise en place des zones humides que sont la géologie et l'ordre de Strahler (qui permet de hiérarchiser les branches d'un cours d'eau). Un calcul des erreurs a été effectué afin d'estimer

la précision de l'étendue des zones humides. Cette précision a été déterminée à partir de chaque valeur seuil correspondant à un type de substrat. Les erreurs correspondent à la variation entre la valeur d'indice maximale de sols bien drainés et la valeur minimale des sols hydromorphes. La méthode de terrain a plus précisément consisté à repérer la profondeur d'apparition des marqueurs d'hydromorphie dans le sol au niveau des points de sondage préalablement positionnés.

Les zones humides ainsi délimitées peuvent être désignées sous le nom de zones humides potentielles dans la mesure où leur présence est théorique et doit être validée via la mobilisation de critères supplémentaires de végétation ou d'engorgement en eau par exemple. Par ailleurs, toutes ne contribuent pas nécessairement à l'assimilation des nitrates de la même manière. Autrement dit, ces zones humides potentielles peuvent être hiérarchisées en fonction de leur efficacité en termes de régulation de la qualité de l'eau. Cet objectif ultime ne peut être atteint qu'au travers d'un travail ambitieux, impliquant notamment la mise en place d'une modélisation des transferts d'azote à l'échelle des bassins versants. Si le présent projet n'a pas les dimensions suffisantes pour intégrer complètement cet objectif, nous avons tout de même tenté d'avancer sur la base d'analyses de données hydrologiques (lame d'eau écoulée, débit, hydraulicité et coefficient de ruissellement) et de données de qualité des eaux (concentrations et flux en nitrates).

Géo-économie

Pour estimer le coût d'achat des zones humides nous sommes partis de l'hypothèse que les zones humides potentielles les moins coûteuses à remettre en état pour exploiter leur potentiel de régulation de la qualité de l'eau sont les zones humides situées sur des terres naturelles ou semi-naturelles. Nous nous sommes alors intéressés au coût d'achat de telles terres. Pour estimer ce coût d'achat nous avons choisi de mobiliser la première étape de la méthode des prix hédoniques qui consiste à décomposer le prix global d'un bien observé sur un marché en différentes caractéristiques.

Cette méthode repose sur des données sur les transactions foncières fournies par Terres d'Europe – SCAFR (Société de Conseil pour l'Aménagement Foncier et Rural). Ces informations sont issues des notifications notariales précédant de manière obligatoire la vente d'un terrain dès lors que certaines conditions sont remplies, principalement une surface minimale. La période considérée est 1992-2008, avec une couverture de l'ensemble du département de la Côte-d'Or (8 000 km² au total dont environ 4 500 sont en usage agricole). Le département est une échelle plus pertinente que le bassin versant d'un point de vue économique car il représente une entité administrative dont les limites correspondent à un sous-marché foncier. Les prix sont observés au niveau des transactions, qui contiennent souvent plusieurs parcelles repérées par un identifiant cadastral. Les parcelles sont géolocalisées à l'aide de cet identifiant et des couches géométriques de la BD parcellaire (IGN) et du cadastre numérisé (DGFIP) pour être reliées aux autres sources d'information utilisées. Ces dernières nous permettent d'attribuer à chaque parcelle les caractéristiques expliquant son prix qui ne sont pas nécessairement présentes dans la base de données sur les transactions foncières : caractéristiques de localisation, topographiques et en termes de production agricole. Nous avons construit un modèle explicatif du prix des terres ayant fait l'objet de transactions afin de le mobiliser ensuite pour prédire le prix de terres n'ayant pas forcément fait l'objet de transactions. Deux difficultés majeures se sont posées à ce stade. La première était relative au fait que les transactions observées peuvent être composées de plusieurs parcelles. La seconde était relative au fait que les données mobilisées dans les analyses hédoniques, par nature très hétérogènes, sont collectées dans des unités spatiales de forme et de taille très diverses qui ne possèdent généralement pas de règles de construction communes de nature à en faciliter l'harmonisation.

Pour ce qui est de la première difficulté, nous avons construit des transactions monoblocs en tenant compte des contiguïtés entre les parcelles cadastrales. L'objectif était de considérer une terre agricole cultivée d'une même culture comme un bloc unique malgré le fait que cette terre

recoupe plusieurs parcelles au sens du cadastre. Nous avons défini plusieurs types de contiguïtés afin de tenir également compte du fait que plusieurs parcelles au sens du cadastre peuvent être séparées par un chemin seulement. Pour ce qui est de la seconde difficulté, nous avons mobilisé des méthodes permettant d'intégrer dans un référentiel spatial commun des données biophysiques et socioéconomiques. L'appui de géographes a été primordial à ce stade.

Une fois l'étape de construction des données nécessaires à la mise en œuvre de la première étape de la méthode des prix hédoniques passée, nous avons mobilisé des méthodes d'inférence statistique afin d'avoir un modèle prédictif le plus performant possible.

Agro-économie

Pour analyser les modifications de pratiques agricoles en matière d'utilisation de pesticides envisageables agronomiquement et économiquement, nous avons procédé en plusieurs temps. Une première phase a consisté en des analyses théoriques des mécanismes économiques à l'œuvre lors du choix par un exploitant agricole des pratiques à adopter pour lutter contre les nuisibles. Des modèles de contrôle optimal et de théorie de jeux ont été mobilisés à ce stade.

Une seconde phase était plus appliquée et à l'échelle des bassins versants d'étude les plus pertinents en termes de pratiques agricoles pour des productions végétales : ceux de l'Ource et de la Seine. Elle est passée par une caractérisation de l'occupation des sols et des pratiques agricoles dans les bassins versants d'étude sur la base d'une analyse des données issues de Corine Land Cover et du RPG (Registre Parcellaire Graphique) ainsi que d'enquêtes de terrains. Cette caractérisation a ensuite permis de définir des technologies de production alternatives fondées sur l'application de principes de protection intégrée pour la gestion de la flore adventice mais adaptées aux zones d'étude. Les potentiels de transfert de pesticides à l'échelle de parcelles agricoles ont ensuite été évalués pour les pratiques actuelles et les pratiques alternatives sur la base du calcul d'un indicateur d'impact environnemental sur les eaux du bassin versant qui s'appelle I-Phy et qui est facilement spatialisable. Il est issu de la méthode INDIGO qui est un système-expert ayant pour vocation de reproduire les mécanismes de réflexion d'un expert humain. Il permet le calcul d'un indicateur agroécologique (compris entre 0 et 10, 0 étant la plus mauvaise note) pour les trois compartiments les plus sujets à une pollution par les pesticides : l'air (module 1), les eaux de surface (module 2) et les eaux souterraines (module 3). L'indicateur intègre (i) des variables liées au risque parcellaire de transfert (pente, type de sol, ...), (ii) des variables liées aux conditions d'application (date d'application, couverture du sol, ...) et (iii) des caractéristiques intrinsèques des substances appliquées. Un risque est calculé pour chacun de ces trois modules indépendamment de la dose d'emploi. Cette dose constitue un quatrième module (module 4). La note de l'indicateur I-Phy (I-Phy Substance Active) est donnée pour chaque substance active appliquée, et est issue de l'agrégation des 4 modules précédemment décrits. Les notes I-Phy sont à leur tour agrégées de façon à obtenir un indice I-Phy global caractérisant l'impact pour l'ensemble du programme de traitement.

Des indicateurs technico-économiques ont été également construits sur la base d'analyse de données comptables pour évaluer la pertinence technico-économique des scénarios de changement de pratiques agricoles envisagés par les agronomes.

Résultats obtenus

En réponse à la partie relative aux méthodes employées et dans le but de mettre en évidence les résultats scientifiques obtenus, nous hiérarchisons nos principaux résultats selon le même principe que précédemment : par sous-domaine disciplinaire.

Hydro-pédologie

Pour ce qui est de l'identification des zones humides des bassins versants d'étude, nous montrons que : (i) la prise en compte de la perméabilité des substrats et de l'ordre de Strahler dans la détermination des valeurs seuils de l'indice topographique délimitant les zones humides améliore leur prédiction ; (ii) la taille de la maille du modèle numérique de terrain utilisée pour calculer l'indice topographique (25 ou 50 mètres) joue un rôle primordial sur la précision de la localisation des zones humides, le décalage pouvant être de l'ordre d'une vingtaine de mètres ; (iii) une combinaison des deux indices topographiques est nécessaire pour délimiter au mieux les zones humides des bassins versants d'étude, à savoir, un indice de Beven simple pour les bassins d'ordres de Strahler inférieurs à 4 (en tête de bassins, à l'amont) et un indice de Beven pente aval pour les segments de bassins versants drainés par un cours d'eau d'ordre de Strahler supérieur (en fond de vallée alluviale, à l'aval).

Pour ce qui est de la spatialisation des zones humides des bassins versants d'étude, notre méthode nous permet (i) d'identifier et de délimiter des zones humides de faible étendue dans les bassins de la Seine, de l'Ource et de la Brenne, qui ne peuvent pas apparaître dans la cartographie des pédopaysages (référentiel régional pédologique au 1/250 000^e) en raison de leur faible extension et (ii) de préciser sur le bassin de l'Armançon, l'importance, la localisation et le type de zone humide, au sein des unités cartographiques de sols à dominance hydromorphes représentées au 1/250 000^e.

Finalement, nous obtenons que les zones humides sont majoritairement présentes dans le bassin de l'Armançon. Les bassins de la Brenne et de l'Ource ont une étendue intermédiaire alors que celui de la Seine présente le moins de zones humides. Ces différences importantes entre les bassins versants sont liées à deux facteurs principaux. Le premier est le relief. Les vallées larges de l'Armançon sont plus favorables à la présence d'une zone humide que les vallées plus étroites et encaissées de la Brenne et surtout de la Seine et de l'Ource. Le second facteur est le type de substrat. Il joue également un rôle très important en lien avec sa perméabilité : la localisation des zones humides correspond généralement aux zones où le substrat est imperméable.

En ce qui concerne la hiérarchisation de ces zones humides potentielles en fonction de leur efficacité vis-à-vis de l'assimilation de nitrates, l'analyse statistique des données hydro-chimiques nous a permis de défricher le terrain pour des études futures.

Tout d'abord, les concentrations en nitrates, tout comme les flux de nitrates exportés à l'exutoire des 4 bassins versants étudiés, montrent une forte variabilité spatiale. Cette variabilité est clairement liée à l'occupation du sol, notamment à la proportion de zones humides et/ou de cultures, sans que l'on puisse définitivement identifier la variable explicative. En effet, si les superficies de zones humides et de céréales montrent une bonne relation avec les flux de nitrate, elles sont toutes les deux également reliées entre elles. L'estimation de taux moyens annuels de nitrates exportés, qui s'affranchit des lames d'eau écoulées et des superficies cultivées, permet cependant d'isoler la proportion des zones humides dans un bassin versant comme un facteur permettant d'abaisser les exportations de nitrates.

Les variations temporelles montrent quant à elles clairement l'influence des facteurs hydro-climatiques, notamment ceux liés aux écoulements. Les mécanismes ne sont cependant pas clairement établis car si le débit ou le coefficient de ruissellement expliquent une partie de la variabilité, plus de 40% de celle-ci doit pouvoir être expliquée par d'autres variables hydro-climatiques.

Au final, nous proposons de distinguer nos zones humides selon trois types hydro-géomorphologiques qui devraient correspondre à des fonctionnalités distinctes vis-à-vis de la régulation de la qualité de l'eau. Premièrement des zones humides de type 1 sur substrats imperméables déconnectées du réseau hydrographique. Ces zones sont plus abondantes sur le bassin de la Brenne que sur ceux de l'Armançon et de l'Ource et rares sur le Bassin de la Seine. Deuxièmement des zones humides de type 2 de fond de vallée d'ordre de Strahler

inférieur à 4 (têtes de bassin) auxquelles sont connectées des zones humides sur substrats imperméables. Elles sont très abondantes dans le bassin de l'Armançon, moins abondantes sur les bassins de la Brenne et de l'Ource et rares sur le bassin de la Seine. Troisièmement des zones humides de type 3 de fond de vallées alluviales d'ordre de Strahler supérieur ou égal à 4 auxquelles sont connectées des zones humides sur substrats imperméables. Leur abondance décroît dans l'ordre suivant : Brenne, Ource, Armançon, Seine. Il reste à vérifier la fonctionnalité de ces zones à partir des variables hydro-chimiques.

Géo-économie

L'estimation du coût d'achat des parcelles agricoles montre que, toutes choses étant égales par ailleurs, le prix d'une parcelle diminue quand la distance qui la sépare d'un certain nombre de services et des emplois augmente et quand l'altitude et la pente (au-delà de 7 degrés) augmentent. Le prix d'une parcelle agricole diminue de plus en plus avec sa pente et avec la distance qui la sépare de la mairie de sa commune d'appartenance. Par contre, il diminue de moins en moins avec la distance qui sépare la parcelle des services et des emplois (distances routières au pôle de bassin de vie, au pôle urbain et à Dijon). Ceci signifie que, dans le cadre d'anticipation de conversion en terrain à bâtir, il est d'autant plus important d'être proche des emplois et des services qu'on en est proche. Le cas de l'altitude est particulièrement intéressant car on observe que le sens de la relation est beaucoup moins net. Pour des altitudes supérieures à 450 mètres, chaque mètre supplémentaire diminue également plus le prix que pour des altitudes inférieures à 250 mètres. Toutefois, c'est pour des altitudes intermédiaires entre ces deux valeurs que le prix diminue le moins pour chaque mètre supplémentaire. Par ailleurs, le prix d'une parcelle est plus bas pour les otex bovins, élevage divers et autres par rapport à l'otex céréale ; il est plus bas pour une texture dominante limoneuse-argileuse par rapport à une texture plus pure de type limoneuse et lorsque le fermier en place se porte acquéreur que lorsque ce n'est pas le cas.

Nous montrons également que le prix d'une parcelle augmente de 0,805 % quand sa surface augmente de 1 %. Le prix d'une parcelle augmente quand l'otex communale relève des cultures diverses par rapport aux céréales, quand les terres du canton d'appartenance de la parcelle sont majoritairement argileuses par rapport à du limon, quand la part de la SAU communale drainée est positive par rapport à quand elle est nulle et quand le climat est montagnard (partie morvandelle de la Côte-d'Or) plutôt que semi-continentale et des marges montagnardes. L'ensemble de ces relations est intuitif sauf la dernière selon laquelle les parcelles agricoles situées dans une zone caractérisée par un climat de montagne sont 30,1 % plus chères que des parcelles caractérisées par un climat semi-continentale et des marges montagnardes pourtant plus favorable à la production agricole. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces zones bénéficient de primes spéciales, liées au handicap naturel qui les caractérise, dans le cadre de la PAC. Nos variables climatiques ne capteraient donc pas qu'un effet climatique mais aussi un effet zone en handicap naturel reconnue comme telle qui ne serait pas contrôlé par ailleurs.

L'application de notre modèle explicatif du prix des terres ayant fait l'objet d'une transaction à l'ensemble des terres des bassins versants d'étude nous montre que les sommes monétaires à envisager pour racheter les terres identifiées comme étant en zones humides sont très importantes. Pour le seul bassin de la Seine et de l'Ource, on aboutit par exemple à la somme de 21 millions d'euros. Dans le cadre d'une politique de conservation d'achat, ceci met en évidence la nécessité de disposer de critères de hiérarchisation des zones à préserver en priorité.

On constate que 93% des parcelles en zone humide potentielle sont effectivement humides au sens où elles ne sont pas drainées. Elles représentent 88 % du prix total des zones humides potentielles. Les zones humides effectives sont donc moins chères que les zones humides potentielles. Ceci s'explique par le fait qu'elles dégagent moins de valeur ajoutée agricole. Une première hiérarchisation des zones humides à racheter sur la base de critères économiques consisterait à privilégier les zones humides effectives.

Les surfaces de zones humides effectives en fonction de leur type sont de 17, 67 et 16 % pour les types 1, 2 et 3 respectivement, alors qu'elles représentent respectivement 21, 62 et 17% du prix total des zones humides effectives. Les zones humides de type 1 sont donc plus chères que les zones humides de type 2. Au final, une hiérarchisation, sur la base de critères économiques, des zones humides à racheter consiste à privilégier les zones humides effectives de type 2, c'est-à-dire les zones de fond de vallée connectées au cours d'eau en tête de bassin.

Agro-économie

La mise en œuvre du système expert de la méthode I-Phy pour estimer la sensibilité des bassins versants d'étude aux transferts a révélé des risques élevés à très élevés pour la très grosse majorité des parcelles, pour les transferts par ruissellement comme pour les transferts par lessivage. Dans un tel contexte, on s'attend à un effet important des pratiques agricoles sur le niveau effectif des transferts. Nous avons donc commencé par analyser les changements de pratiques agricoles envisageables d'un point de vue agronomique dans les bassins versants d'étude. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la conception de systèmes de culture innovants fondés sur l'application de principes de PIC pour la gestion de la flore adventice qui est le principal problème de nuisibles rencontré dans notre zone d'étude.

Le choix d'une succession culturale adaptée constitue un élément indispensable dans la mise en place d'une stratégie systémique de maîtrise de la flore adventice comme les technologies de PIC. Contrairement aux successions culturales courtes habituellement rencontrées, la succession sélectionnée pour les zones d'étude s'étale sur une durée de six ans et intègre des cultures très diverses, aussi bien en ce qui concerne les périodes de semis que leur mode de conduite. La réalisation de faux semis est par ailleurs systématiquement envisagée sur l'ensemble des cultures de la succession. Ces faux semis contribuent à réduire les infestations d'adventices dans la culture suivante, mais permettent également de perturber le cycle biologique des limaces. Le nombre de passages possibles est cependant variable suivant la culture à planter. Par ailleurs, les technologies simulées proposent de maîtriser les adventices annuelles à levée automnale ou hivernale par le labour et de faire intervenir un désherbage mécanique sur toutes les cultures de la succession. Finalement ces technologies envisagent l'introduction d'une légumineuse dans la succession (réduction de la dépendance du système de culture aux intrants azotés) afin d'assurer une forte compétitivité du couvert vis-à-vis de la flore adventice.

La comparaison des valeurs de l'indice I-Phy pour les parcelles du bassin versant d'étude dans le contexte des pratiques actuelles avec les valeurs simulées dans le contexte d'une adoption généralisée à des technologies relevant de la PIC nous a montré que l'adoption généralisée de ces technologies sur l'ensemble des terres labourables du bassin versant (hors prairies naturelles) génèrerait une baisse importante du risque de transfert de pesticides. La hausse des valeurs de l'indice est clairement perceptible avec une disparition des zones signalées comme présentant de forts risques pour les eaux au profit d'une augmentation des parcelles signalées comme présentant un risque moyen pour les eaux.

Nous nous sommes ensuite intéressés aux déterminants économiques et technico-économiques de l'adoption de pratiques de PIC.

D'un point de vue empirique, sur notre zone d'étude, nous avons montré qu'en moyenne, sur les quatre années consécutives pour lesquelles on disposait de l'occupation des sols (2006 à 2009), et sous un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, le manque à gagner du passage à la protection intégrée s'élève à 45 EUR/ha, soit un coût global pour les 46 400 ha de terres labourables s'élevant à 2,1 millions d'euros par an. Cette valeur de 45 EUR/ha est donc la compensation annuelle moyenne nécessaire pour éviter une baisse du revenu des exploitations sous hypothèse de transition vers la protection intégrée généralisée, permettant une baisse des risques de transferts de pesticides vers les eaux, avec une amélioration de la note I-Phy de l'ordre de 2,8.

D'un point de vue plus théorique, nous nous sommes intéressés aux différentes pratiques agricoles en matière de protection des cultures dans un contexte de résistance des nuisibles aux pratiques de type application systématique de produits chimiques. Nous avons tout d'abord montré en quoi l'adoption d'un cadre dynamique est majeure pour étudier l'ensemble des interactions à l'œuvre lors des choix de pratiques de protection contre les nuisibles. Une analyse théorique de la prise en compte des aspects collectifs et stratégiques à l'œuvre lors du choix de l'adoption de technologie de PIC par rapport à l'application systématique de produits chimiques permet d'alimenter la réflexion sur les outils de politique publique susceptibles d'inciter les agriculteurs à adopter des technologies de PIC. Nous comparons la capacité de différents outils d'incitation (taxe sur les pesticides, subvention basée sur le niveau d'efficacité du pesticide) à inciter les agriculteurs à adopter un comportement socialement optimal. Plus particulièrement, nous montrons que taxe et subvention sont équivalentes dans l'internalisation des externalités inter-temporelles de production et stratégiques mais qu'elles échouent à rétablir un temps socialement optimal de basculement vers une technologie alternative de contrôle des nuisibles comme les technologies de PIC. En effet taxe et subvention distordent les comportements des agents de manière différente dans la mesure où la taxe réduit la profitabilité de la technologie courante de lutte contre les nuisibles et la subvention l'accroît. Il semble donc nécessaire d'envisager l'inclusion de transferts forfaitaires associés à ces schémas fiscaux afin de gommer lesdits effets distorsifs. Nous montrons que cette hypothèse est vérifiée dans le cadre de la subvention mais pas dans celui de la taxe. Seule la subvention, adossée à un transfert forfaitaire, permet donc d'internaliser les effets externes évoqués précédemment et d'obtenir un temps optimal de basculement vers une technologie alternative de lutte contre les nuisibles. Les effets de la taxe sont plus ambigus car cet instrument a un effet direct à la fois sur la valeur implicite du stock d'efficacité du pesticide et sur sa valeur marchande.

Nous avons également proposé un cadre d'analyse théorique du cas particulier des herbicides, dont le potentiel d'infestation du sol par les graines rend la réduction des traitements difficile à envisager et mettre en œuvre pour de nombreux agriculteurs. Nous montrons l'importance que représente le travail du sol pour gérer la résistance aux herbicides.

Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques

Implications pratiques

L'arrêté du 1er octobre 2009, qui précise les critères de définition des zones humides, propose d'introduire des critères pédologiques d'identification des zones humides à côté des critères de végétation plus classiquement utilisés. Ces critères sont généralement mobilisés pour réaliser des inventaires précis au cas par cas sur le terrain. Ces inventaires peuvent être extrêmement coûteux sans une pré-spatialisation des zones potentiellement humides. L'information pédologique disponible ne permet pas toujours cette pré-spatialisation. La méthode d'identification des zones humides finalement retenue dans le cadre de ce projet de recherche permet de telles pré-spatialisations.

Que ce soit à des fins de contrôle de la détention et de la transmission des terres agricoles ou de préservation des espaces naturels, les opérateurs fonciers comme les SAFER, les Conseils Généraux ou les Conservatoires (du littoral et des espaces naturels) sont amenés à acquérir des parcelles agricoles. Les budgets étant limités, la question du coût d'achat de ces parcelles et de la stratégie à adopter pour minimiser ces coûts d'achat se pose fréquemment. La méthode utilisée pour prédire le prix des terres agricoles de Côte-d'Or pourrait être mobilisée par ces opérateurs fonciers pour estimer les coûts d'achat de différentes parcelles agricoles.

À côté de ces implications pratiques qui sont essentiellement d'ordre méthodologique, nous avons exploré deux stratégies d'intervention sur les marchés fonciers pour préserver la FRQES qui peuvent être utiles au décideur public à l'échelle de bassins versants.

La première stratégie est relative à un changement d'usage réglementaire du sol. On considère le cas où ce changement passe par le rachat de zones qualifiées comme étant humides dans le but de préserver leur FRQE. A l'échelle du bassin versant de la Seine et de l'Ource (Côte-d'Or), nous avons montré qu'une telle stratégie aurait un coût de 21 millions d'euros. Face à l'importance de ce montant financier, nous avons proposé d'explorer deux pistes : la première est relative à la hiérarchisation des zones à préserver en priorité sur la base d'une analyse coût-efficacité et la deuxième a trait à une stratégie alternative potentiellement moins coûteuse qui consisterait à agir à la source des pollutions sur les pratiques agricoles.

L'exploration de la deuxième piste dans le même bassin versant a abouti à un coût de 2,1 millions d'euros par an. Ainsi, à supposer que l'efficacité des deux stratégies soit la même et sous l'ensemble des hypothèses effectuées dans notre travail, le rachat des terres agricoles du bassin versant de la Seine et de l'Ource serait amorti au bout d'une dizaine d'années, au taux d'actualisation près.

Recommandations

En termes de recommandations, les résultats chiffrés précédents sont à nuancer en raison du très grand nombre d'hypothèses sur lesquelles ils reposent. Nous ne reviendrons pas sur l'ensemble d'entre elles dont on peut avoir un aperçu à la lecture des parties méthodologiques de ce rapport mais ces résultats sont à prendre avec précaution.

L'efficacité du montant monétaire associé à une stratégie relative aux changements de pratiques agricoles est conditionnée au fait que les agriculteurs modifient effectivement leurs pratiques. Cette modification n'allant pas de soi, nous avons analysé les déterminants économiques du changement de pratiques agricoles. L'étude devrait cependant être complétée par une analyse sociologique. De même, nous avons vu qu'il n'était pas aisé de quantifier l'efficacité des zones humides en termes de régulation de la qualité de l'eau. Des études hydro-chimiques supplémentaires doivent être menées.

Par ailleurs, il nous paraît important de considérer tous les effets sur l'environnement de chacune des stratégies d'intervention. Nous nous sommes concentrés sur la FRQES mais les sols remplissent d'autres fonctions qui doivent être prises en compte. La question des paniers de services écosystémiques générés par telle ou telle stratégie n'est pas simple à traiter et nécessite des investigations supplémentaires. En outre, les effets des différentes stratégies peuvent être positifs mais aussi négatifs, via la production d'effets pervers sur l'environnement. Les coûts environnementaux de l'intervention doivent également être pris en compte.

D'un point de vue plus économique, nous avons négligé les coûts de l'intervention. Par exemple, dans le cas du rachat de zones humides, la question du coût annuel de son entretien se pose. Dans le cas de compensations financières destinées aux agriculteurs, la question du coût d'administration de ces compensations se pose en plus de celle du coût d'opportunité de la production agricole qui sert à nourrir les populations.

Réalisations pratiques

Un séminaire acteurs de lancement du projet de recherche a été organisé le 21 octobre 2011. Nous avons invité les gestionnaires de la ressource en eau des bassins versants sélectionnés : le syndicat du bassin versant de la Vouge, le SICEC (Syndicat des cours d'eau Châtillonnais) et le SIRTAVA (Syndicat Intercommunal pour la Réalisation des Travaux d'Aménagement de la Vallée de l'Armançon). Tous se sont déplacés pour échanger avec nous sur le projet de recherche.

Ce séminaire s'est déroulé sur une demi-journée au cours de laquelle :

- nous avons tout d'abord fait un tour de table,
- le projet ECOSOLHYDRO a ensuite été présenté de manière générale,

- deux présentations plus détaillées ont ensuite eu lieu : l'une sur les aspects économiques de l'intervention foncière pour la gestion de l'eau et l'autre relative à la première cartographie des zones humides sur les bassins versants sélectionnés.

Un séminaire acteurs de restitution est prévu pour septembre 2014. Ce séminaire sera l'occasion de présenter les résultats du projet de recherche. Il sera élargi au SIAEPA (Syndicat Intercommunal d'Adduction d'Eau Potable et d'Assainissement) et au CREN (Conservatoire Régional des Espaces Naturels) de Bourgogne, identifiés comme manquants lors du séminaire de lancement, ainsi qu'aux acteurs avec lesquels nous avons noué des liens entre temps : la Chambre d'Agriculture de Seine-et-Marne qui réalise actuellement un Atlas pédologique de la Seine-et-Marne au 50 000^e et le bureau d'étude Biotope auquel l'agence de l'eau Seine-Normandie a confié la délimitation des zones humides sur la Seine amont.

Partenariats mis en place, envisagés

D'un point de vue scientifique, ce projet de recherche a été l'occasion de mettre en place deux principaux partenariats pluridisciplinaires : un premier entre économistes, géographes, hydrochimistes et pédologues et un second entre agronomes et économistes. Ces partenariats devraient se poursuivre pour la valorisation des résultats obtenus.

D'un point de vue plus opérationnel, ce projet a été l'occasion de mettre en place et d'envisager un certain nombre de partenariats avec les acteurs locaux de la gestion de l'eau.

Dans le cadre du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) de l'Armançon, le Syndicat de l'Armançon (SIRTAVA) a mandaté le bureau d'étude Asconit Consultants pour réaliser l'inventaire des zones humides effectives sur le sous-bassin versant de la Brenne. Ayant eu connaissance de nos travaux suite au séminaire acteurs de lancement du projet de recherche, le SIRTAVA nous a proposé un partenariat sur ce sujet. Dans ce cadre, nous avons mis à disposition du bureau d'étude mandaté pour réaliser l'inventaire les couches d'information géographique produites dans le cadre de l'identification et de la spatialisation des zones humides potentielles de l'Armançon. En échange, le bureau d'étude mettra à notre disposition ses données de sondage de terrain afin que nous puissions avancer dans la validation de notre méthode d'identification des zones humides potentielles sur la base de critères topographiques. Un partenariat est également envisagé avec le bureau d'étude Biotope et l'agence de l'eau Seine-Normandie dans le cadre de la délimitation des zones humides sur la Seine amont. Il s'agirait de mettre en œuvre la méthode d'identification et de spatialisation des zones humides développée dans ce rapport à l'échelle du bassin de la Seine amont.

Liste des opérations de valorisation issues du contrat

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES
<p>Publications scientifiques parues</p> <p>Martin E. (2012). Potential of artificial wetlands for removing pesticides from water. <i>Environmental Economics</i> 3(1), 90-100.</p>
<p>Publications scientifiques prévues</p> <p>Ay J.S. (2011). Informations sur le foncier agricole pour contribuer à la gestion de l'eau, Document de Travail du CESAER n°2011/6, 39 p.</p> <p>Ay J.S., Brayer J.M., Cavailhès J., Curmi P., Hilal M., Ubertosi M. (2012). Valeurs hédoniques des attributs naturels des terres agricoles de Côte-d'Or. Document de Travail du CESAER n° 2012/1, 33 p.</p> <p>Grivault C. (2012). Modélisation de la distribution spatiale des sols hydromorphes pour la cartographie des zones humides potentielles : une approche par les arbres de classification. Mimeo, 31 p.</p> <p>Hilal M., Martin E., Piguet V. (2014). Prédiction du coût d'achat des parcelles agricoles de Côte-d'Or. Mimeo, 20 p.</p> <p>Martin E. (2013). Should we internalize intertemporal production externalities in the case of pest resistance? DT CESAER n° 2013-4, 36 p.</p>
<p>Projets d'articles</p> <p>Amiotte-Suchet P., Brayer J.M., Curmi P., Hilal M., Martin E., Piguet V., How to select wetlands to buy to protect water against nitrogen?</p> <p>J.M. Brayer, Curmi P., Hilal M., Legras S., Martin E., Munier-Jolain N., Piguet V., Agricultural compensations versus wetlands purchase in order to protect water from pesticides.</p> <p>Legras S., Martin E., Munier-Jolain N., Land work against herbicide resistance?</p>
COLLOQUES
<p>Participations passées à des colloques</p> <p>Ay J.S. (2011) présenté aux 6^{es} Journées de Recherche en Sciences Sociales de la SFER 2012, 13-14 décembre, Toulouse.</p> <p>Martin E. (2012) présenté à la 85th Annual Conference of the Agricultural Economics Society, 18-20 avril 2011, Warwick, Angleterre.</p> <p>Martin E. (2012) présenté aux XVII^{es} Journées de Microéconomie Appliquée, 2-3 juin 2011, Sousse, Tunisie.</p> <p>Martin E. (2013) présenté au Workshop Markets, Strategic Interactions and Environment: Theories and Applications, 14 décembre 2012, Dijon.</p> <p>Martin E. (2013) présenté au 2013 AAEA (American Agricultural Economics Association) and CAES (Canadian Agricultural Economics Society) Joint Annual Meeting, 3-7 août 2013, Washington D.C., États-Unis.</p> <p>Martin E. (2013) présenté aux 7^{es} Journées de Recherche en Sciences Sociales de la SFER 2013, 12-13 décembre 2013, Angers.</p>
THÈSES
<p>Thèses passées</p> <p>Ay J.S. (2011). Hétérogénéité de la terre et rareté économique. Thèse de doctorat en Sciences Economiques de l'Université de Bourgogne dirigée par J. Cavailhès, 203 p.</p>

Thèses en cours

Lechenet M., Étude de la faisabilité de la réduction de l'usage des pesticides en grandes cultures par l'analyse d'un réseau national de fermes de démonstration ECOPHYTO. Thèse de doctorat en Sciences de l'environnement dirigée par N. Munier-Jolain.

Regnier C., Développement urbain et services écosystémiques : quelles stratégies d'intervention publique sur le marché foncier ?, Thèse de doctorat en Sciences Economiques co-dirigée par C. Détang-Dessendre et S. Legras.

ENSEIGNEMENT - FORMATION

Henriot F. (2012). Estimation du prix des terres en Côte-d'Or. Stage de Master 2 Mathématiques pour l'Informatique Graphique et Statistiques de la faculté des sciences de Dijon encadré par E. Martin et V. Pigué, 57 p.

Lechenet M. (2012). Reconquête de la qualité des eaux sur un bassin versant : évaluation des conséquences économiques et environnementales de changements de pratiques agricoles. Stage de fin d'études d'ingénieur agronome (Montpellier SupAgro), spécialisation Productions Végétales Durables, co-encadré par S. Legras et N. Munier-Jolain, 53 p.

Lelu F. (2012). Spatialisation des zones humides sur la base des caractéristiques des sols et d'indices topographiques à l'échelle des bassins versants de Côte-d'Or. Stage de Master 1 Ingénierie des Hydrosystèmes et des bassins versants de la faculté des sciences de Tours encadré par P. Curmi, 73 p.

Simoli G. (2012). Évaluation de l'impact des zones humides sur les transferts de nitrates à l'échelle des bassins versants de Côte-d'Or. Stage de Master 2 Gestion de l'eau et Environnement de Montpellier SupAgro encadré par P. Amiotte-Suchet, 56 p.

Sittler V. (2012). La protection et la gestion des zones humides pour la qualité des eaux, Rapport de stage de M1 Sciences de l'Environnement (Université de Bourgogne) encadré par S. Legras, 40 p.

COMPTES-RENDUS TECHNIQUES

Cognet C. (2011). Identification et délimitation des zones humides potentielles de Côte-d'Or sur la base de critères pédologiques. Miméo, 15 p.

Grivault C. (2012). Intégration de données biophysiques et socioéconomiques pour la prédiction des prix des terres agricoles. Miméo, 20 p.

Grivault C. (2012). Traitement du Registre Parcellaire Graphique (RPG) pour la spatialisation des usages agricoles des terres. Miméo, 15 p.

Grivault C. (2012). Fusion de données du RPG et de la BD Topo pour la constitution d'une couche d'information sur l'occupation du sol. Miméo, 5 p.

Grivault C. (2012). Diagnostic du potentiel d'utilisation de l'enquête Pratiques Culturelles dans le cadre d'ECOSOLHYDRO. Miméo, 18 p.